

LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS
EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

YVAN RIBEIRO PARAIBA JÚNIOR

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: S. R. NAIDU

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
1979



P2211 Paraíba Júnior, Yvan Ribeiro.
Localização de descargas parciais em enrolamentos de transformadores / Yvan Ribeiro Paraíba Júnior. - Campina Grande, 1979.
95 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1979.
"Orientação : Prof. S. R. Naidu".
Referências.

1. Transformadores Elétricos. 2. Transformadores - Enrolamentos. 3. Transformadores - Descargas. 4. Descargas Parciais. 5. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Naidu, S. R. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.314(043)


AOS MEUS PAIS.

A G R A D E C I M E N T O S

QUERO DEIXAR EXPRESSO AQUI, MINHA CORDIAL HOMENAGEM A TODOS AQUELES QUE, DE UMA MANEIRA DIRETA OU INDIRETA, COLABORARAM PARA A REALIZAÇÃO DESTA, ESPECIALMENTE,

- AO PROFESSOR ORIENTADOR - S.R.NAIDU
- À COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO CEARÁ (COELCE)
- À SOCIEDADE ANÔNIMA DE ELETRIFICAÇÃO DA PARAIBA(SAELPA)
- À COMPANHIA DE ELETRICIDADE DA BORBOREMA(CELB)

AS EXPERIÊNCIAS CITADAS NESTA TESE FORAM POSSÍVEIS DEVIDO A DOAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PELO:

- GOVERNO CANADENSE ATRAVÉS DO PROGRAMA DE COOPERAÇÃO "WATERLOO/BRASIL/CIDA"
 - CONSELHO BRITÂNICO
- 

A B S T R A C T

THE PHENOMENON OF PARTIAL DISCHARGES IN SOLID INSULATION, PARTICULARLY TRANSFORMER INSULATION HAS BEEN STUDIED. VARIOUS METHODS OF LOCATING PARTIAL DISCHARGES IN TRANSFORMERS HAVE BEEN CONSIDERED THE CAPACITIVELY TRANSMITTED VOLTAGE RATIO HAS BEEN MEASURED AND USED AS A LOCATION PARAMETER FOR DELTA-CONNECTED TRANSFORMER WINDINGS.

R E S U M O

O FENÔMENO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ISOLAMENTO SÓLIDO, PARTICULARMENTE EM ISOLAMENTOS DE TRANSFORMADORES, TEM SIDO ESTUDADO. OS VÁRIOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES TÊM SIDO CONSIDERADOS. A RELAÇÃO DAS TENSÕES TRANSFERIDAS CAPACITIVAMENTE TEM SIDO MEDIDA E USADA COMO PARÂMETRO DE LOCALIZAÇÃO EM ENROLAMENTOS EM TRIÂNGULO.

Í N D I C E

INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO I - DESCARGAS PARCIAIS EM MATERIAIS ISOLANTES	03
1.1. - INTRODUÇÃO	03
1.2. - FENÔMENOS DE DESCARGAS PARCIAIS	03
1.2.1. - Descrição do Fenômeno	03
1.2.2. - Deterioração de Materiais Isolantes Devido à Descargas Parciais.....	08
1.3. - DETEÇÃO ELÉTRICA DE DESCARGAS PARCIAIS	10
1.3.1.- Princípios Básicos: Detecção Direta e Detecção Equilibrada	10
1.3.2.- Sensibilidade e Resolução dos Circui tos de Detecção	15
CAPÍTULO II - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS QUE CON TROLAM A LOCALIZAÇÃO DE DESCAR GAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES	24
2.1. - INTRODUÇÃO	24
2.2. - O CIRCUITO EQUIVALENTE GENERALIZADO E EQUA ÇÕES DE CONTROLE	24

LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS
EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

YVAN RIBEIRO PARAIBA JÚNIOR

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: S. R. NAIDU

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
1979

2.3. - DISTRIBUIÇÃO INICIAL	28
2.4. - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL DEVIDO A DESCARGAS PARCIAIS	31

CAPÍTULO III - MÉTODOS ELÉTRICOS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS ...	46
---	----

3.1. - INTRODUÇÃO	46
3.2. - MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA CAPACITIVA	47
3.3. - MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES	49
3.4. - MÉTODO DE ANÁLISE DA FORMA DE ONDA	51
3.5. - MÉTODO DE ANÁLISE DO ESPECTRO DE RÁDIO FREQUÊNCIA.....	54
3.6. - CONCLUSÕES	58

CAPÍTULO IV - MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES	66
--	----

4.1. - INTRODUÇÃO	66
4.2. - MÉTODO USADO PARA LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	67
4.2.1. - Calibração	67
4.2.2. - Localização de Descargas Parciais..	71

4.3. - CIRCUITO DE TESTE	72
4.4. - PROCEDIMENTO DO ENSAIO	74
4.4.1. - Calibração	74
4.4.2. - Ensaio com Tensão Aplicada	75
4.5. - RESULTADOS	76
4.6. - DISCUSSÃO	77
4.7. - CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	94

INTRODUÇÃO

Descargas parciais, são descargas elétricas que não causam curto circuito entre eletrodos, ocorrendo portanto, somente em parte da isolação.

A presença dessas descargas em materiais isolantes podem, no caso de descargas de alta intensidade, conduzir, depois de um período de serviço relativamente curto, à deterioração e posterior destruição do isolante. Por outro lado, descargas de pequena intensidade podem ser consideradas virtualmente inofensivas. Essas descargas ocorrem quando numa parte do isolante, a intensidade de campo ultrapassa o valor-limite.

A detecção e medição das descargas são auxílio valiosos, quando se necessita de estimar a vida do isolamento e de localizar fontes de descargas em que, possivelmente, ocorrerão falhas no isolamento. O capítulo I descreve o fenômeno das descargas parciais e sua influência nos processos de deterioração dos materiais isolantes. Um estudo resumido sobre os princípios básicos da detecção elétrica de descargas parciais também é apresentado.

A análise das respostas teóricas, para pulsos de descargas nos enrolamentos dos transformadores, com particular referência para os parâmetros que afetam as técnicas de localização, é apresentada no capítulo II.

Quatro diferentes métodos elétricos mais usados de detecção e medição das descargas parciais são descritos no capítulo III e comparados para a escolha do método mais adequado, a fim de ser utilizado em enrolamentos de transformadores com baixo fator de atenuação.

O método de localização de descargas parciais utilizado, os procedimentos para calibração e ensaios e os equipamentos que compõem o sistema de medição vêm descritos no capítulo IV. Os resultados das medições de calibrações e ensaios, juntamente com as considerações teóricas, também são discutidos após o que se obtêm conclusões, visando a demonstrar a validade do método utilizado.

CAPÍTULO I

DESCARGAS PARCIAIS EM MATERIAIS ISOLANTES

1.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve o fenômeno de descargas parciais em materiais isolantes, aplicando-se tensões alternadas. O modelo de Mason⁽¹⁾, representativo do local de ocorrência de descargas, é elaborado; a análise do processo de deterioração dos materiais isolantes é apresentada, bem como a razão de deterioração, relacionada com a frequência da tensão e grandeza das descargas. Um breve estudo sobre os princípios básicos de detecção elétrica de descargas parciais é realizada, com particular referência, para os parâmetros que afetam as técnicas de medição.

1.2. FENÔMENO DE DESCARGAS PARCIAIS

1.2.1. Descrição do Fenômeno

Em qualquer isolamento, sempre existe a possibilidade de inclusões durante o serviço ou devido ao mau controle de qualidade. A rigidez dielétrica da inclusão é sempre menor que a do isolamento. Também a constante dielétrica de inclusão é menor e, por isso, a intensidade de campo é maior.

Em uma cavidade limitada por material isolante, as descargas se processam de modo semelhante às descargas que o-

correm em eletrodos metálicos, igualmente espaçados. A tensão de descarga para um certo gás é determinada pela curva de Paschen, conforme fig. 1.1, que mostra a tensão da ruptura do ar, como função da pressão, vezes o afastamento entre eletrodos.

As descargas parciais pertencem ao grupo de descargas nos gases, nos quais as moléculas são ionizadas pelo impacto de eletrons. Em consequência, a energia recebida pelas moléculas dos gases faz com que estas moléculas aumentem seus movimentos aleatórios, de tal forma, que as colisões entre moléculas se verifiquem com muito mais frequência. Essas colisões libertam os eletrons de seus átomos, tornando-os ions negativos livres. Os eletrons liberados ganham velocidade na presença de um campo elétrico na cavidade, ionizando mais moléculas pelo impacto, tal que uma avalanche de eletrons é formada. Dependente do campo aplicado, a formação de avalanches pode resultar numa amplificação de corrente entre os eletrodos, formando consequentemente uma passagem condutiva através do gás.

Em papel impregnado a óleo, como no caso dos transformadores, pode acontecer liberação de eletrons dos condutores, rompendo o óleo, com consequente liberação de hidrogênio, a uma razão suficiente para formação de bolhas, nas quais podem ocorrer descargas nos gases. Do mesmo modo, quando ocorrer ruptura em uma inclusão (que consiste de material estranho ao isolamento) ou em um isolamento sólido, uma cavidade cheia de gás é formada, na qual podem ocorrer descargas internas, sob a ação de tensões alternadas, aplicadas no isolamento.

O comportamento das descargas internas, para tensões alternadas, pode ser representado pela seção de um dielétrico sólido e o seu circuito equivalente correspondente conforme fig. 1.2.a e fig. 1.2.b, respectivamente. A fig. 1.3 representa a seqüência de descarga do circuito equivalente da fig. 1.2.b. Quando uma tensão alternada V_c é aplicada através da cavidade e atinge a tensão de ruptura U^\pm , descargas ocorrem na cavidade em cada meio ciclo, como se o capacitor C_c do modelo da fig. 1.2.b fosse instantaneamente curto-circuitado. Essas descargas provocam uma queda de tensão ΔV , reduzindo instantaneamente a tensão de U^\pm para V^\pm , momento em que a descarga se extingue. A tensão U é a tensão de iniciação, e V é a tensão de extinção. Com a extinção da descarga, a tensão sobre a cavidade aumenta outra vez, como se indica na fig. 1.3.

Depois dessa primeira descarga, o subsequente comportamento do modelo depende da amplitude da tensão alternada que se aplica e da tensão residual V^\pm . Isto é devido às cargas estáticas nas paredes da cavidade, originadas quando da formação da cavidade ou produzidas em consequência da última descarga. Quando a tensão V_c na cavidade atinge novamente a tensão de ruptura U^\pm , uma nova descarga ocorre, até que a tensão alternada V_a sobre o dielétrico decresça, e a tensão V_c sobre a cavidade caia para a tensão de ruptura U^- , antes de ocorrer uma nova descarga. A tensão de ruptura U^\pm é determinada pela curva de Paschen. Descargas na cavidade de um material isolante dão origem a impulsos de corrente no isolante, como indicado está na fig. 1.3. Esses impulsos são concentrados nas regiões onde a taxa de crescimento ou decrescimento da tensão aplicada é mais elevada.

Descargas podem persistir, depois da ocorrência de uma descarga precedente, mesmo para um valor de tensão mais baixo do que o valor de tensão, para o qual as descargas se iniciam. Neste caso, a tensão V_c sobre a cavidade, originalmente menor do que a tensão de ruptura U^\pm , atinge esta tensão a cada meio ciclo, devido às cargas superficiais residuais nas paredes da cavidade, deixadas pelas descargas precedentes.

Em cavidades assimétricas, nas quais a queda de tensão ΔV^+ , no meio ciclo positivo, é diferente da queda de tensão ΔV^- , no meio ciclo negativo, podem aparecer descargas intermitentes, como mostrado ficou na fig. 1.4. A primeira descarga ocorre, quando o valor da tensão V_c atinge o valor da tensão U^+ , no ponto A. Uma segunda descarga ocorre no ponto B, devido à superposição da tensão V_c com a carga superficial nas paredes da cavidade. Posteriormente, uma descarga subsequente à segunda ocorre para o ponto C. A descarga seguinte não ocorre, em consequência de a tensão nesse meio ciclo não atingir o valor da tensão U^- . A carga superficial na cavidade persiste por muitos ciclos, sem que ocorra mais nenhuma descarga, até que a carga tenha desaparecido através do vazamento, ocasião em que se inicia mais uma seqüência de descarga, que começa e se extingue outra vez.

Quando uma tensão alternada, aplicada através de uma cavidade, é aumentada lentamente, a partir de um determinado baixo valor, uma primeira descarga se iniciará, quando esta tensão atingir o valor da tensão de iniciação. Esta é portanto a menor tensão para a qual as descargas parciais têm início. Por outro lado, a tensão de extinção é de-

terminada, quando se reduz gradualmente a tensão, a partir de um valor superior à tensão de iniciação, até que atinja um valor de tensão, para a qual as descargas se extinguam. A tensão de extinção, observada na prática por Kreuger⁽²⁾, para o mesmo isolamento sólido, é de, no máximo, 25% menor do que a tensão de iniciação. A exceção é feita para o papel impregnado, no qual a tensão é ainda menor, devido à formação de bolhas de gás.

Quando, em um isolamento sólido, ocorre uma descarga em uma cavidade, esta causa uma queda de tensão de U para V (fig. 1.3.). Esta queda de tensão provoca uma redistribuição de carga entre C_a , C_b e C_c , resultando em uma repentina queda de tensão ΔV , sendo a tensão, através do isolamento sólido, dada por:

$$V = (U - V) C_b / (C_a + C_b),$$

onde:

C_a = capacitância não afetada pela descarga;

C_b = capacitância em série com o local da descarga.

Essa queda de tensão ΔV corresponde à perda de carga q , do isolamento sólido, dada por:

$$q = \Delta V \cdot \{ C_a + C_b \cdot C_c / (C_b + C_c) \} \quad \dots 1.1.$$

C_c = capacitância da cavidade afetada pela descarga.

Essa perda de carga é chamada de grandeza de descarga.

A energia dissipada pela descarga pode ser a causa da deterioração do material isolante, podendo ser tomada como medida e relacionada com a perda de carga q , pela equação:

$$W = \frac{1}{2} \cdot q \cdot U$$

1.2.2. Deterioração de Materiais Isolantes Devido Às descargas Parciais.

A deterioração dos materiais isolantes, devido às descargas parciais, se inicia com a formação de gases, de maneira progressiva, através dos pontos mais frágeis das suas diferentes camadas, até à ruptura final no seu percurso para o eletrodo oposto.

De acordo com Mason⁽¹⁾, este processo de deterioração compreende três estágios:

No primeiro estágio, a radiação ou degradação térmica causa uma erosão superficial uniforme. Este estágio é caracterizado pela desintegração das camadas do isolamento, dentro dos limites da região erodida, e pela presença de muitos fragmentos da fibra do isolamento.

No segundo estágio, as descargas que penetram nas primeiras camadas do isolamento se concentram de maneira mais acentuada nas paredes da cavidade do que em seu centro; conseqüentemente, as descargas, ocorrendo adjacentes às paredes da cavidade, dão origem à formação de um número indeterminado de fendas profundas na periferia da cavidade. Com o

subseqüente aumento das fendas, a energia da descarga aumenta e, algumas vezes, ocorre a carbonização das fendas.

No terceiro estágio, a intensidade na extremidade da fenda é suposta para aproximar-se da intensidade elétrica intrínseca do isolamento, acima de uma distância de alguns microns. Em conseqüência o isolamento é fendido nessa distância, fazendo, portanto, que o campo máximo se mova para uma nova extremidade. Dessa maneira, canais microscópicos se propagam rapidamente, a partir das fendas, através do isolamento, como resultantes da intensa concentração de campo no local de impacto das descargas.

A razão de deterioração dos materiais isolantes aumenta com o número de descargas e é, pois, proporcional à freqüência da tensão aplicada. Portanto, ela depende da amplitude dessa tensão. A razão de deterioração depende também da intensidade da descarga e da natureza do dielétrico. A vida de um material isolante sob tensão é, por conseguinte, inversamente proporcional à freqüência. Logo, para altas freqüências, as descargas se propagam mais rapidamente no isolante, reduzindo consideravelmente sua vida.

A vida dos materiais isolantes é conhecida para decrescer exponencialmente com o aumento da tensão que ocorra acima da tensão de iniciação de descargas. Portanto, a vida da tensão (voltage life) de muitas formas de isolamento é de terminada para ser proporcional a $(V_i/V_a)^n$. O expoente n varia entre 3 e 10, dependendo do tipo e espessura do isolamento, da temperatura ambiente e da grandeza das descargas individuais⁽¹⁾. Se a intensidade da tensão aplicada não ex

cede grandemente o valor da tensão de iniciação, as descargas causam geralmente uma erosão muito lenta. Por outro lado, quanto mais alta é a intensidade da descarga, mais rapidamente se propagam os canais a partir das fendas.

A grandeza da descarga aumenta com a profundidade da cavidade e sua área. Entretanto, a vida da tensão é afetada somente pela profundidade. As cavidades adjacentes ao condutor mostram um comportamento que depende também do diâmetro da cavidade. Quanto a relação entre o diâmetro D e a profundidade da cavidade for $D/\Delta < 5$, as descargas tendem a extinguir-se e a permanecer, se $D/\Delta > 5$. A fig. 1.5. mostra a vida da tensão como uma função da intensidade para diferentes profundezas da cavidade⁽²⁾.

As descargas parciais abaixo de uma determinada grandeza deterioram o material isolante tão lentamente, que se torna praticamente infinita a vida do isolante. Essas descargas, denominadas de grandeza de descarga permissível, dependem grandemente da intensidade da tensão aplicada ao isolamento e de sua frequência.

1.3. DETEÇÃO ELÉTRICA DE DESCARGAS PARCIAIS

1.3.1. Princípios Básicos: Detecção Direta e Detecção Equilibrada.

A medição de descargas proporciona um teste sensível e não destrutivo na detecção da presença de defeitos que se iniciam nos materiais isolantes, baseando-se na ob-

servação dos fenômenos que são causados pelas descargas. As aplicações das técnicas de detecção de descargas dependem das condições nas quais ocorrem as descargas, nos diferentes tipos de isolamento, do comportamento das descargas, isto é, em suas grandezas e frequências de repetição em termos de formas de ondas das tensões aplicadas e nas formas diferentes de deterioração e ruptura causadas pelas descargas. As descargas parciais em um corpo de prova, como indicado está no item 1.2, causam dissipação e transferência de carga no local da ocorrência, dando origem a impulsos elétricos de corrente e a uma repentina queda de tensão ΔV , nos terminais do corpo de prova.

O diagrama básico para detecção desses impulsos é indicado na fig. 1.6, e tem como elementos essenciais um corpo de prova de capacitância C_a , onde ocorrem as descargas, uma impedância de detecção Z , através da qual os impulsos de tensão são formados, um capacitor de acoplamento C_k , para facilitar a passagem dos impulsos de corrente de alta frequência, uma fonte de alta tensão e um registrador como osciloscópio. A impedância de detecção Z pode ser conectada em série com o capacitor de acoplamento, como se vê indicado na linha tracejada da fig. 1.6, ou conectada em série com o corpo de prova. No primeiro caso, a alta corrente capacitiva de C_a não passa através da impedância Z . Além disso, se acontecer uma ruptura de corpo de prova, a corrente de curto circuito não passa através da impedância. A impedância Z consiste geralmente em uma resistência R (Fig. 1.7) ou em um circuito sintonizado amortecido $L C R$ (fig. 1.8). Em combinação com o corpo de prova e o capacitor de acoplamento, a impedância de medição determina a duração e forma de onda dos impulsos.

O impulso de tensão, que aparece através da impedância de detecção constituída pela resistência R, é dado por:

$$V = \frac{q}{(1+C/C_k) C_a + C} \cdot e^{-t/Rm} \quad \dots 1.2,$$

onde:

C = capacitância própria da resistência R;

q = grandeza de descarga;

$$m = C + \frac{C_a \cdot C_k}{C_a + C_k}.$$

Quando a impedância de detecção consiste de um circuito oscilatório L C R, o impulso de tensão é dado por:

$$V = \frac{q}{(1+ C/C_k) C_a + C} \cdot e^{-t/2Rm} \cos \omega t \quad \dots 1.3,$$

onde:

$$\omega = \left(\frac{1}{L_m} - \frac{1}{4 R^2 m^2} \right)^{1/2} \quad e$$

L = indutância do circuito LCR.

Neste circuito, o impulso de tensão cresce inicialmente para o mesmo valor de pico da equação 1.2, decaindo posteriormente em uma oscilação amortecida. Esses picos de im-

pulsos de tensão são proporcionais à grandeza da descarga q e independente da resistência R . Entretanto, se a resistência é pequena, a constante de tempo Rm é também pequena, e o impulso é instantâneo.

A detecção de descarga, baseada nestes princípios básicos, pode ser classificada em dois tipos: detecção direta e detecção equilibrada, dos quais são derivados os diferentes tipos de circuitos de detecção. A detecção direta se caracteriza pela transformação de impulsos de corrente, causados pelas descargas, em impulsos de tensão, os quais são amplificados e medidos. Esses impulsos de tensão, que aparecem através da impedância de detecção, constituído por uma resistência R ou por circuito sintonizado $L C R$, são idênticos aos impulsos de tensão dados nas equações 1.2 e 1.3, respectivamente.

Como a resposta para a descarga é tão criticamente afetada pela capacitância errática da resistência R e também pela relativa constante de tempo do circuito de teste e amplificador, é essencial avaliar a grandeza da descarga. Essa grandeza é avaliada pela comparação da resposta com uma tensão de calibração de grau Vq , com tempo de crescimento muito curto (≤ 10 ns), injetada no circuito de teste através de uma capacitância Cq (fig. 1.9). Essa capacitância é pequena em relação à capacitância do corpo de prova. Essa comparação é mais eficiente, quando se utiliza um osciloscópio, para mostrar simultaneamente os pulsos de calibração e de descargas. A grandeza da descarga é dada pela equação:

$$q = Vq \cdot Cq \cdot (1 + Ca/Ck) \quad \dots 1.4 .$$

A fig. 1.10 mostra o diagrama de Mole⁽³⁾ para detecção direta, com um circuito sintonizado L C R. Nesse diagrama, um filtro de bloqueio é colocado para eliminar os distúrbios provenientes da fonte de alimentação e do transformador de teste. O circuito L C R é colocado em série, com o capacitor de acoplamento C_k livre de descargas. A capacitância C varia de tal modo, que o circuito ressonante LCR é sintonizado para a frequência média do amplificador de banda passante B , após o que máxima sensibilidade é obtida.

A detecção equilibrada se baseia nos mesmos princípios de detecção direta. Ela elimina quase totalmente as perturbações de descargas externas e interferências. Entretanto, uma completa rejeição de interferência, somente é possível se as perdas dielétricas do corpo de prova e do capacitor de acoplamento forem iguais. Todavia, o circuito de detecção é somente equilibrado para uma frequência única, e, por consequência, a rejeição do ruído externo é menos eficaz, particularmente com um amplificador de faixa larga.

A fig. 1.11 mostra o diagrama da detecção equilibrada. Esse circuito é realmente uma ponte Schering. Os dois braços da ponte podem ser dois corpos de prova (C_a , C_a'). Os outros dois braços são impedâncias Z_d e Z_d' . Ambas as impedâncias são circuitos RC em paralelo. A ponte está em equilíbrio quando:

$$\frac{C_d}{C_d'} = \frac{R'}{R} = n.$$

Os impulsos de tensão, através dos pontos de medição 1 e 2 da ponte, são dados pela equação:

$$v = \frac{q}{C_t} \cdot e^{-t/RC_t} \quad \dots 1.5,$$

onde:

$$C_t = C_a + C_d + (n + 1) C_{12}.$$

Esses impulsos de tensão têm a mesma forma de onda da detecção direta, sendo também proporcionais à grandeza da descarga q , que é determinada pela injeção de pulsos de calibração no ponto da ponte, conectada ao corpo de prova.

1.3.2 Sensibilidade e Resolução dos Circuitos de Detecção

A sensibilidade de um circuito de detecção é definida como a menor grandeza da descarga que pode ser observada com o auxílio desse circuito. Segundo Dembinski⁽⁴⁾, a sensibilidade teórica máxima é obtida com um detetor de descarga, tendo um circuito de entrada sintonizado. Entretanto, essa sensibilidade teórica é difícil de ser encontrada na prática, devido às interferências eletromagnéticas, descargas em componentes do circuito de detecção ou distúrbios nos condutores principais e de terra. Conseqüentemente, a sensibilidade pode ser determinada pelo ruído do amplificador ou do circuito de detecção.

Na maioria dos circuitos de detecção, a sensibilidade é determinada pelo ruído térmico do amplificador. Este ruído aparece no osciloscópio como uma faixa luminosa e, de acordo com Kreuger⁽¹⁾, deve ser, em geral, duas vezes menor do que o pulso de descarga amplificado, para que este possa ser distinguido. O pico do pulso de tensão amplificado tem uma grandeza dada pela equação:

$$U' = \zeta V' = \zeta \frac{q}{C_T} \quad \dots 1.6,$$

onde:

ζ = fator de amplificação do amplificador e

V' = pico do pulso de entrada no amplificador.

Como $V' = 2 U_n$, onde U_n é a largura da banda luminosa do ruído, a sensibilidade pode ser dada pela equação 1.6, escrita da forma seguinte:

$$q_s = \frac{2}{\zeta} \cdot U_n \cdot C_T \quad \dots 1.7.$$

A resolução do circuito de detecção é definida, de acordo com Mole⁽³⁾, como o número de impulsos que podem ser distinguidos em um quadrante de 60c/s da onda de seno, sendo os impulsos separados por igual intervalo de tempo. Se a resolução não for adequada, pode acontecer uma superposição dos pul

sos de descarga (fig. 1.12). A constante de tempo de cada impulso deve ser suficientemente curta para permitir um grau de distinção entre os impulsos que ocorrem para diferentes locais de descarga em um corpo de prova. A resolução do circuito de detecção depende da resolução do osciloscópio, da constante de tempo do circuito de detecção e da banda de sintonização do amplificador. Geralmente, os impulsos são muito curtos, razão pela qual aparecem no osciloscópio como linhas retas perpendiculares à linha horizontal de referência.

O intervalo de tempo para o qual os impulsos podem ser observados separadamente deve ser na faixa de 1.5 a 3 vezes maior do que a constante de tempo τ dos impulsos. Portanto, a resolução r é dada por, $r = 1/300\tau$ para $r = \frac{1}{600\tau}$ impulsos por quadrante.

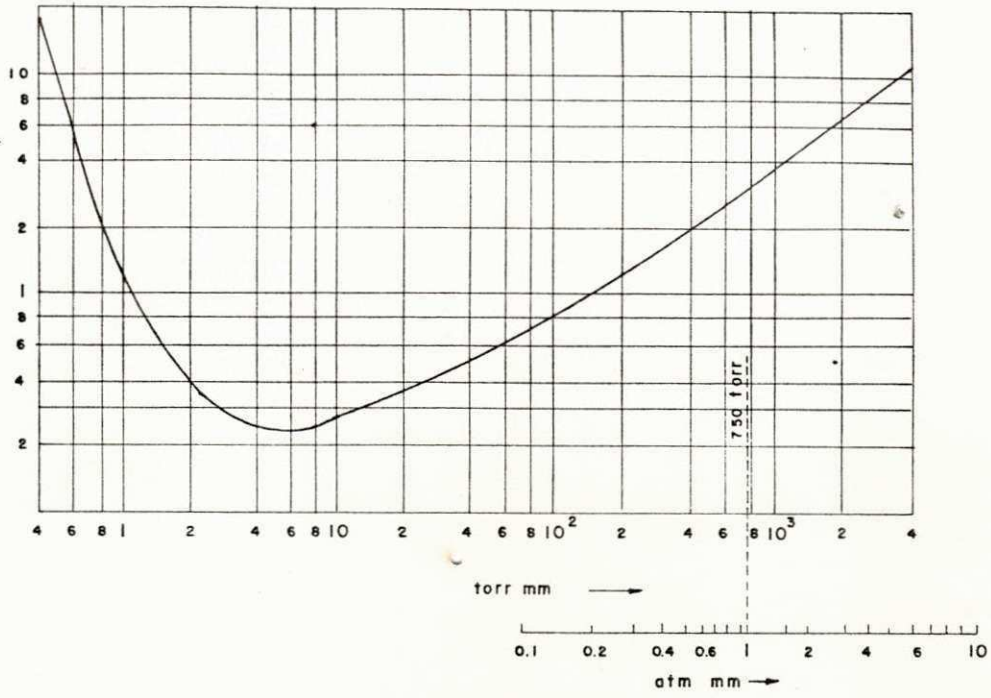


FIG. 1-1 — CURVA DE PASCHEN .

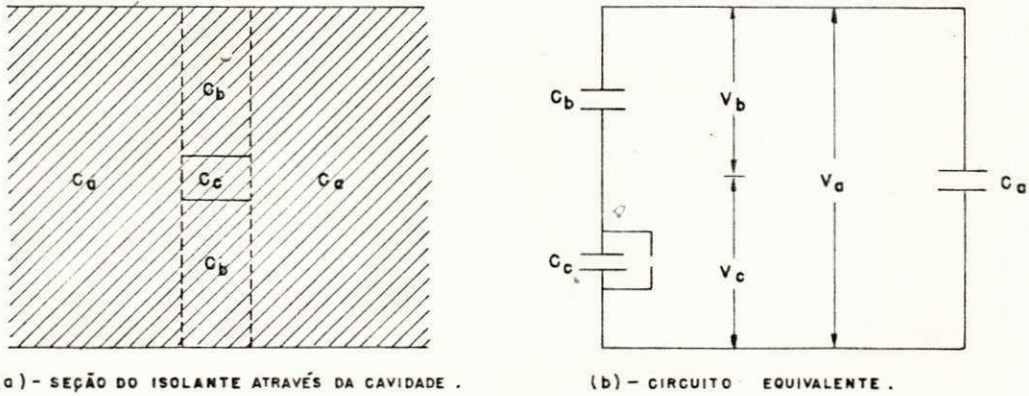


FIG. 1.2 — MODELO DE UMA CAVIDADE EM UM ELEMENTO SÓLIDO.

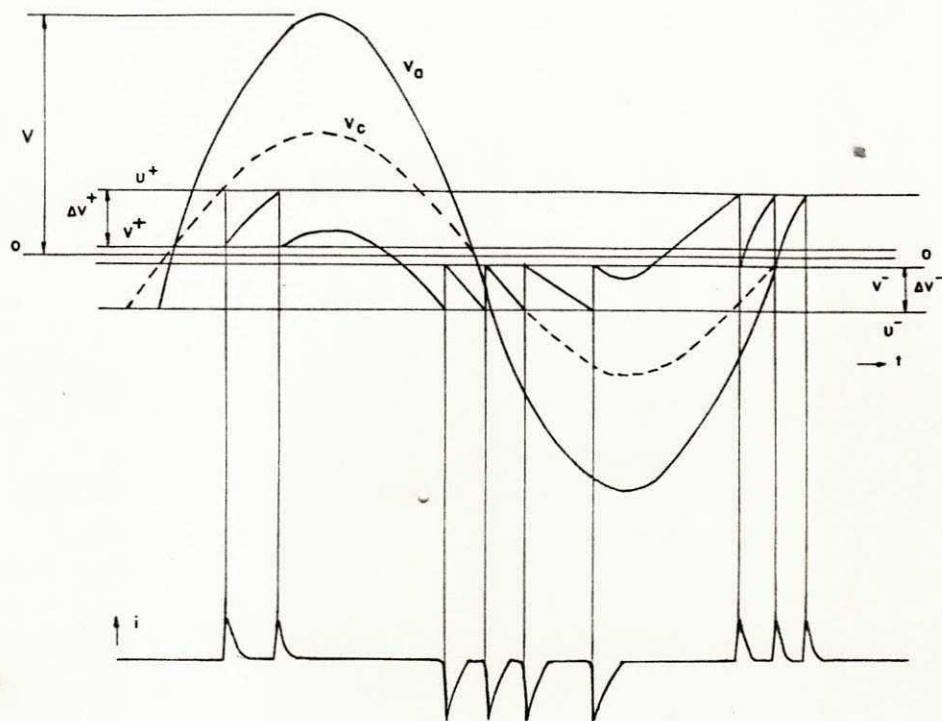


FIG. 1.3 - REPETIÇÃO DE DESCARGAS INTERNAS.

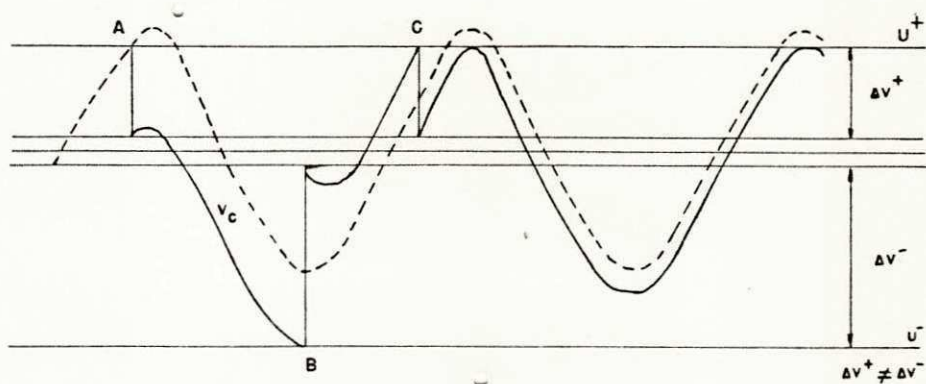


FIG. 1.4 - DESCARGAS INTERMITENTES EM UMA CAVIDADE ASSIMÉTRICA.

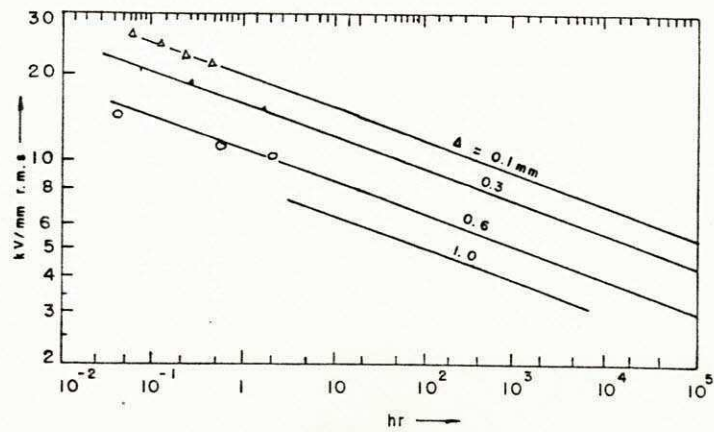


FIG. 1.5 — VIDA DA TENSÃO COMO FUNÇÃO DO CAMPO PARA VÁRIAS PROFUNDIDADES DA CAVIDADE.

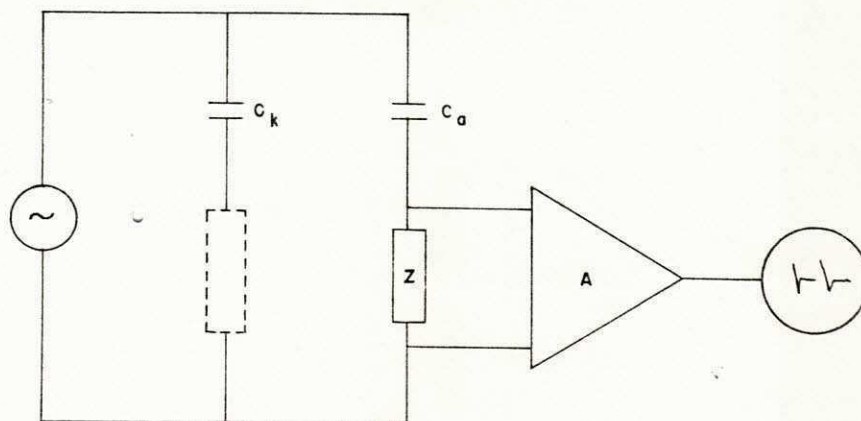


FIG. 1.6 — DIAGRAMA BÁSICO PARA DETEÇÃO DE DESCARGA ELÉTRICA.

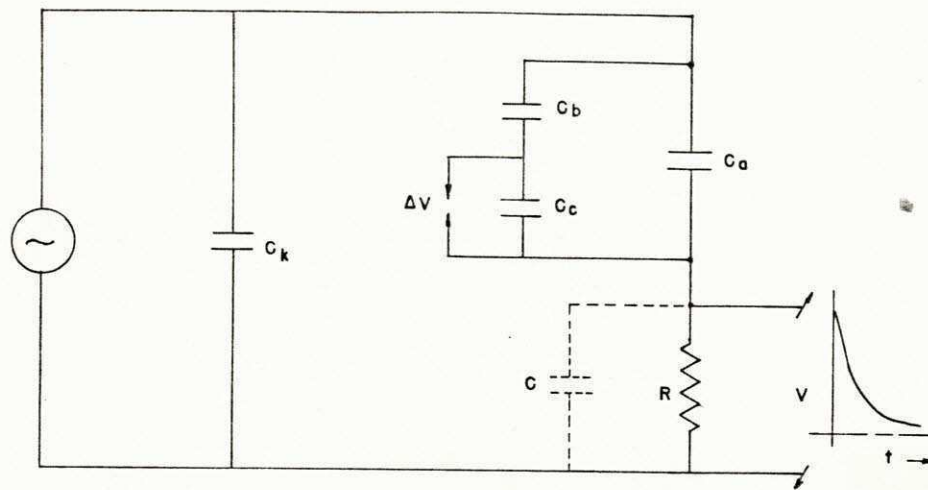


FIG. 1.7 - RESPOSTA COM O CIRCUITO RC .

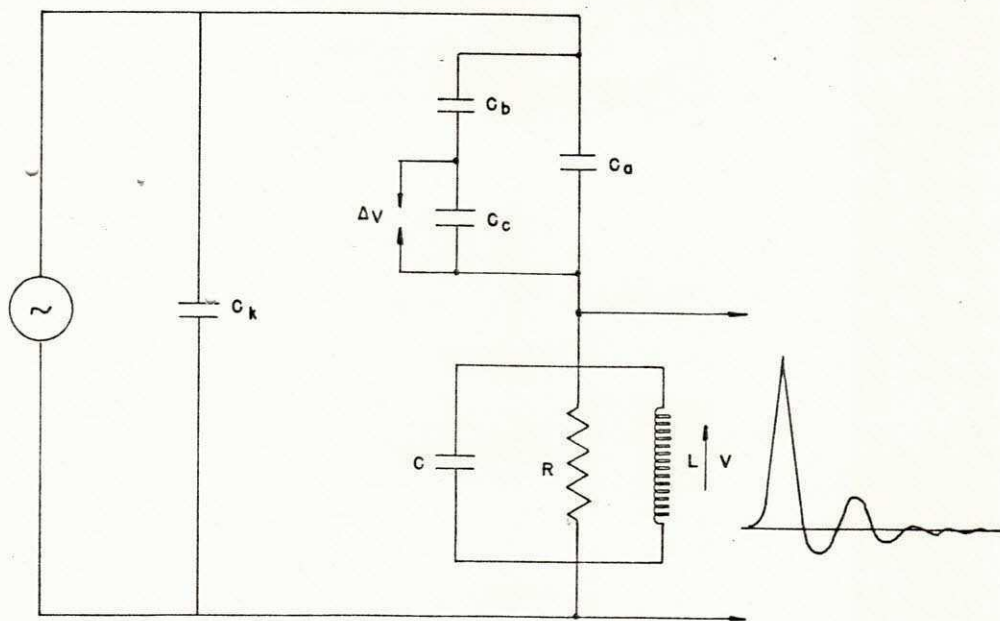


FIG. 1.8 - RESPOSTA COM O CIRCUITO LCR .

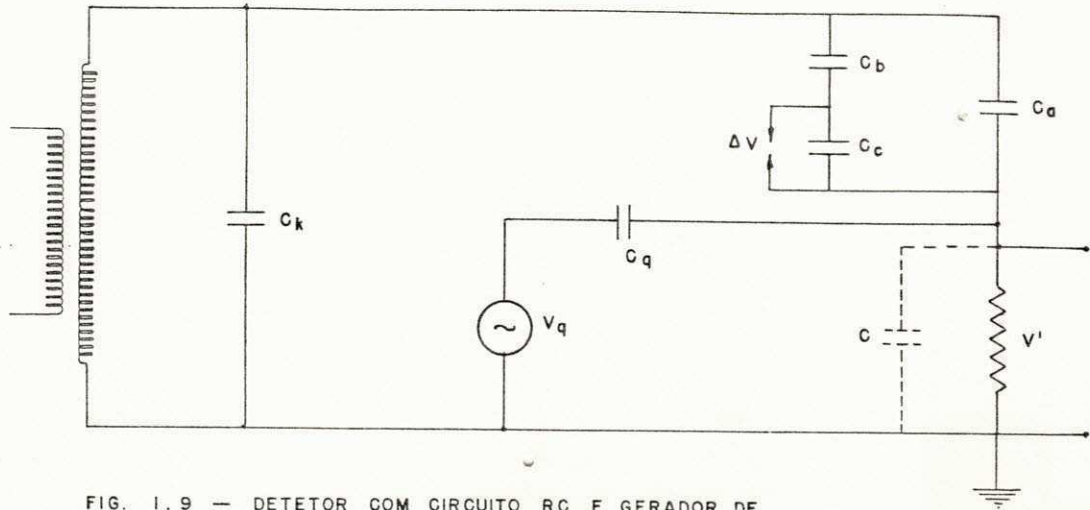


FIG. 1.9 — DETETOR COM CIRCUITO RC E GERADOR DE ONDA DEGRAU P/CALIBRAÇÃO.

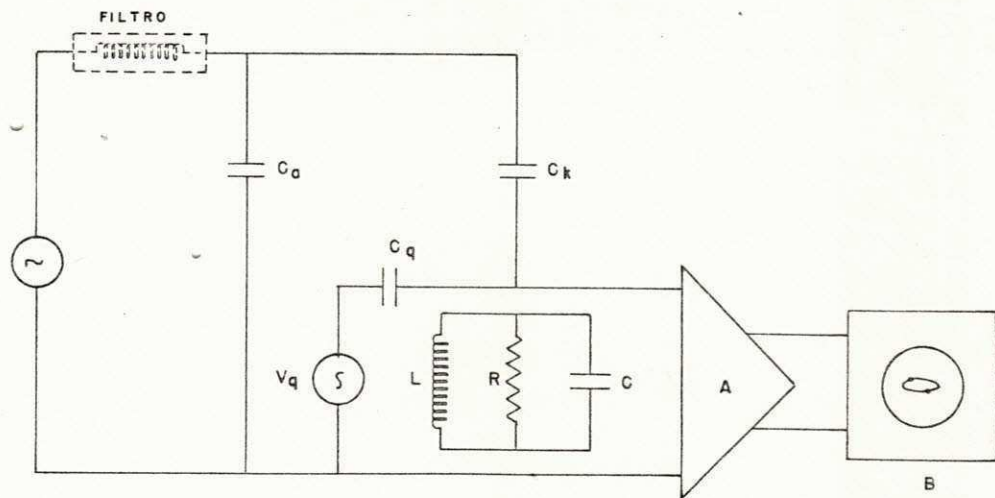


FIG. 1.10 — CIRCUITO LCR DE MOLE .

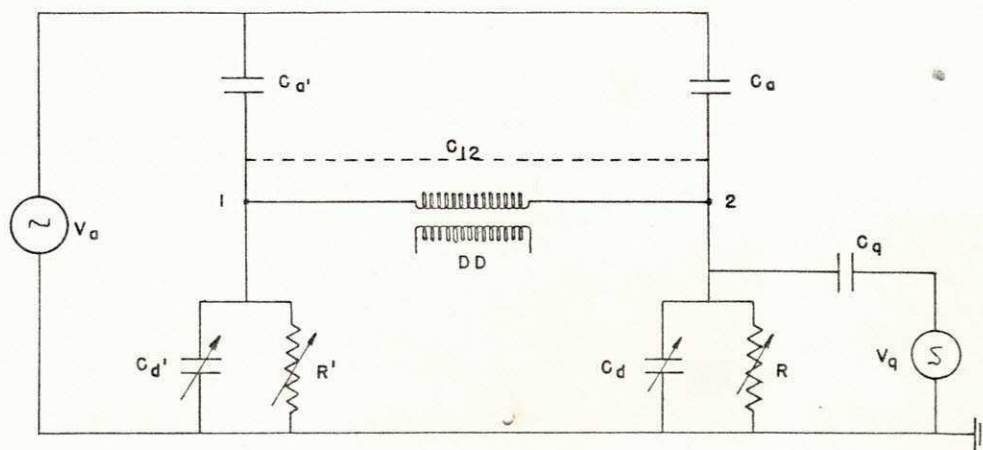


FIG. 1.11 - CIRCUITO DE DETEÇÃO EQUILIBRADO.

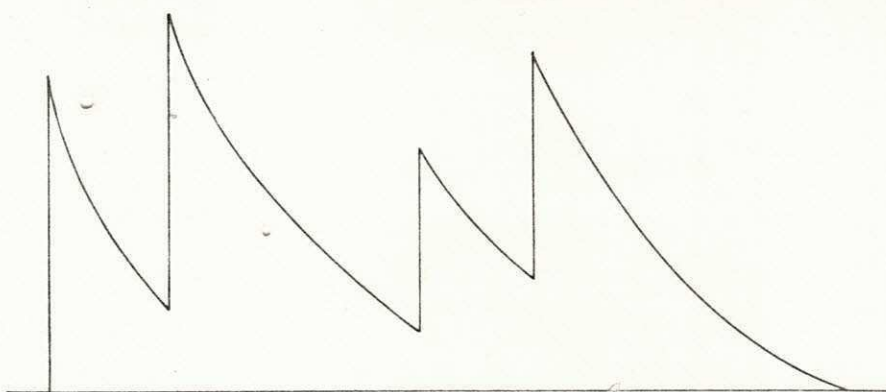


FIG. 1.12 - RESOLUÇÃO INADEQUADA DO CIRCUITO DE DETEÇÃO .

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS QUE CONTROLAM A LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

2.1. INTRODUÇÃO

As aproximações teóricas que definem a transferência dos pulsos de descargas parciais, ao longo do enrolamento de transformador, estão apresentadas neste capítulo. O circuito equivalente generalizado de Bewley (⁵) para enrolamentos de transformador é apresentado; a redução deste circuito equivalente para uma rede progressiva capacitiva permite um estudo das tensões transferidas capacitivamente aos terminais do enrolamento e a utilização da razão de voltagem transferida capacitivamente como um parâmetro de localização. Os efeitos de variações nos parâmetros do enrolamento e capacidades terminais, sobre a localização de descargas parciais, serão também apresentados.

2.2. O CIRCUITO EQUIVALENTE GENERALIZADO E EQUAÇÕES DE CONTROLE

Em geral, os enrolamentos de alta e baixa tensão de um transformador consistem em um número de seções de espiras múltiplas enroladas sobre suportes cilíndricos isolantes e separados por espaços e dutos de óleo. Cada espira de um enrolamento tem uma capacitância para todas as outras espiras, para o núcleo e para o tanque. A completa rede capacitiva de

um transformador \bar{e} , por conseguinte, um circuito muito complicado. Similarmente, cada espira de um enrolamento \bar{e} acoplada magneticamente a cada uma das outras espiras do enrolamento.

Para se obterem as características essenciais da resposta transitória de enrolamentos de transformador, algumas suposições simplificativas são necessárias. Assim, a natureza distributiva de cada seção de um enrolamento pode ser desprezada quando se considera a rede capacitiva do transformador⁽⁵⁾. A seção de um enrolamento pode ser considerada como unitária (fig.2.1), e a capacitância total entre suas espiras e a seção adjacente \bar{e} englobada na capacitância K_1 .

A capacitância média entre esta seção do enrolamento e o tanque \bar{e} C_1 , e a capacitância média entre duas seções adjacentes dos dois enrolamentos \bar{e} C_3 .

De modo semelhante, a indutância de cada seção pode ser L_1 e L_2 (por unidade de comprimento) e somente a indutância mútua M (por unidade de comprimento), radialmente entre as seções adjacentes, necessita ser considerada para se obterem as características principais da resposta transitória. Com essas simplificações, o circuito idealizado de um transformador de dois enrolamentos para transitórios de altas frequências \bar{e} mostrado na fig. 2.2.

Cálculos numéricos, considerando casos práticos, baseados sobre a análise do circuito equivalente da fig.2.2, mostram que as características essenciais da resposta transitória do enrolamento primário são substancialmente as mes-

mas, quando o enrolamento secundário é ignorado⁽⁵⁾. Nesse caso, as equações se tornam grandemente simplificadas e de fácil visualização. A análise transitória para um único enrolamento independente é dada abaixo. O modelo do circuito tem sido idealizado como acima se indica, mas os efeitos das perdas podem ser incluídos. O circuito equivalente para um enrolamento independente é dado na fig. 2.3. As constantes do circuito por unidade de comprimento do enrolamento são:

L = Indutância própria;

C = Capacitância em derivação para terra;

K = Capacitância-série ao longo do enrolamento;

G = Condutância em derivação para terra;

g = Condutância em derivação ao longo do enrolamento;

r = Resistência-série.

A análise do circuito da fig. 2.3a dá:

$$\left. \begin{aligned} (1 + rg) \frac{\partial e}{\partial x} &= ri + L \frac{\partial i}{\partial t} - Lk \frac{\partial^3 e}{\partial x \partial t^2} - (Lg + rk) \frac{\partial^2 e}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= Ge + C \frac{\partial e}{\partial t} \end{aligned} \right\} (2.1)$$

Considerando-se a transformada de Laplace para as equações(2.1) nós temos:

$$\left. \begin{aligned} \left[1 + rg + \beta^2 Lk + \beta (Lg + rk) \right] \frac{dE}{dx} &= rI + \beta LI - Li(x, 0_+) \\ &+ \beta Lk e(x, 0_+) + Lk e(x + 0_+) \\ &+ (Lg + rk) e(x, 0_+) \\ \frac{dI}{dx} &= GE + \beta CE - C e(x, 0) \end{aligned} \right\} (2.2)$$

onde: $E = E(x, s) = \mathcal{L}[e(x, t)]$, a transformada da variável $e(x, t)$

$$I = I(x, s) = \mathcal{L}[i(x, t)]$$

Desprezando-se as perdas e considerando-se todas as condições iniciais como zero, temos:

$$\left. \begin{aligned} (1 + \beta^2 Lk) \frac{dE}{dx} &= \beta LI \quad \text{--- (a)} \\ \frac{dI}{dx} &= \beta CE \quad \text{--- (b)} \end{aligned} \right\} \dots (2.3)$$

As equações 2.3 dão a resposta transitória de um enrolamento de transformador sem perdas. As soluções para estas equações devem satisfazer:

- a) As condições-limite para $x = 0$ e $x = \ell$;
- b) As condições iniciais para $t = 0$;
- c) As condições finais quando $t \rightarrow \infty$;

Se as soluções correspondentes para uma tensão - degrau unitária aplicada em $x = \ell$, $t = 0$ pode ser obtida; então, a solução para qualquer outra tensão terminal aplicada pode ser determinada pela superposição.

2.3. DISTRIBUIÇÃO INICIAL:

Quando uma tensão-degrau é aplicada no terminal do enrolamento, as correntes nas capacitâncias para o primeiro instante são infinitas, mas as correntes nas indutâncias associadas com o enrolamento é zero, e nas resistências as correntes são todas finitas. Por conseguinte, a distribuição inicial de potencial depende somente das capacitâncias (fig. 2.3 b) e pode ser determinada pela resolução da equação diferencial somente para as capacitâncias. Alternativamente, a solução geral das equações 2.3 pode ser obtida, e o limite desta solução, quando $t \rightarrow 0$ derivada. O segundo método será usado nas derivações seguintes.

Suponha-se que um enrolamento sem perdas \bar{e} aterrado em $x = 0$, através de uma impedância generalizada $Z(s)$, e que u ma tensão-degrau de grandeza $E_0 \bar{e}$ aplicada em $x = \ell$, $t = 0$.

Das equações 2.3,

$$(1 + \beta^2 LK) \frac{d^2 E}{dx^2} = \beta L \frac{dI}{dx} = \beta^2 LCE$$

$$\text{Isto } \bar{e}, \quad \frac{d^2 E}{dx^2} - \frac{\beta^2 LC}{1 + \beta^2 LK} E = 0$$

A solução desta equação \bar{e} :

$$E(x, s) = A(s) e^{\alpha x} + B(s) e^{-\alpha x},$$

$$\text{Onde: } \alpha = \sqrt{\frac{S^2 LC}{1 + S^2 LK}}$$

$$\text{De } I = \frac{1 + S^2 LK}{SL} \cdot \frac{dE}{dx}$$

$$I(x, s) = \frac{\sqrt{1 + S^2 Lk}}{Z_0} \left[A(s) e^{\alpha x} - B(s) e^{-\alpha x} \right],$$

$$\text{onde } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

As condições-limite são,

$$\text{em } x = l, E(l, s) = \frac{E_0}{s}$$

$$x = 0, E(0, s) = Z(s) \cdot I(0, s).$$

dessas condições, obtemos:

$$E(x, s) = \frac{E_0}{s} \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z(s)}{Z_0} \sqrt{1 + S^2 LK}\right) e^{\alpha x} - \left(1 - \frac{Z(s)}{Z_0} \sqrt{1 + S^2 LK}\right) e^{-\alpha x}}{\left(1 + \frac{Z(s)}{Z_0} \sqrt{1 + S^2 LK}\right) e^{\alpha l} - \left(1 - \frac{Z(s)}{Z_0} \sqrt{1 + S^2 LK}\right) e^{-\alpha l}}$$

A distribuição de tensão inicial é:

$$e(x, 0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s E(x, s)$$

$$= \lim_{s \rightarrow \infty} E_0 \cdot \frac{(1 + \lambda Z(s) \sqrt{CK}) e^{\alpha x} - (1 - \lambda Z(s) \sqrt{CK}) e^{-\alpha x}}{(1 + \lambda Z(s) \sqrt{CK}) e^{\alpha l} - (1 - \lambda Z(s) \sqrt{CK}) e^{-\alpha l}}$$

$$= \lim_{s \rightarrow \infty} E_0 \cdot \frac{\lambda Z(s) \sqrt{CK} \cosh \alpha x + \sinh \alpha x}{\lambda Z(s) \sqrt{CK} \cosh \alpha l + \sinh \alpha l}$$

Se $Z(S) = \frac{1}{\lambda C_N}$, isto é, uma capacitância C_N para terra no neutro,

$$\frac{e(x, 0)}{E_0} = \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha x + C_N \sinh \alpha x}{\sqrt{CK} \cosh \alpha l + C_N \sinh \alpha l} \dots (2.4)$$

A distribuição inicial $e(x,0)$, ao longo de enrolamento de transformador, para diferentes valores do fator de atenuação α , da capacitância de terra C e da capacitância para o neutro C_N é dada pelas curvas das figs. 2.4 e 2.5, obtidas da equação 2.4.

De acordo com as figs. 2.4 e 2.5, para valores correspondentes de x , o aumento do fator de atenuação provoca de crescimo nos valores de $e(x,0)$, para uma mesma capacitância C , ã exceção do ponto $x = 1$. De outra maneira, quando se considera o fator de atenuação constante e a capacitância C variando, a distribuição inicial cresce com o crescimento de C . Essa distribuição inicial atinge seu máximo valor $e(1,0) = E_0$, quando a descarga ocorre no terminal HV ($x = 1$), para quaisquer valores de α , C_N e C , considerado nas figs. 2.4 e 2.5.

Os efeitos de variação da capacitância C_N são também mostrados nas figs. 2.4. e 2.5. A distribuição inicial mostra valores ligeiramente mais elevados para $C_N = 1667$ do que para $C_N = 2.000$. Consequentemente, a redução na capacitância terminal do neutro C_N de 16,65% com α e C constantes produz um ligeiro aumento na distribuição inicial $e(x,0)$.

2.4. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL DEVIDO ÀS DESCARGAS PARCIAIS

Considera-se agora um impulso de corrente injetado em $x = y$, devido a uma descarga parcial nesse local, como vem in-

dicado na fig. 2.6. Em $t = 0$, uma distribuição de tensão capacitiva será estabelecida, como mostra a fig. 2.7a. O enrolamento pode ser considerado em duas seções (fig. 2.7b).

Para $0 \leq x \leq y$, pode ser mostrado que

$$V_R(x) = V_y \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha_N x + C_N \sinh \alpha_N x}{\sqrt{CK} \cosh \alpha_N + C_N \sinh \alpha_N} \dots (2.5).$$

Para $y \leq x \leq 1$, temos

$$V_L(x) = V_y \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha_L (1-x) + C_L \sinh \alpha_L (1-x)}{\sqrt{CK} \cosh \alpha_L + C_L \sinh \alpha_L} \dots 2.6$$

Nas equações acima,

$$\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}} \text{ para o enrolamento total, e}$$

segue que:

$$\alpha_N = \sqrt{\frac{C_y}{(K/y)}} = y\alpha$$

$$\alpha_L = \sqrt{\frac{C_{(1-y)}}{K/(1-y)}} = (1-y)\alpha$$

Portanto,
$$V_R(x,y) = \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha x + C_N \sinh \alpha x}{\sqrt{CK} \cosh \alpha y + C_N \sinh \alpha y} \cdot V_y$$

e em $x = 0$

$$V_N = \frac{\sqrt{CK}}{\sqrt{CK} \cosh \alpha y + C_N \sinh \alpha y} \cdot V_y$$

Igualmente,

$$V_L(x,y) = \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha (1-x)y + C_L \sinh \alpha (1-x)y}{\sqrt{CK} \cosh \alpha (1-y) + C_L \sinh \alpha (1-y)} \cdot V_y$$

E em $x = 1$

$$V_{HV} = \frac{\sqrt{CK}}{\sqrt{CK} \cosh \alpha (1-y) + C_L \sinh \alpha (1-y)} \cdot V_y$$

Finalmente, a razão das tensões transmitidas capacitivamente é dada por:

$$K(Y) = \frac{V_{HV}}{V_N} = \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha y + C_N \sinh \alpha y}{\sqrt{CK} \cosh \alpha (1-y) + C_L \sinh \alpha (1-y)} \dots (2.7)$$

Essa razão é puramente uma função de y , e pode ser usada como um parâmetro de localização. As curvas teóricas destes parâmetros, para enrolamentos de transformadores com diferentes valores do fator de atenuação e da capacitância C , são mostrados na figs. 2.8. Para valores constantes $C = 500, 1000, 1500$, $\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$, as curvas teóricas indicam uma baixa ta

xa de crescimento na razão de tensão capacitiva V_{HV}/V_N para baixo valor de $\alpha = 1$, aumentando a taxa de crescimento com o aumento do valor de α . Quando uma descarga ocorre no terminal HV para um valor de $C=500$, a razão (V_{HV}/V_N) dá um mínimo de 5,46 para $\alpha = 1$, e um máximo de 1.370 para $\alpha = 5$.

Ainda com referência às figs. 2.8, as curvas teóricas demonstram que a taxa de crescimento da razão capacitiva V_{HV}/V_N é mais lenta para valores mais elevados de C e da capacitância-série total K para um mesmo valor de atenuação. Consideramos como exemplo um fator de atenuação para $\alpha = 2$. Para esse valor de α ,

$$C = 500\text{pF}, K = 125\text{pF}$$

a razão V_{HV}/V_N , quando as descargas ocorrem no terminal HV, dá um valor máximo de 27,93 e um valor mínimo de 16,47, para $C = 1.800$ e $K = 450$.

Dos resultados supra-apresentados, que estão de acordo com as curvas das figs. 2.8, e considerando-se que a distribuição inicial de tensão depende do valor α , podemos concluir que a localização da fonte de descargas baseada na transferência capacitiva é mais indicada para enrolamento de transformador que tenha baixo fator de atenuação ($\alpha \leq 5$).

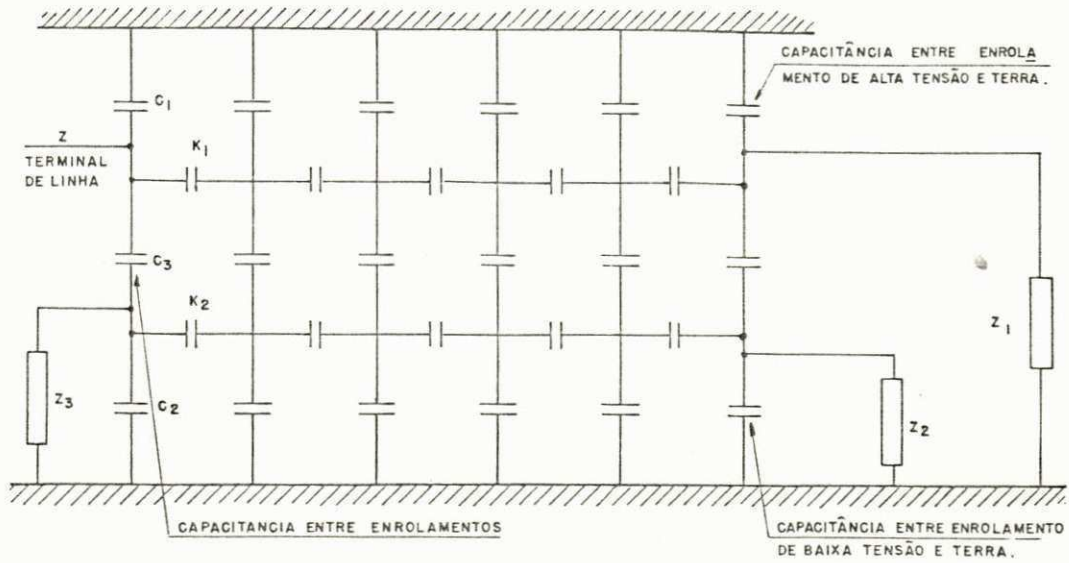


FIG. 2.1 - REDE CAPACITIVA SIMPLIFICADA DE UM TRANSFORMADOR COM DOIS ENROLAMENTOS.

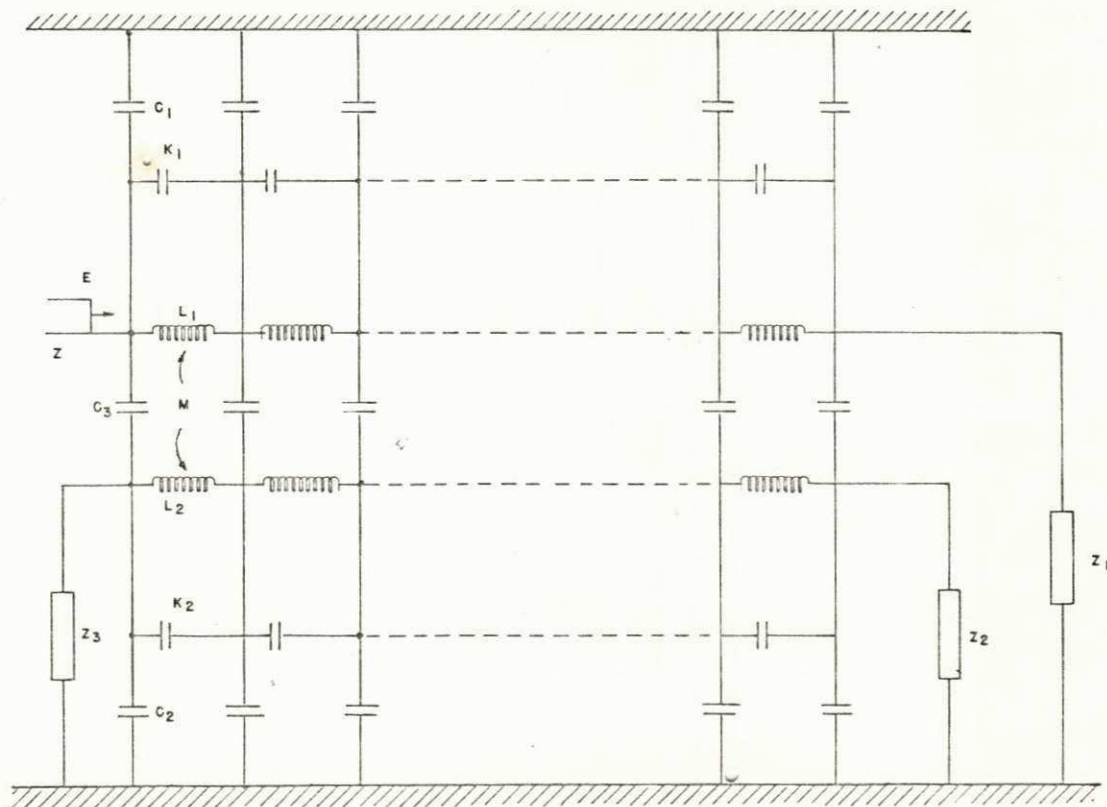
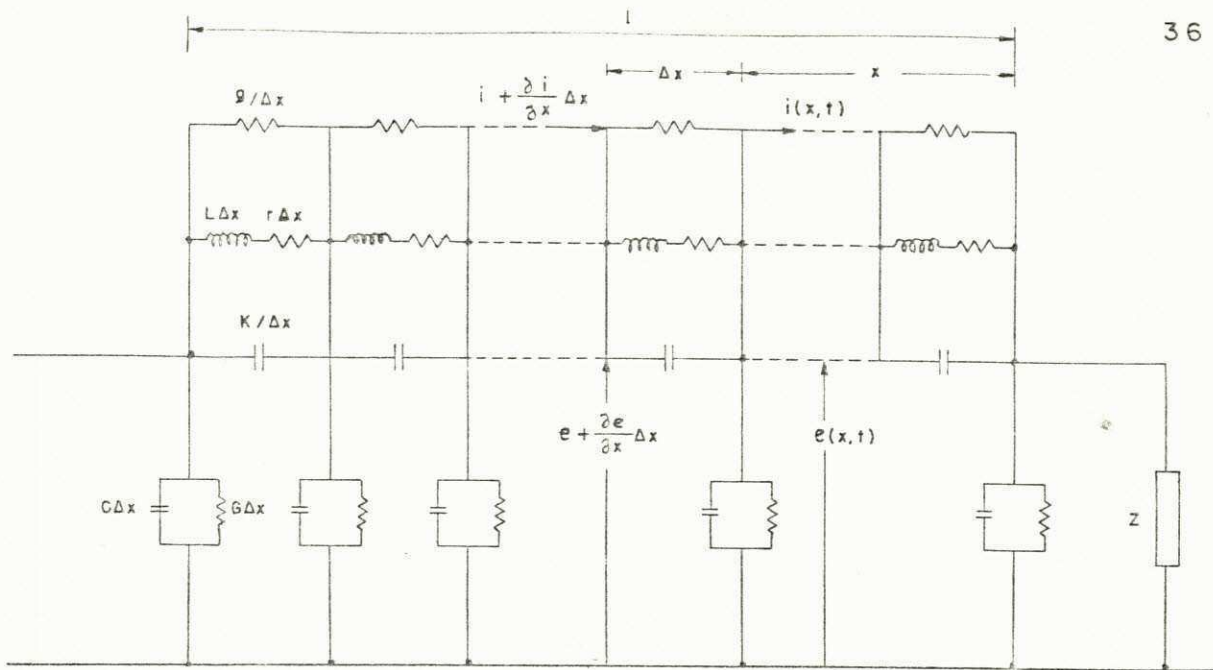
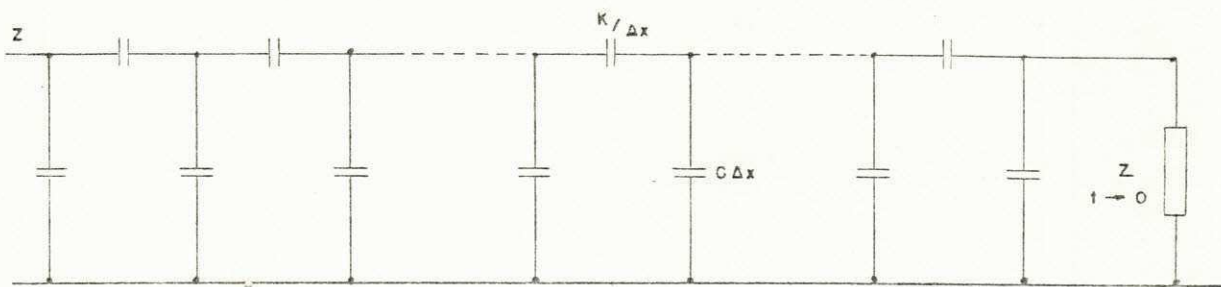


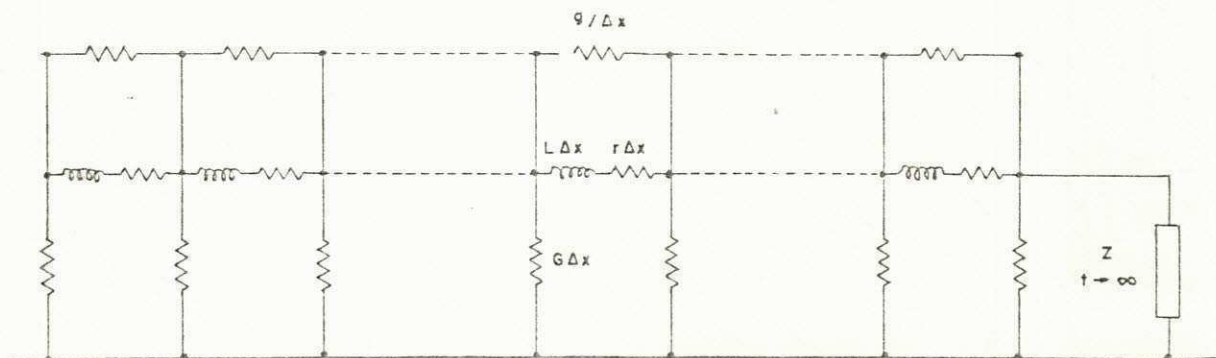
FIG. 2.2 - CIRCUITO COMPLETO IDEALIZADO DE UM TRANSFORMADOR COM DOIS ENROLAMENTOS PARA TRANSITÓRIOS DE ALTA FREQUÊNCIA.



a) CIRCUITO EQUIVALENTE COMPLETO



b) CIRCUITO EQUIVALENTE PARA CONDIÇÕES INICIAIS



c) CIRCUITO EQUIVALENTE PARA CONDIÇÕES FINAIS

FIG. 2.3 - CIRCUITO IDEAL COMPLETO PARA UM ENROLAMENTO.

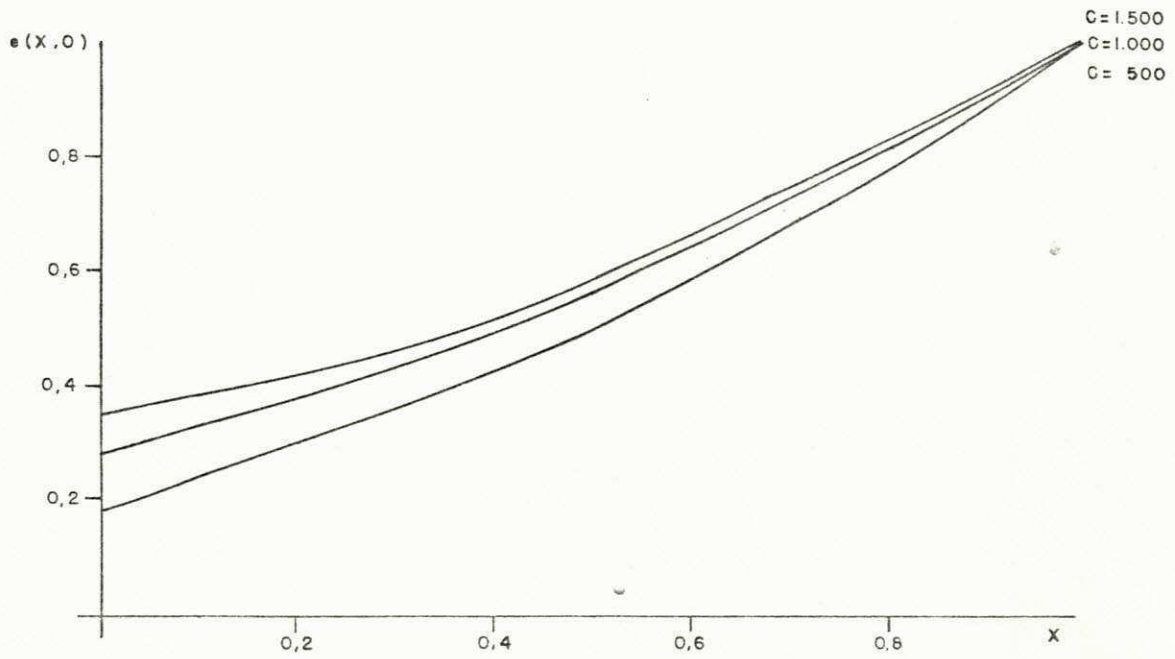


FIG. 2.4.a - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(X,0)$.
 $C_N = 1.667$ $\alpha = 1.$

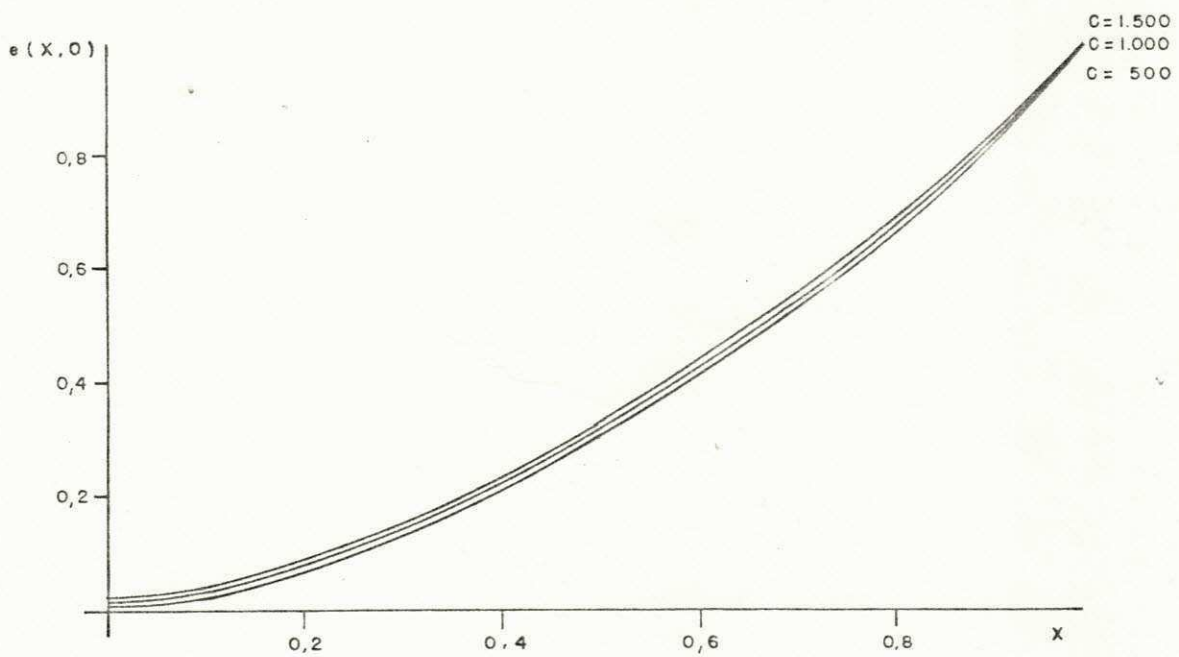


FIG. 2.4.b - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(X,0)$.
 $C_N = 1.667$ $\alpha = 2.$

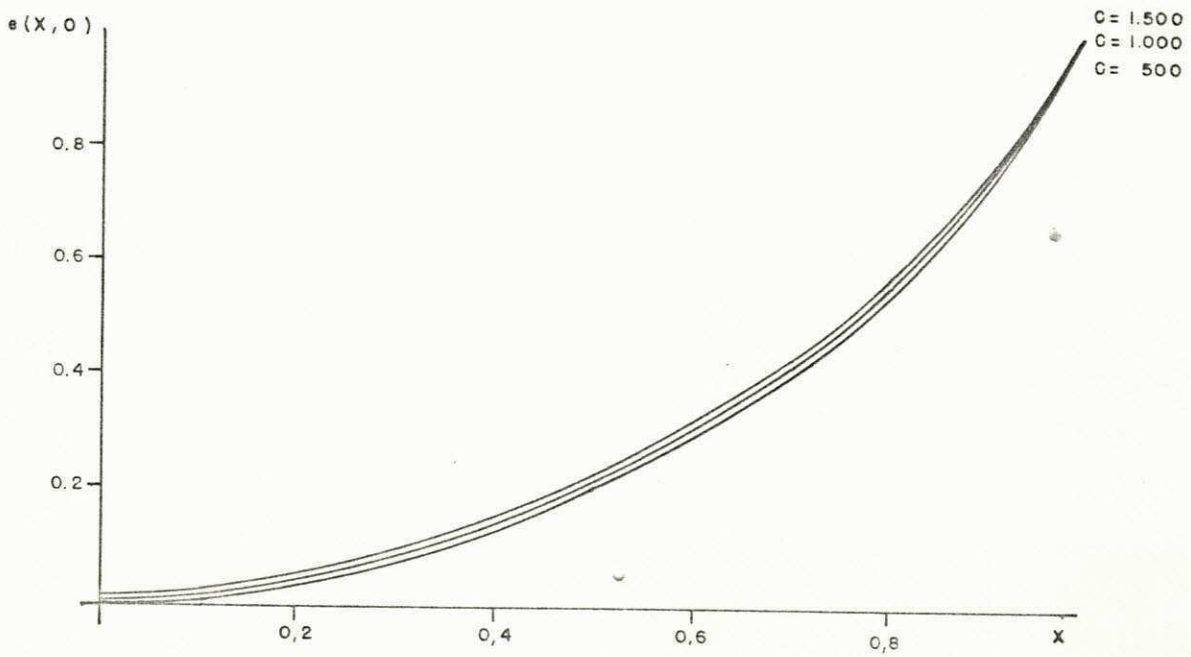


FIG. 2.4.c - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(X,0)$.
 $C_N = 1.667$ $\alpha = 3$.

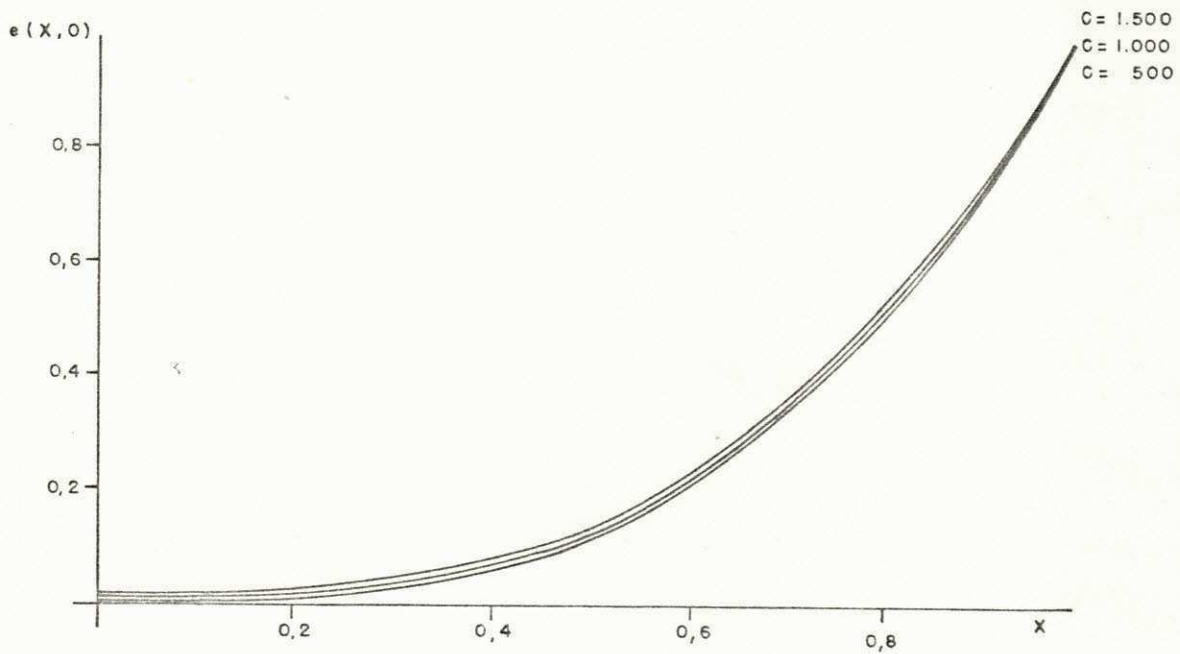


FIG. 2.4.d - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(X,0)$.
 $C_N = 1.667$ $\alpha = 4$.

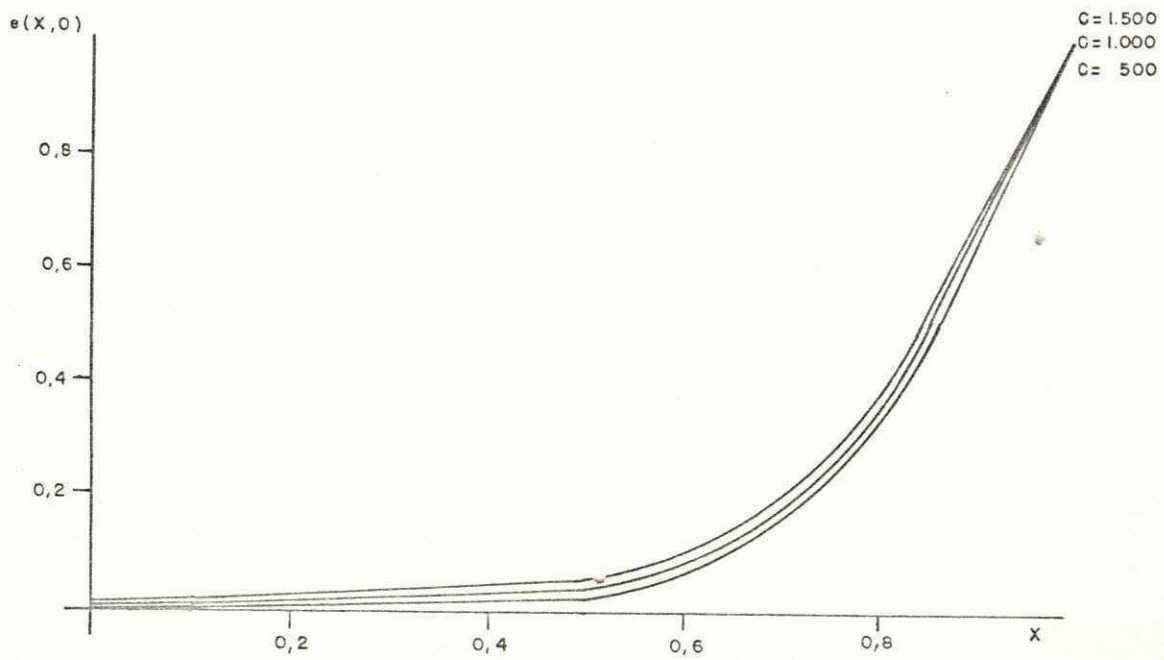


FIG. 2.4.e - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(x,0)$.

$$C_N = 1.667$$

$$\alpha = 5$$

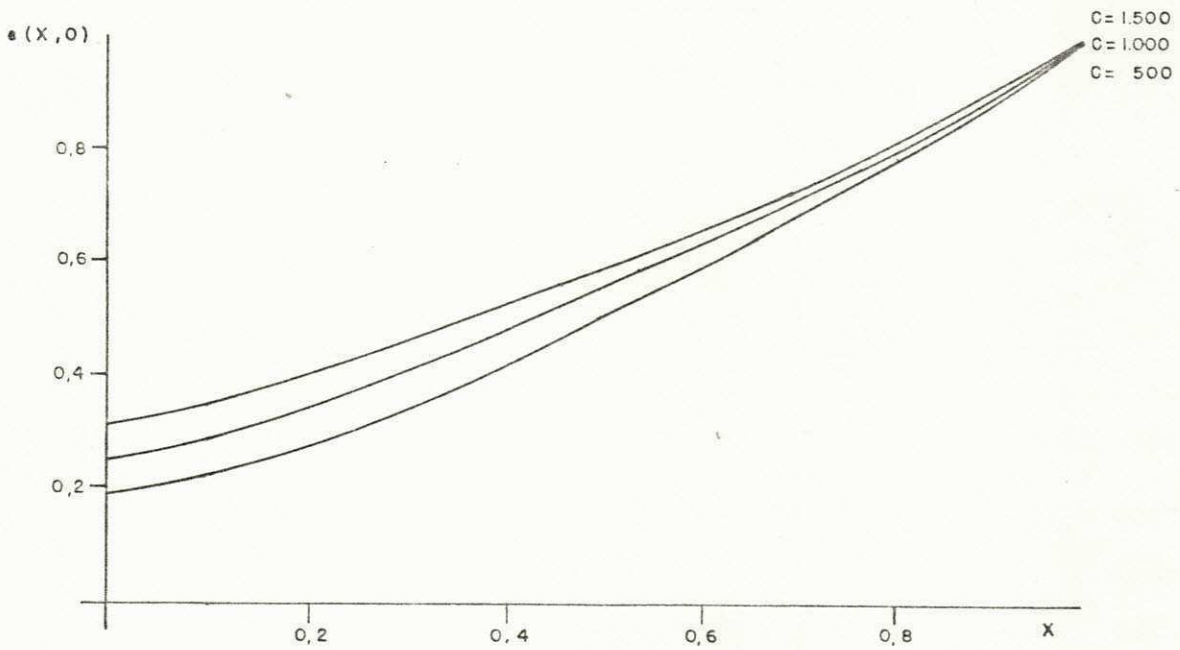


FIG. 2.5.a - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(x,0)$.

$$C_N = 2.000$$

$$\alpha = 1$$

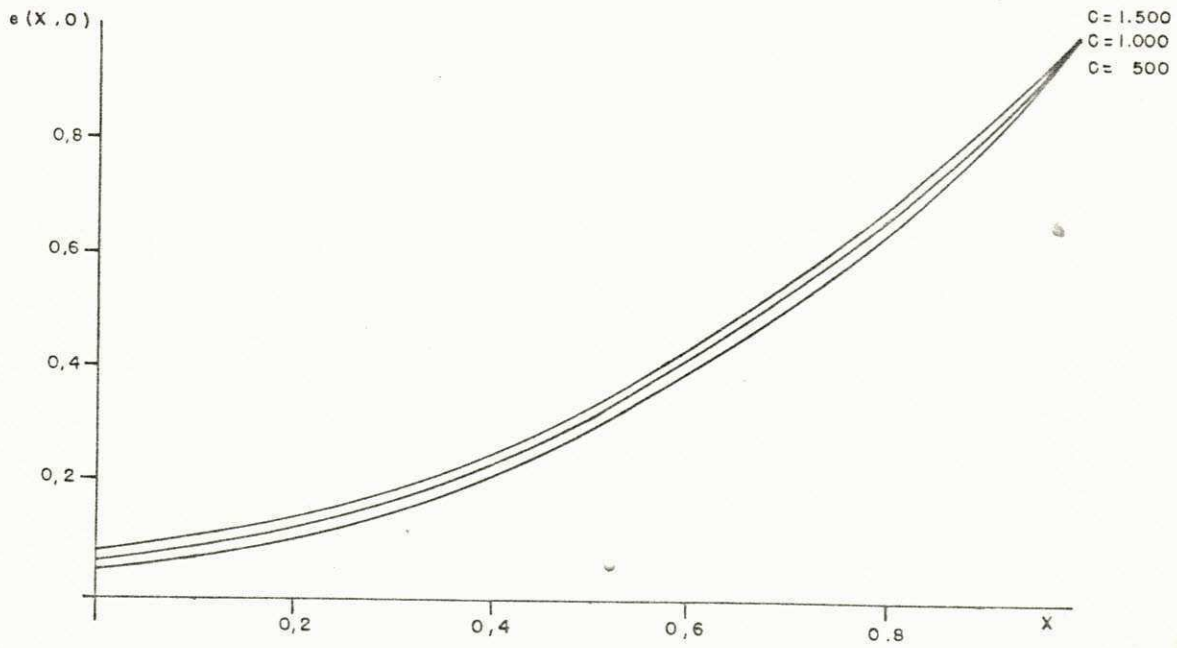


FIG. 2.5. b - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(x,0)$.
 $C_N = 2.000$ $\alpha = 2$.

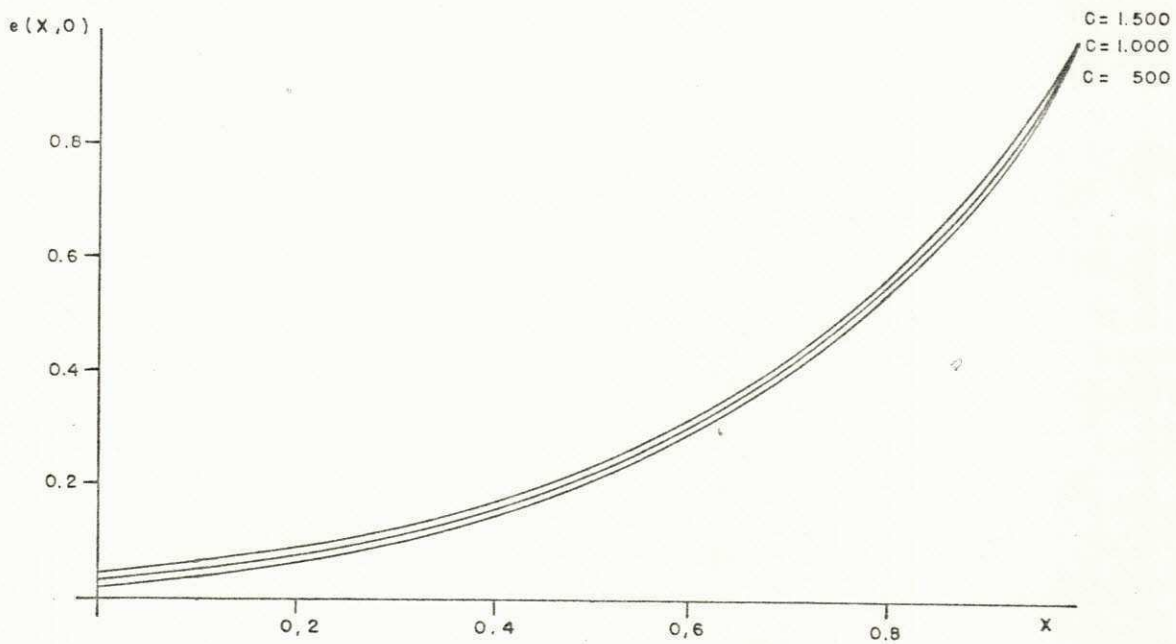


FIG. 2.5. c - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(x,0)$.
 $C_N = 2.000$ $\alpha = 3$.

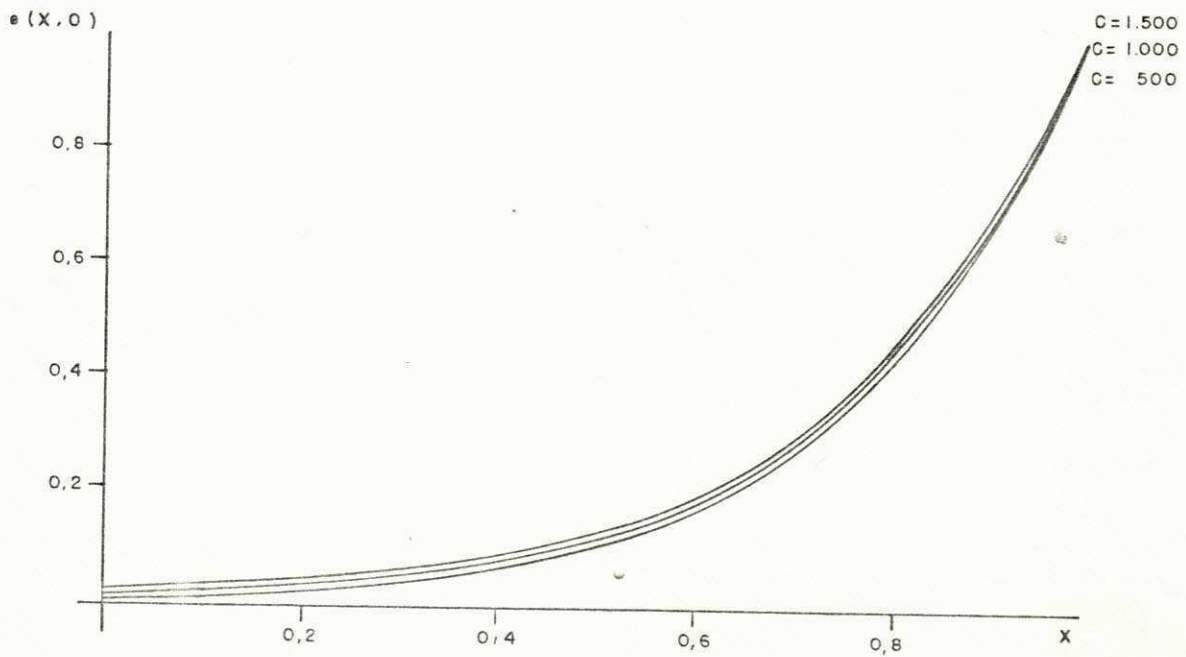


FIG. 2.5.d - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(x,0)$.
 $C_N = 2.000$ $\alpha = 4$.

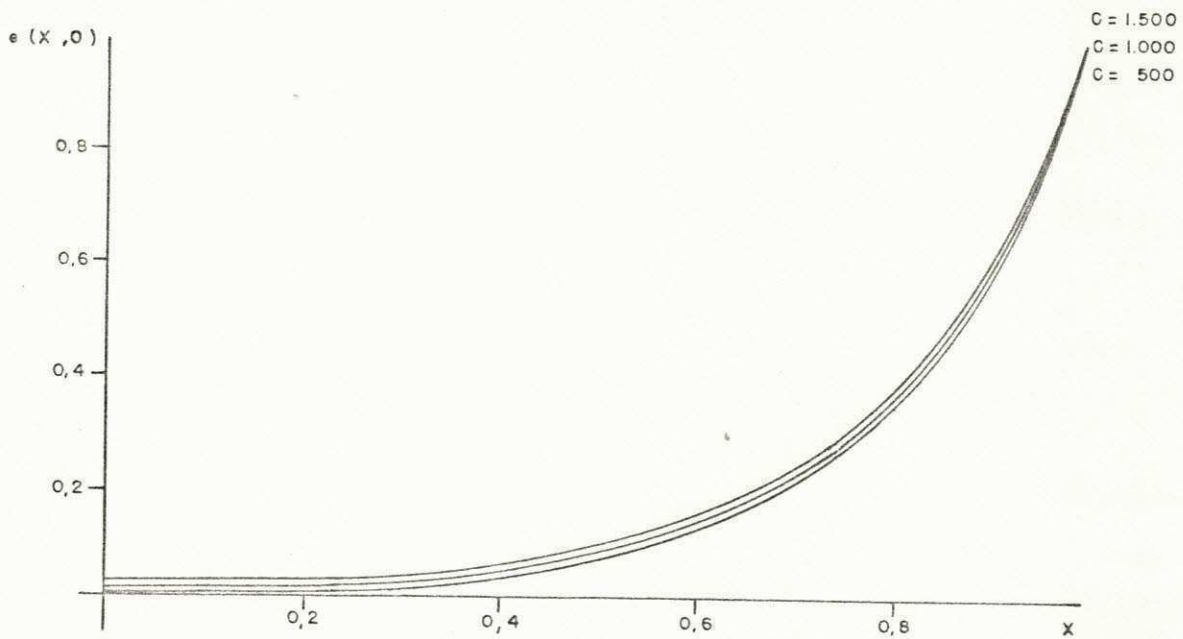


FIG. 2.5.e - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO INICIAL $e(x,0)$.
 $C_N = 2.000$ $\alpha = 5$.

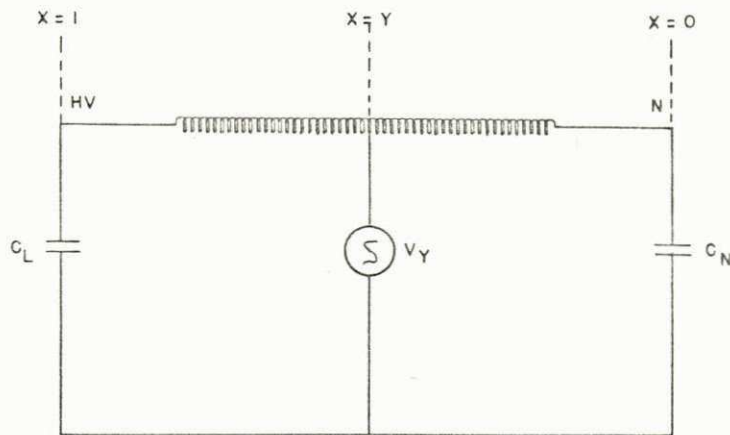


FIG. 2.6 - CIRCUITO SIMPLIFICADO DO ENROLAMENTO DE TRANSFORMADOR, COM IMPULSO DE CORRENTE INJETADO EM Y.

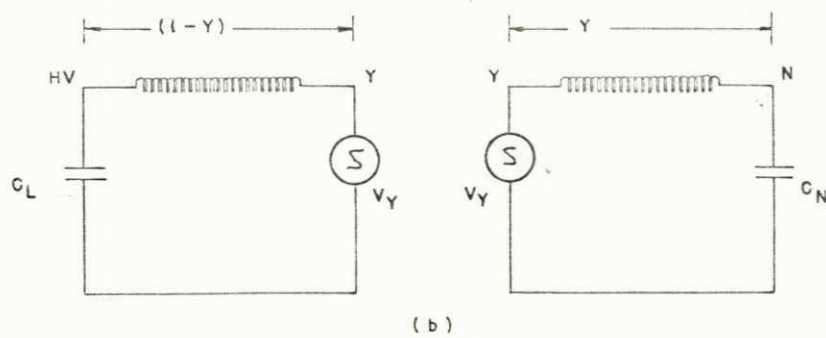
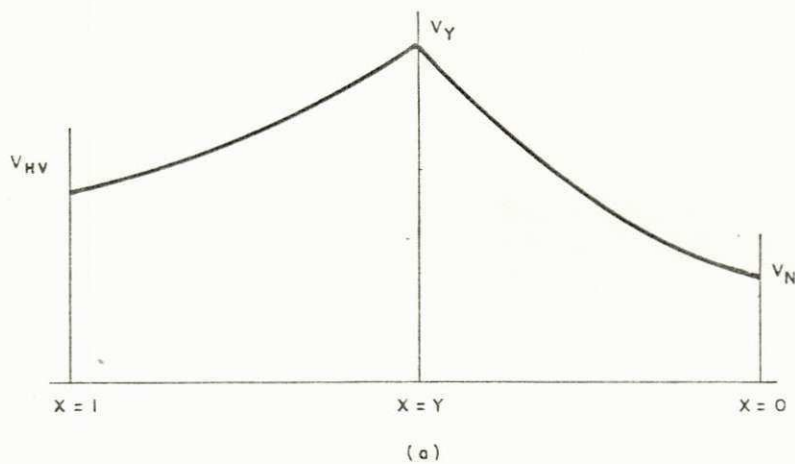


FIG. 2.7 - a) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO CAPACITIVA AO LONGO DO ENROLAMENTO DE TRANSFORMADOR.

b) ENROLAMENTO SECIONADO EM DUAS PARTES.

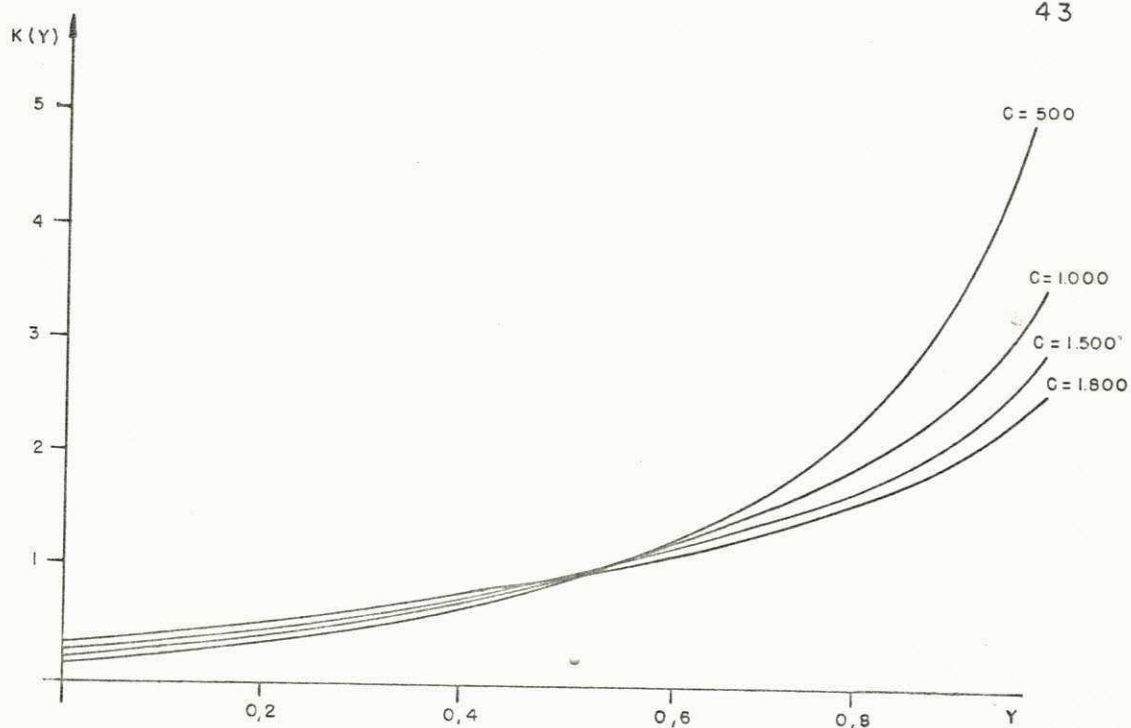


FIG. 2.8.a - VARIAÇÃO DA FUNÇÃO CAPACITIVA TEÓRICA $K(Y)$.
 $C_N = 1.667$ $C_L = 2.000$ $\alpha = 1$.

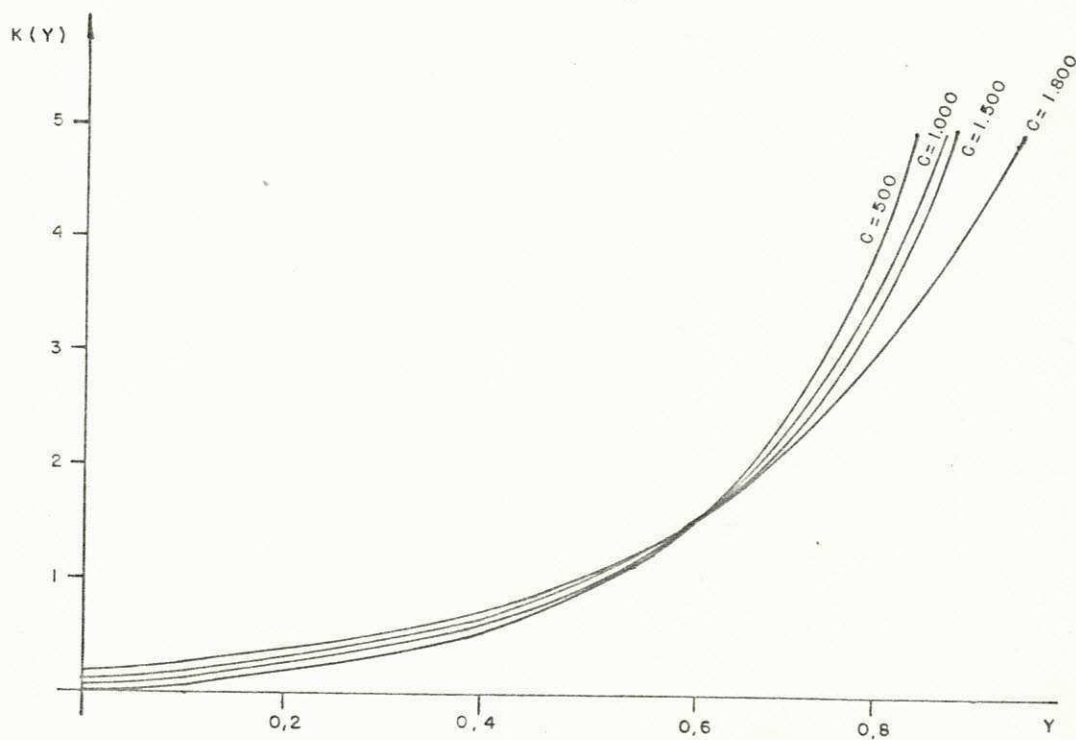


FIG. 2.8.b - VARIAÇÃO DA FUNÇÃO CAPACITIVA TEÓRICA $K(Y)$.
 $C_N = 1.667$ $C_L = 2.000$ $\alpha = 2$.

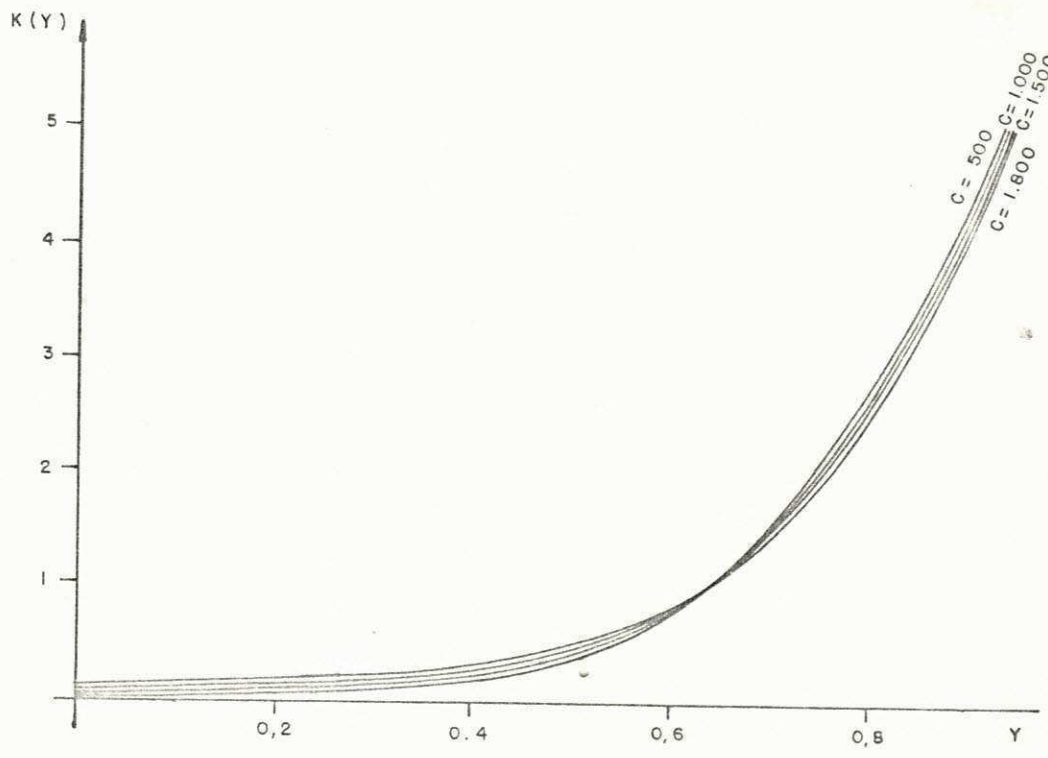


FIG. 2.8. c - VARIAÇÃO DA FUNÇÃO CAPACITIVA TEÓRICA $K(Y)$.
 $C_N = 1.667$ $C_L = 2.000$ $Q = 3$.

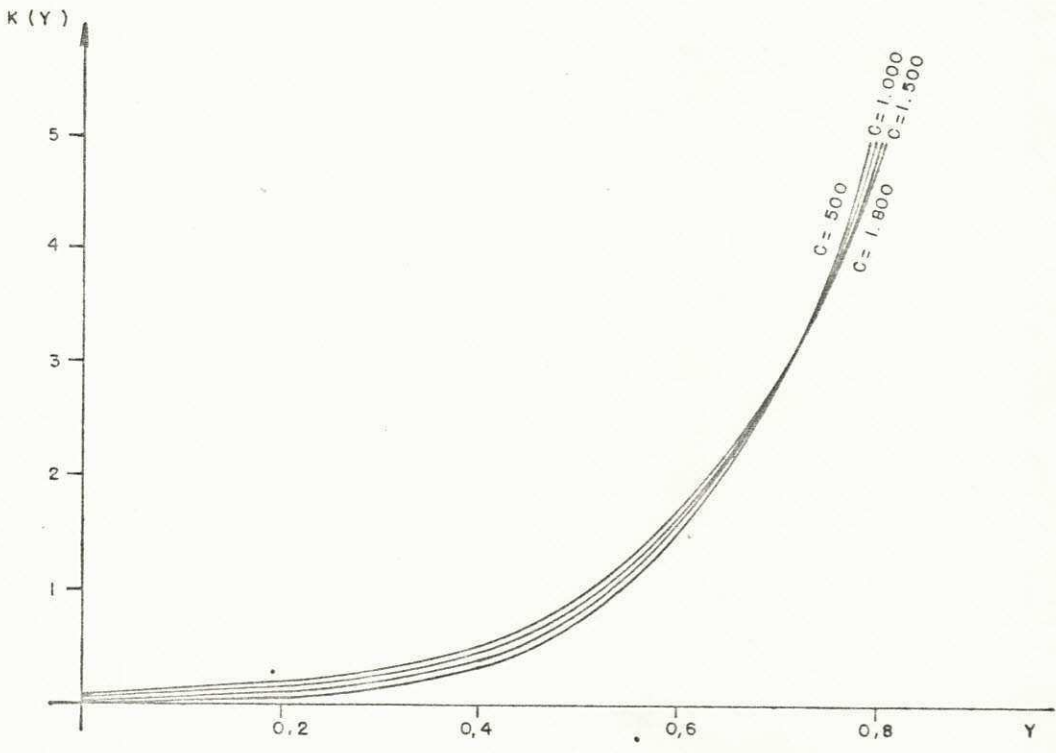


FIG. 2.8. d - VARIAÇÃO DA FUNÇÃO CAPACITIVA TEÓRICA $K(Y)$.
 $C_N = 1.667$ $C_L = 2.000$ $Q = 4$.

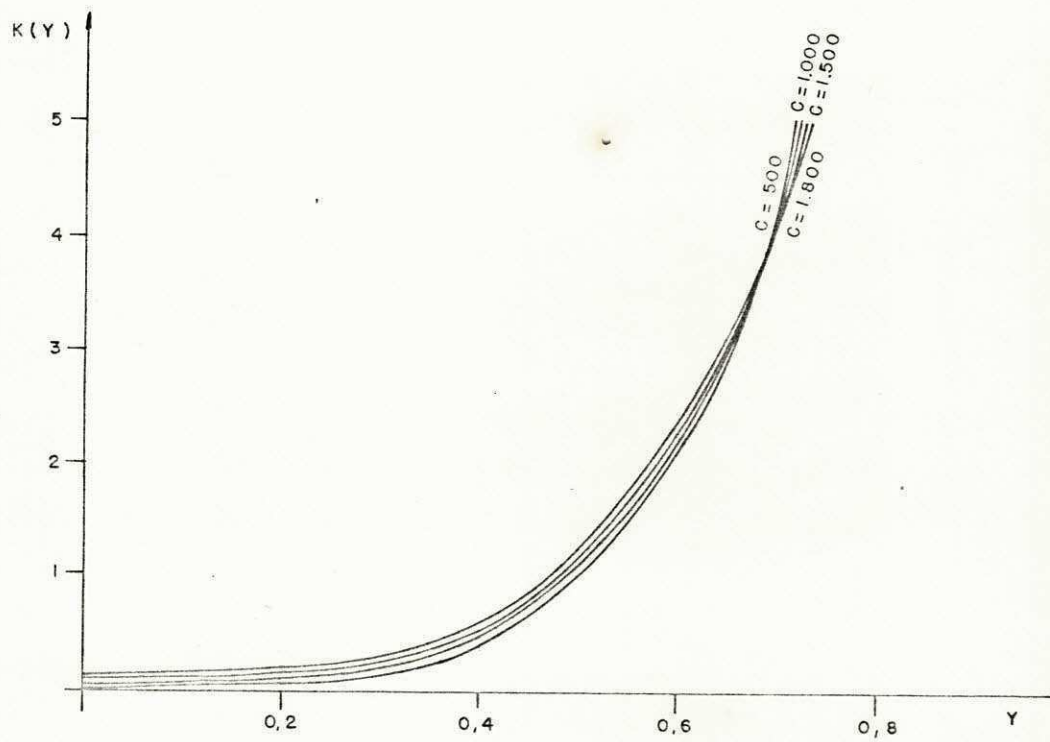


FIG. 2.8.e - VARIACÃO DA FUNÇÃO CAPACITIVA TEÓRICA $K(Y)$.

$$C_N = 1.667$$

$$C_L = 2.000$$

$$\alpha = 5.$$

CAPÍTULO III

MÉTODOS ELÉTRICOS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

3.1. INTRODUÇÃO

Em princípio, uma descarga em um enrolamento dá origem a pulsos de tensão que podem ser medidos nos terminais do enrolamento. Esses pulsos são causados pela transmissão capacitiva, onda viajante e oscilações de baixa frequência e apresentam formas de ondas que são fundamentos básicos das técnicas de localização de descargas parciais. O pulso transmitido capacitivamente tem uma forma de onda representada pela fig. 3.1.a. A fig. 3.1.b apresenta a forma de onda do pulso de onda viajante. As oscilações de baixa frequência são representadas pela forma de onda da fig. 3.1.c. A superposição desses pulsos dá a forma de onda característica dos pulsos de tensão nos terminais do enrolamento, gerada por uma descarga (fig. 3.1.d).

Diversos métodos elétricos foram desenvolvidos, através dos quais as descargas parciais nos enrolamentos de um transformador podem ser detectadas e localizadas com adequada sensibilidade. Esses métodos são utilizados mais adequadamente, dependendo do tipo do enrolamento, que pode ter alto ou baixo fator de atenuação, agindo, conseqüentemente como uma linha de transmissão ou como uma rede capacitiva, respectivamente. Neste capítulo, serão apresentados os métodos elétricos mais usados de localização de descargas parciais.

3.2. MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA CAPACITIVA

Para um enrolamento, com baixo fator de atenuação α , portanto com alto valor, para a capacitância série K , as oscilações dependerão dos parâmetros e das condições terminais de cada enrolamento do transformador. Nesse caso, o enrolamento age como se fosse uma rede capacitiva progressiva, para pulsos de rápido tempo de crescimento, e uma instantânea distribuição de tensão inicial é estabelecida, conforme curva de distribuição representada na fig. 3.2. Esse enrolamento, embora não seja representado por uma rede capacitiva linear, será representado como tal, de modo que os esforços de tensão possam ser representados para cada ponto do enrolamento.

A amplitude do pulso de tensão, gerada no enrolamento por uma descarga, cuja forma de onda característica é representada pela fig. 3.1.a e transmitida instantaneamente para ambos os terminais do enrolamento, através de capacitâncias série relativamente altas, e atenuada conforme a distância da origem da descarga aos terminais do enrolamento. Essa atenuação é determinada pela calibração para diferentes pontos de cada enrolamento e pela injeção de pulsos, que apresentam a mesma forma de onda característica das descargas. Entretanto, as relações entre as amplitudes dos pulsos que atingem os terminais do enrolamento dependem unicamente da localização da fonte de descarga na rede capacitiva progressiva, não dependendo, portanto, da grandeza da descarga.

A localização de descargas parciais pelo método de transferência capacitiva se baseia na razão de tensão capacitiva, definida pela equação:

$$\frac{V_{HV}}{V_N} = \frac{\sqrt{CK} \cosh \alpha y + C_N \sinh \alpha y}{\sqrt{CK} \cosh \alpha (1-y) + C_L \sinh \alpha (1-y)} \quad (3.1)$$

correspondente à equação 2.7 do capítulo II.

A medição da tensão transferida capacitivamente é feita para cada terminal do enrolamento, e a razão, relacionada para a equação acima, dando uma estimativa da posição do local de descarga no enrolamento. As figs. 2.8 (pags. 43, 44, 45) mostram as curvas teóricas da razão de tensão, em função do comprimento do enrolamento e do fator de atenuação. A razão logarítmica ($\log V_{HV}/V_N$), onde V_{HV} e V_N são as tensões lidas nos terminais, pode também ser utilizada como um parâmetro de localização. A fig. 3.3 dá as curvas de calibração teóricas da razão logarítmica, plotadas em função do comprimento percentual do enrolamento e do fator de atenuação. Segundo Austin⁽⁶⁾ o gráfico da fig. 3.3 dará uma curva em linha reta, se os valores das capacitâncias terminais forem iguais à capacitância eficaz do enrolamento. Entretanto, se o enrolamento, com alto fator de atenuação, for representado por uma rede capacitiva progressiva e a grandeza do pulso transferido capacitivamente for medida para cada terminal, devido à maior inclinação da curva logarítmica, a estimativa da posição do local de descarga obtida seria mais exata do que

para enrolamentos com baixo fator de atenuação, sob as mesmas condições⁽⁶⁾. Nesse caso, somente grandes descargas podem ser medidas com relativa precisão.

Em geral o método de transferência capacitiva é utilizado para enrolamentos com baixo fator de atenuação, considerando-se os parâmetros que limitam o uso da transferência capacitiva e que são dados por:

- a - Baixa sensibilidade;
- b - Alteração na representação da rede capacitiva, quando a capacitância-série é baixa devido a capacitância parasítica;
- c - Presença de grandes componentes de ondas viajantes, que interferirão na onda de tensão transferida capacitivamente, se esta for teoricamente detetável.

3.3. MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES

Os pulsos de ondas eletromagnéticas, originados de descargas parciais, se deslocam com velocidades finita, ao longo de um enrolamento de transformador, partindo do ponto de origem da descarga para o terminal do enrolamento, onde causam quedas de tensão. Esses pulsos (fig. 3.4) são os fundamentos nos quais se baseia o método de ondas viajantes. É possível medir a diferença de tempo de chegada das ondas viajantes nos terminais do enrolamento e usar essa diferença de tempo, como um parâmetro de localização. Os pulsos que atin

gem os terminais do enrolamento podem ser fotografados, e a diferença de tempo entre as ondas viajantes podem ser estimada visualmente.

A fig.3.4 mostra dois oscilogramas de Thoeng⁽⁷⁾ nos quais a linha horizontal representa o eixo dos tempos, e a linha vertical o eixo das amplitudes em volts. O oscilograma nº 1 apresenta dois pulsos de descarga; o pulso superior atinge um terminal do enrolamento, enquanto o pulso inferior atinge o outro terminal. Neste caso, não existe tempo "delay" e, por consequência, a fonte de descarga se localiza no centro do enrolamento. No oscilograma nº 2, o pulso superior atinge um terminal do enrolamento em um tempo menor do que o tempo decorrido para o pulso inferior atingir o outro terminal. Como o tempo de propagação, ao longo do enrolamento, é linear em relação ao tamanho desse enrolamento, a fonte de descarga está mais próxima do terminal correspondente ao pulso superior e, assim, mais distante do terminal que corresponde ao pulso inferior.

Esse método é aplicado adequadamente para enrolamentos com alto fator de atenuação, nos quais os valores das capacitâncias-séries são pequenos, e uma rede indutiva capacitiva, representando uma linha de transmissão, produz efeitos de ondas viajantes. Nesse caso, os pulsos de ondas viajantes atingem os terminais do enrolamento em um tempo Δt , depois dos pulsos iniciais transmitidos capacitivamente.

Dificuldades quando da utilização desse método podem a parecer, devido à distorção das ondas nos terminais do enrolamento, principalmente para enrolamentos com alta capacitância-série, em que os tempos de propagação das ondas são muito curtos, e suas amplitudes, muito pequenas. A sua confiabilidade depende de isolar, tanto quanto possível, os pulsos de ondas viajantes de outros pulsos originados pelas descargas.

3.4. MÉTODO DE ANÁLISE DA FORMA DE ONDA

Este método se baseia na análise das características das formas de ondas que são detetadas nos terminais dos enrolamentos de transformador. A localização da fonte de descarga é feita pelo reconhecimento da forma de pulso única para cada posição de origem da descarga.

Quando um sinal de calibração é movido continuamente ao longo do enrolamento, é evidente que, embora o sinal da onda viajante não seja muito bem distinguido, a forma de onda do sinal varia a cada instante. Cada forma de onda do sinal é, por conseguinte, relacionada com uma descarga gerada para cada ponto do enrolamento. Com a calibração do enrolamento com um gerador de sinal, injetando sinais para diferentes pontos do enrolamento, um conjunto de oscilogramas pode ser tomado para posterior comparação. A fig. 3.5 mostra oscilogramas de Haraldsen⁽⁷⁾. A curva superior de cada oscilograma é medida no terminal de alta tensão do enrolamento de transformador, e a curva inferior, no terminal de baixa tensão. As letras mostram as posições das fontes de descargas.

Nessas calibrações, é de importância fundamental que os enrolamentos sejam calibrados sob condições idênticas àquelas que estariam presentes durante os ensaios.

Uma função-correlação pode ser utilizada para determinar o local da descarga, usando-se o coeficiente de "cross" correlação entre duas funções $f_1(t)$ e $f_2(t)$, definido por:

$$\phi_{1,2} = 1/T \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t) dt.$$

Este parâmetro de comparação é independente da grandeza dos pulsos, podendo os pulsos de calibração serem diferentes dos pulsos de descarga real. Assim, injetando-se pulsos de calibração nos pontos A, B, C e D de um enrolamento (Fig.3.6) e considerando-se uma descarga real em um ponto R qualquer deste mesmo enrolamento, os coeficientes de "cross"-correlação serão dados por:

$$\begin{aligned} \phi_{11} &= 1/T \int_0^T f_{AH}(t) \cdot f_{RH}(t) dt \\ \phi_{12} &= 1/T \int_0^T f_{BH}(t) \cdot f_{RH}(t) dt \\ \phi_{13} &= 1/T \int_0^T f_{CH}(t) \cdot f_{RH}(t) dt \\ \phi_{14} &= 1/T \int_0^T f_{DH}(t) \cdot f_{RH}(t) dt \end{aligned} \left. \begin{array}{l}) \\) \\) \\) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{em relação ao terminal} \\ H, \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_{21} &= 1/T \int_0^T f_{AX}(t) \cdot f_{RX}(t) dt \\
 \phi_{22} &= 1/T \int_0^T f_{BX}(t) \cdot f_{RX}(t) dt \\
 \phi_{23} &= 1/T \int_0^T f_{CX}(t) \cdot f_{RX}(t) dt \\
 \phi_{24} &= 1/T \int_0^T f_{DX}(t) \cdot f_{RX}(t) dt
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l}) \\) \\) \\) \\) \\) \\) \\) \end{array} \right) \text{ em relação ao terminal x,}$$

onde:

f_{AH} , f_{BH} , f_{CH} , f_{DH} , f_{AX} , f_{BX} , f_{CX} e f_{DX} são funções de calibração e

f_{RH} e f_{RX} são funções da descarga real.

Assim as diversas formas de ondas de calibração foram correlacionadas com a forma de onda da descarga real. O mais alto coeficiente de correlação em relação ao terminal H, determina o local da descarga. O mesmo procedimento pode ser feito com as funções de calibração f_{AX} , f_{BX} , e a fun-

ção f_{RX} . Neste caso, o mais alto coeficiente de correlação com respeito ao terminal X, também determina o local da descarga. Esse local deve conferir com o local obtido no coeficiente de correlação em relação ao terminal H (caso anterior).

A natureza única dos pulsos medidos nos terminais dos enrolamentos foi também investigada por Austin⁽⁶⁾, para comprovar que as formas de ondas dos pulsos podem ser identificadas individualmente. Os resultados dessa análise demonstraram que o reconhecimento das formas de onda é um método adequado para localização de descargas, tanto para enrolamentos de disco, como para enrolamentos interligados.

3.5. MÉTODO DE ANÁLISE DO ESPECTRO DE RÁDIO-FREQÜÊNCIA

Devido ao extenso uso de detetores RIV para medição de descargas em transformadores, pareceria lógico desenvolver um método de localização, o qual é baseado em detetores RIV. O método sugerido por Harrold e Sletton^(9,10) é baseado na representação de um enrolamento de transformador como uma linha de transmissão numa faixa de freqüência de 100 KHz a 1,2 MHz.

O modelo simplificado de uma descarga parcial no isolamento do enrolamento de um transformador \bar{e} mostrado na fig. 3.7, onde o enrolamento \bar{e} mostrado como uma linha de transmissão uniforme com impedância Z_0 . Uma fonte de corrente representando as descargas parciais \bar{e} localizada a uma distância ℓ do ponto H. A linha termina em duas impedâncias, Z_H e Z_X . Quando $Z_H = Z_X = Z_0$, a corrente I_G se divide igualmente, e:

$$I_H = \frac{I_G}{2} \cdot e^{-\alpha \ell} \quad \dots (3.1)$$

$$I_X = \frac{I_G}{2} \cdot e^{-\alpha (L - \ell)} \quad \dots (3.2),$$

onde α \bar{e} a constante de atenuação. Destas relações, obtemos:

$$\ell \ln \left(\frac{I_H}{I_X} \right) = \alpha (L - 2\ell) \quad \dots (3.3).$$

Se α \bar{e} conhecido e \bar{e} independente da frequência, então a equação 3.3 dá a posição da falta diretamente pela medição de I_H e I_X .

Normalmente, o enrolamento não \bar{e} uniforme ao final, em virtude do que ocorrem reflexões. Nesse caso, temos:

$$I_H = K_H \cdot \frac{I_G}{2} e^{-\alpha L} \quad \dots (3.4)$$

$$I_X = K_X \cdot \frac{I_G}{2} e^{-\alpha (L - \ell)} \quad \dots (3.5),$$

e os fatores K_H e K_X levam em conta as reflexões. Isto ainda supõe que a corrente I_G se divide igualmente, ou seja, o local da descarga parcial não está muito próxima do terminal. Das equações 3.4 e 3.5, obtemos:

$$\ell_n \left(\frac{I_H}{I_X} \right) = \ell_n \frac{K_H}{K_X} + \alpha (L - 2\ell) \quad (3.6).$$

Novamente, se K_H e K_X são calculados ou medidos para uma frequência \bar{e} possível localizar-se a falta.

Quando as correntes I_{GX} e I_{GH} não são iguais, Harrold e Sletton mostram que sobre a faixa de frequência w_0 para w_1 , onde $\Delta w = w_1 - w_0$,

$$\frac{1}{\Delta w} \int_{w_0}^{w_1} \ell_n \left(\frac{I_H}{I_X} \right) dw = \frac{1}{\Delta w} \int_{w_0}^{w_1} \ell_n \left(\frac{K_H}{K_X} \right) dw + \frac{1}{\Delta w} \int_{w_0}^{w_1} \alpha (L - 2\ell) dw,$$

isto é,

$$\ell_n \frac{I_H}{I_X} = \ell_n \frac{K_H}{K_X} + (L - 2\ell) \cdot \alpha,$$

onde (X) é valor médio de X sobre a largura de faixa de frequência w_0 para w_1 .

Harrold e Sletton sugeriram a escolha de largura de faixa de frequência de 0.15 a 1.2 MHz. Calibração neste inter-

valo de frequências, usando-se o circuito da fig.3.8, darã os valores médios $\lambda_n \frac{K_H}{K_X}$ e α . Tal calibração fornece a curva da fig. 3.9. Obviamente, a calibração é feita com o transformador desenergizado. O transformador é então energizado, e a tensão aumentada lentamente, até que os pulsos de descargas sejam detetados nos terminais. O espectro de frequência para os terminais deve então ser registrado, e o valor médio de $\lambda_n (I_H/I_X)$ é encontrado nas medições. A posição da descarga parcial pode ser determinada usando-se a curva de calibração.

A vantagem desse método é que avaliado logaritmicamente sobre uma faixa de frequências, se reduz erros causados por ressonâncias locais, atenuação de altas frequências e efeitos dos circuitos de medição nos terminais. Tal avaliação deve dar uma precisão de aproximadamente 10%, a qual é comparável com o método da relação de tensão capacitiva de larga faixa.

Quando detetores RIV são usados, o procedimento de calibração é muito demorado e requer delicada sincronização para cada frequência. Esse problema pode ser resolvido, usando-se analisadores de espectro para exibir a faixa de frequências de respostas requerida dos terminais. Outra desvantagem desse método é que a estimativa da posição não pode ser feita, se mais que um local de descarga parcial está presente. O detetor de faixa estreita avaliarã a medida das respostas de diversos locais de descargas.

3.6. CONCLUSÕES

Os métodos elétricos de medição de descargas parciais são utilizados mais adequadamente, dependendo do tipo de enrolamento. Nos enrolamentos com alto fator de atenuação (ou baixa capacitância-série), e equivalentes a uma linha de transmissão uniforme, os métodos usados com maior exatidão são os de ondas viajantes e o de análise de formas de onda. Nos enrolamentos com baixo fator de atenuação (ou alta capacitância série), e equivalentes a uma rede capacitiva progressiva, os métodos mais adequados são os de transferência capacitiva e o do espectro de frequência. Como os ensaios a serem realizados se efetuarão sobre transformadores com enrolamentos com baixo fator de atenuação, os dois últimos métodos são os mais indicados para as medições.

O método do espectro de frequência estabelece a condição de que a grandeza da descarga permaneça constante durante o período de teste. Como a vantagem da estimação do pulso individual requer uma contínua predição da localização, que é dada independentemente do estado não-estacionário de grandeza da descarga, do ponto de vista prático, a razão do pulso transferido capacitivamente será usado em preferência à aproximação do espectro de frequência, com a mesma exatidão e com aumento considerável na rapidez de estimação.

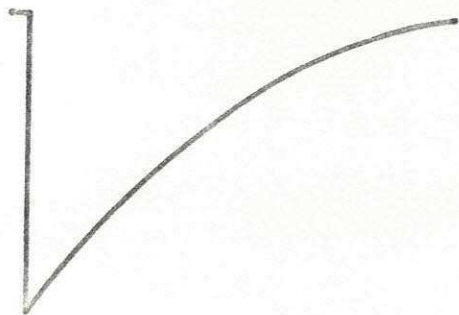


FIG. 3.1.a - PULSO DE TENSÃO TRANSMITIDO CAPACITATIVAMENTE .

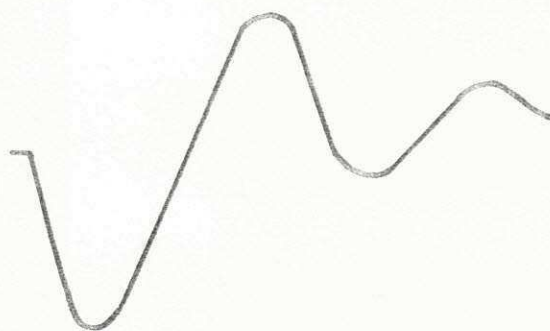


FIG. 3.1.b - PULSO DE TENSÃO DE ONDA VIAJANTE.

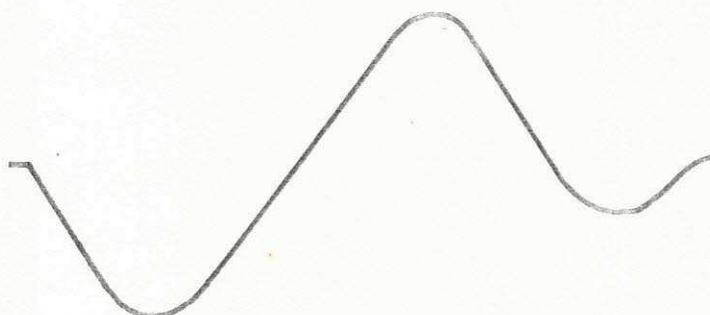


FIG. 3.1.c - OSCILAÇÃO DE BAIXA FREQUENCIA .

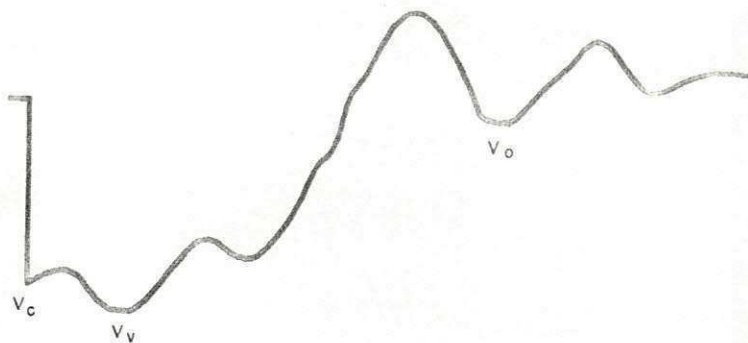


FIG. 3.1.d — FORMA DE ONDA DO PULSO DE TENSÃO GERADO POR UMA DES_CARGA EM UM ENROLAMENTO.

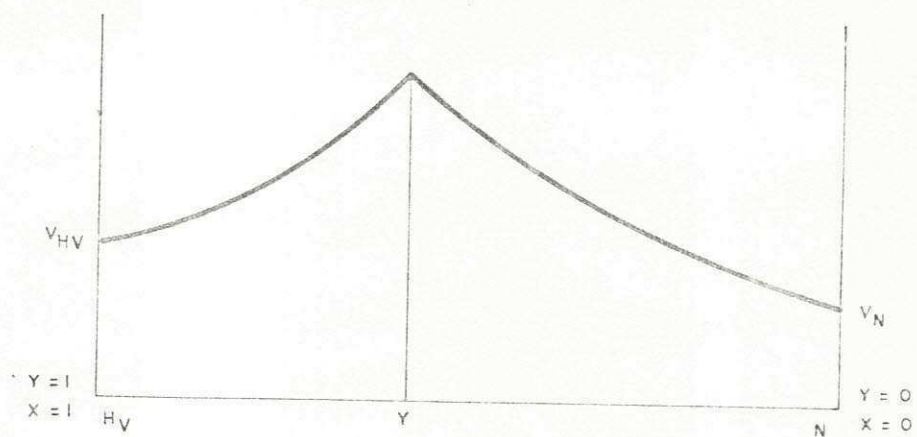


FIG. 3.2 — DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO CAPACITIVA AO LONGO DO ENROLAMENTO DE TRANSFORMADOR.

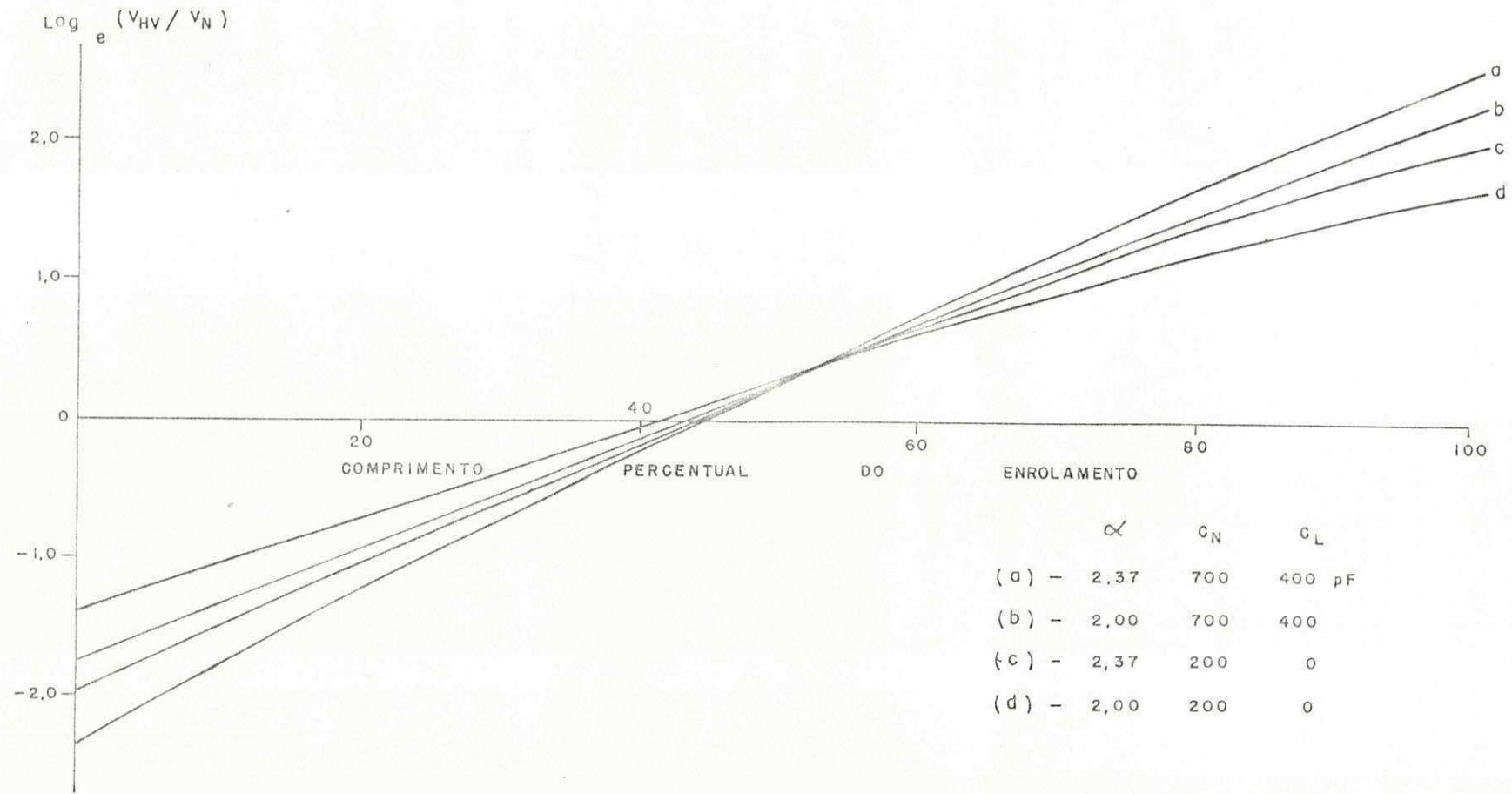
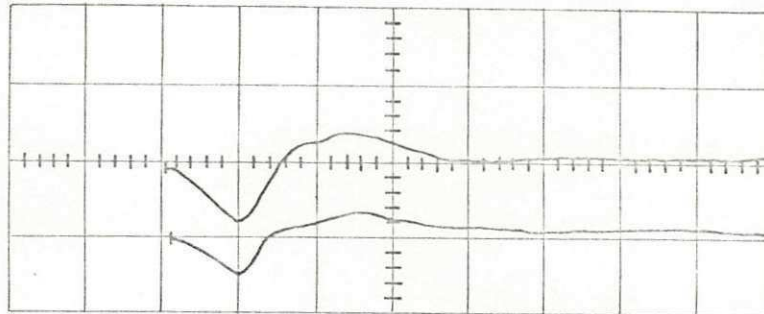
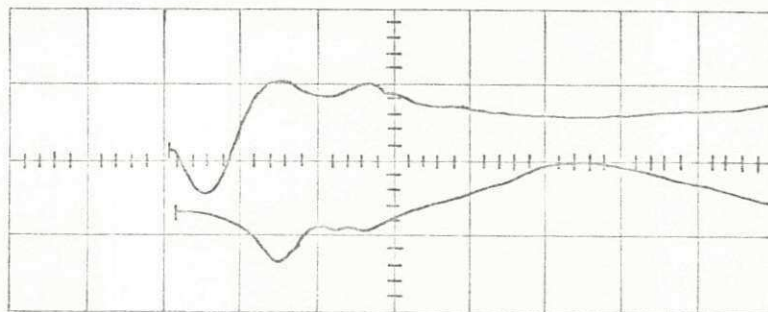


FIG. 3.3 - CURVA DE CALIBRAÇÃO $\text{Log}_e (V_{HV} / V_N)$ PLOTADA CONTRA A POSIÇÃO DE INJEÇÃO.



OSCILOGRAMAS N° 1 - DESCARGA NO MEIO DO ENROLAMENTO.



OSCILOGRAMAS N° 2 - DESCARGA MAIS PRÓXIMA DO TERMINAL
CORRESPONDENTE AO PULSO SUPERIOR.

FIG. 3.4 - OSCILOGRAMAS DOS PULSOS DE DESCARGAS EM UM ENROLAMENTO.

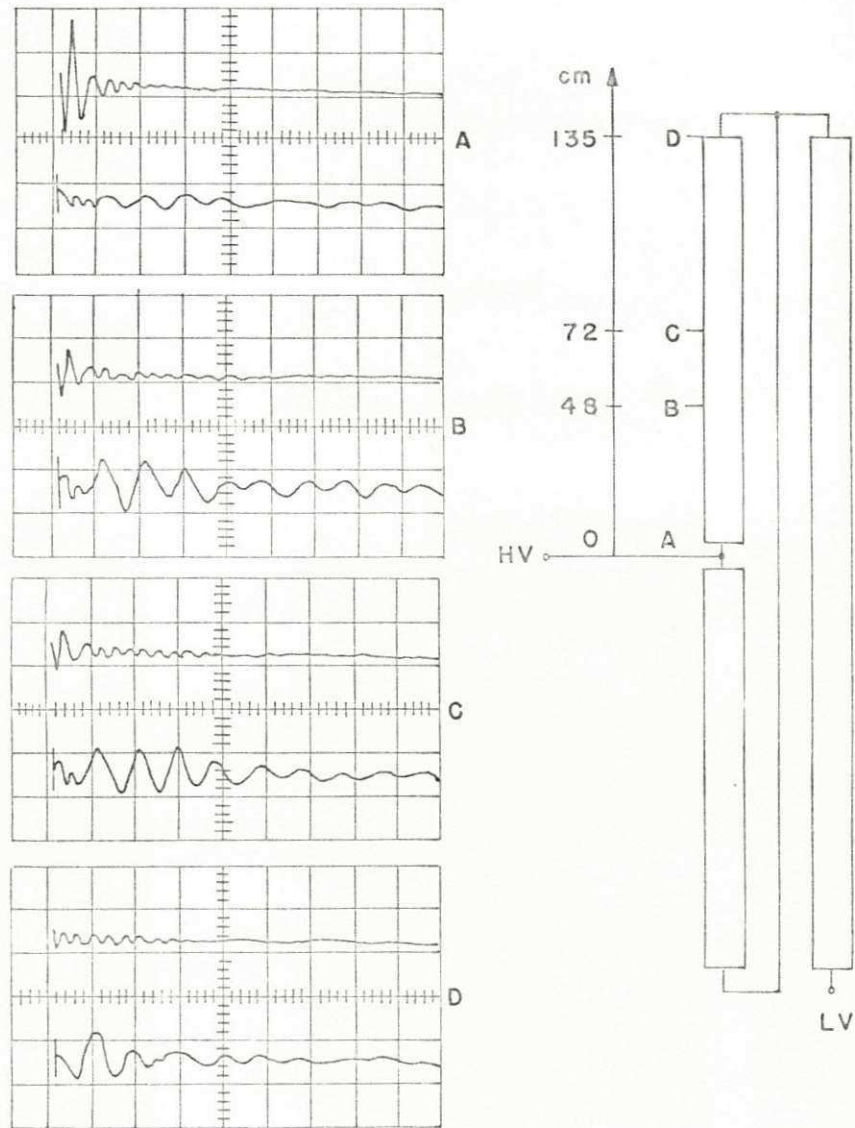


FIG. 3.5 — OSCILOGRAMA DE COMPARAÇÃO DAS FORMAS DE ONDAS DOS PULSOS DE DESCARGAS

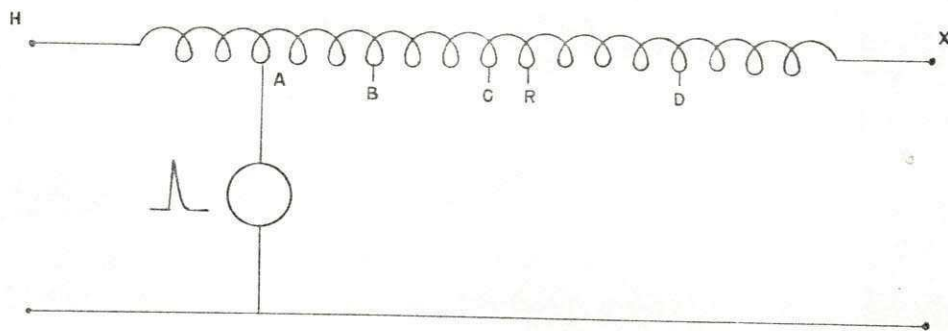


FIG. 3.6 - PULSOS DE CALIBRAÇÃO INJETADOS NOS PONTOS A, B, C, D DO ENROLAMENTO HX.

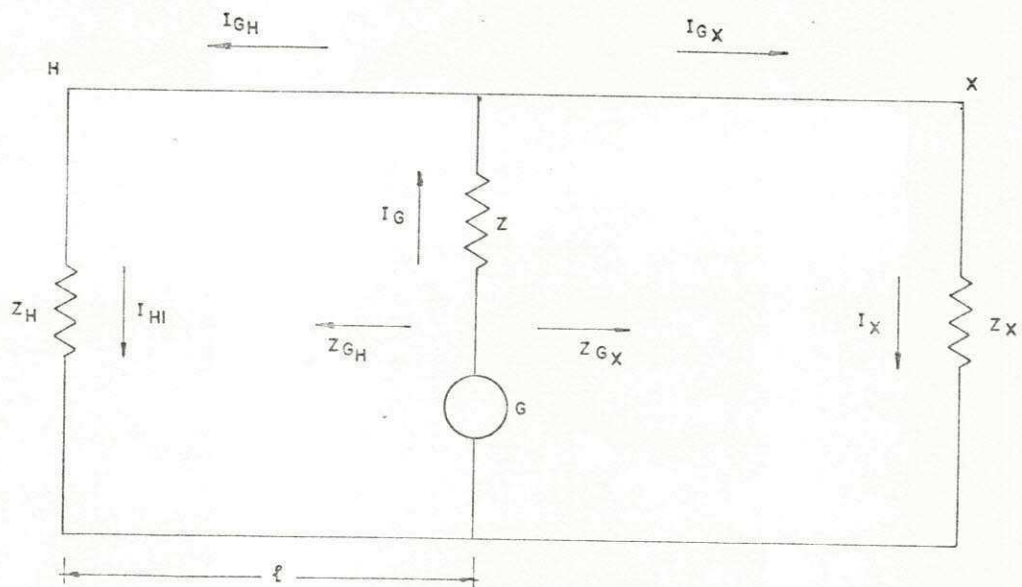
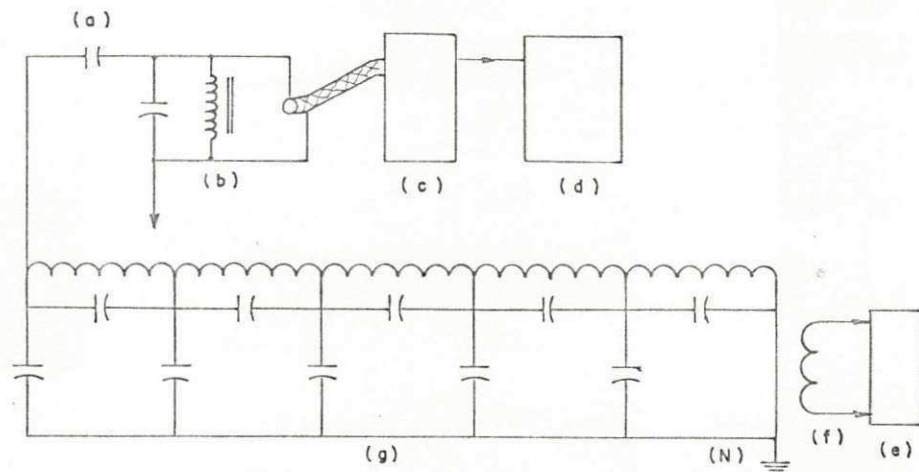


FIG. 3.7 - LINHA DE TRANSMISSÃO UNIFORME COM GERADOR DE CORRENTE CONTINUA.



- (a) BUCHA DE ALTA TENSÃO.
 (b) BOBINA DE "CHOKE".
 (c) MEDIDOR DE RÁDIO RUÍDO.
 (d) REGISTRADOR X-Y.
 (e) MEDIDOR DE RÁDIO RUÍDO
 (f) TRANSFORMADOR DE CORRENTE R.F.
 (g) ENROLAMENTO DE TRANSFORMADOR.
 (N) NEUTRO.

FIG. 3.8 — CIRCUITO DE MEDIÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE CORONA EM TRANSFORMADORES.

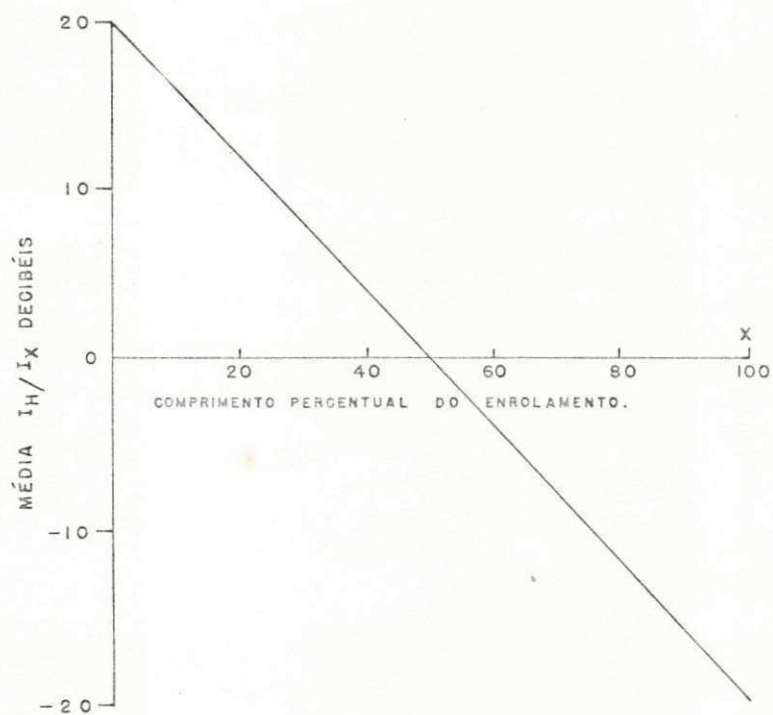


FIG. 3.9 — CURVA DE PREDIÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE CORONA EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES.

CAPÍTULO IV

MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

4.1. INTRODUÇÃO

Tem sido mostrado que estruturas isolantes de equipamentos elétricos podem ser levadas a rápida deterioração quando sob ação de descargas parciais. Por conseguinte, localização de descargas parciais e medidas subseqüentes para atenuar a grandeza dessas descargas são importantes. Métodos para a localização de descargas parciais em transformadores têm sido investigados, concordando-se com que, para os transformadores que tem $\alpha < 5$, o método do pulso transferido capacitivamente é uma técnica muito utilizada para localização de descargas parciais.

Algumas medições para localização de descargas em transformadores de distribuição foram realizadas, em vez de transformadores de força, devido à dificuldade de obtenção destes últimos. Essas medições, que são apresentadas neste capítulo, têm como objetivo a verificação do método de localização pela transferência capacitiva, visando a conseguir uma maneira sistemática de fazer medições de descargas parciais em enrolamentos trifásicos em delta. A localização tem sido baseada sobre a medição do primeiro pico do pulso detido transmitido capacitivamente para os terminais de cada enrolamento de alta tensão.

4.2. MÉTODO USADO PARA LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Um simples procedimento foi desenvolvido durante esse estudo, para localização de descargas parciais em enrolamentos trifásicos em delta. O procedimento é baseado sobre as medições do primeiro pico do pulso transmitido capacitivamente para os terminais do enrolamento sob investigação. Também, a conexão delta dos enrolamentos de transformadores trifásicos e a existência de diversos "taps" sobre cada enrolamento (especialmente o "tap" central) foram utilizados. Verificando-se que todos os enrolamentos foram idênticos e que o coeficiente de atenuação α foi uma constante para todos os enrolamentos do transformador.

4.2.1. Calibração

Considera-se um pulso de tensão, assemelhando-se a um pulso de descarga parcial, injetado num terminal de alta tensão H_2 do transformador (fig.4.1). Assim, os enrolamentos agem como uma rede predominantemente capacitiva para os primeiros poucos microsegundos após a injeção do pulso. Nesse caso, os pulsos de tensão aparecerão nos terminais H_1 e H_3 . A razão do valor de pico dos pulsos em H_1 e H_3 é dada por:

$$\frac{V_D}{V_C} = \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha(l-x)} \quad (\text{V. cap. II}) \quad \dots (4.1)$$

onde:

l = comprimento do enrolamento entre H_1 e H_3 (considerado unitário);

x = comprimento do enrolamento do ponto de injeção do pulso até H_3 , expresso como uma função do comprimento do enrolamento entre H_1 e H_3 .

No caso sob consideração (fig.4.1.b), $x = 0,5$, tal que:

$$\frac{V_D}{V_C} = 1 \text{ ----- (4.2);}$$

contudo, o pulso de tensão de saída de R é filtrado e amplificado antes da medição.e,

$$\frac{V_D}{V_C} = A \text{ ----- (4.3),}$$

onde A toma em consideração atenuações e multiplicações em ambas as extremidades, devido à filtração e amplificação.

Agora, considera-se o pulso injetado em H_2 , os pulsos transferidos capacitivamente aparecendo em H_3 e o "tap" central do enrolamento $H_1 H_3$ (fig.4.2). A razão dos valores de pico dos pulsos H_3 e o "tap" central é dado por:

$$\frac{V_D}{V_C} = \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha (l - x)},$$

onde

ℓ = comprimento do enrolamento entre y e H_3 , tomado como unitário;

x = comprimento do enrolamento entre H_1 e H_3 , expresso como uma fração do comprimento do enrolamento entre y e H_3 .

Assim, $x = 0,4$ e $\ell - x = 0,6$

$$\frac{V_D}{V_C} = \frac{\cosh 0,4\alpha}{\cosh 0,6\alpha} = \frac{e^{0,4\alpha} + e^{-0,4\alpha}}{e^{0,6\alpha} + e^{-0,6\alpha}} = H(\alpha).$$

Novamente, tomando em consideração atenuações e reflexões,

$$\frac{V_D}{V_C} = A \cdot \frac{e^{0,4\alpha} + e^{-0,4\alpha}}{e^{0,6\alpha} + e^{-0,6\alpha}} = A \cdot H(\alpha) = C \dots \dots \dots (4.4),$$

onde, a constante A é obtida da equação (4.3).

Finalmente, considera-se um pulso aplicado em H_2 , e os pulsos transferidos capacitivamente em H_3 e o "tap" central y do enrolamento $H_1 H_2$ (fig. 4.3).

Baseado sobre as mesmas considerações anteriores, pode-se mostrar que a razão do primeiro valor de pico é dado por:

$$\frac{V_D}{V_C} = A \cdot \frac{\cosh 0,67\alpha}{\cosh 0,33\alpha}$$

$$= A \cdot \frac{e^{0,67\alpha} + 0,67\alpha}{e^{0,33\alpha} + 0,33\alpha} \quad (4.5)$$

$$= A \cdot G(\alpha) = B \quad (4.6).$$

As funções $H(\alpha)$ e $G(\alpha)$ são mostradas nas figs. 4.4 e 4.5, para

$$0 < \alpha < 10.$$

A finalidade do procedimento de calibração é para determinar o coeficiente de atenuação dos enrolamentos do transformador. O procedimento de calibração é dado abaixo:

1. Um pulso de calibração com tempo de crescimento muito baixo foi aplicado entre o terminal H_2 e o tanque aterrado (fig. 4.1), e o valor do primeiro pico dos pulsos de tensão em H_1 e H_3 foi medido. Sua razão dá a constante A .

2. Com o pulso de tensão aplicado em H_2 , como antes, o valor do primeiro pico dos pulsos de tensão em Y e H_3 foi me

dido (fig. 4.2), e o valor de $H(\alpha)$ foi calculado. Da fig. 4.4, o primeiro valor de α foi obtido.

3. Com o pulso de tensão aplicado ainda em H_2 , o valor do primeiro pico dos pulsos de tensão em y e H_3 foi medido (fig. 4.3), e o valor de $H(\alpha)$ foi calculado. Da fig. 4.5, o segundo valor de α foi obtido.

O procedimento da calibração foi repetido pela aplicação do pulso de tensão nos outros terminais H_1 e H_3 , e medição do valor de pico dos pulsos de tensão transferidos capacitivamente para os "taps" centrais dos enrolamentos $H_1 H_2$ e $H_2 H_3$, e os terminais de alta tensão restantes.

4.2.2. Localização de Descargas Parciais

Cada enrolamento de alta tensão foi testado separadamente para a presença de descargas parciais. Por exemplo, para se localizarem descargas parciais no enrolamento $H_1 H_2$, o transformador de ensaio (livre de descarga) é conectado entre um dos terminais do enrolamento, digamos H_2 (fig. 4.6), e o tanque aterrado. Pulsos de descargas, aparecendo nos terminais H_1 e H_2 , são simultaneamente detetados, como mostra a fig. 4.6,

A razão dos valores do primeiro pico é dada por:

$$\frac{V_D}{V_C} = A. \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha (1 - x)} \quad (4.7),$$

onde x é a percentagem do enrolamento do terminal H_1 para a qual a posição da descarga é localizada. Então,

$$\frac{V_D}{V_C} = A \cdot k(\alpha, x) \text{-----} (4.8).$$

A função $k(\alpha, x)$ é plotada na fig. 4.7 como uma função de x , com α como parâmetro.

Para detetar e localizar descargas parciais nos enrolamentos H_1 H_2 , a tensão é aplicada entre qualquer um dos terminais H_1 ou H_2 e o tanque aterrado. Pulsos de descargas parciais são medidos simultaneamente nos terminais H_1 H_2 . Essas medições facilitam a determinação de $k(\alpha, x)$. Visto que α já tem sido determinado pelas medições de calibração, x (o local da descarga) pode ser determinado. Seria notado que o osciloscópio, registrando pulsos de descargas parciais, facilitariam a localização de somente um local de descarga, isto é, o local com a mais alta grandeza de descarga.

4.3. CIRCUITO DE TESTE

O circuito de teste é mostrado esquematicamente na fig. 4.8. A fonte de tensão consiste em um transformador MessVandler Bau tipo Tec, livre de descargas parciais, 220 V/100 kV, 5 KVA. A tensão primária do transformador de alta tensão é variada por meio de um regulador de tensão de 220 V/0-240V, 10 kVA (fig. 4.8.a). A fonte de alta tensão é conectada en

tre um dos terminais do enrolamento sob investigação e o tan que aterrado. Ambos os terminais do enrolamento são conectados para as impedâncias de deteção R_C e R_D (resistores de 75 ohm.) através dos capacitores de acoplamento C_C e C_D .

O capacitor de acoplamento C_D consiste em um capacitor tipo Biddle de 2.000 pf, 125 kV, livre de descargas parciais; C_C é constituído de seis capacitores de 10.000 pf, 20kV conectados em série e livres de descargas para mais do que 35 kV. As descargas parciais são detetadas através dos resistores de 75 ohm., 1/2 watt.

O pulso de descarga transmitido por C_D e detetado através de R_D é alimentado para uma das entradas do detetor de descargas balanceado (Biddle Tipo 665700). Somente o filtro de entrada e o amplificador do detetor têm sido utilizados. O filtro tem uma banda passante de 16 - 180 KHz., e o amplificador tem um ganho de cerca de 82 db. sobre essa faixa. A saída do amplificador é alimentada para um canal de "plug-in" de amplificação, de duplo traço 7 A 18 e montado no Tektronix tipo 7.613 "main frame".

O pulso transmitido por C_C e detetado através de R_C é conectado para um filtro T, tendo uma banda de 16 - 180kHz. e uma impedância característica de 75 ohms. A saída do filtro é alimentada para um "plug-in" do amplificador diferencial tipo 7 A 22, usado no "single input mode".

Um tubo de metal flexível de duas polegadas de diâmetro é usado para todas as conexões de alta tensão, para evi

tar corona. Uma larga fita de cobre é usada para todas as co n e x õ e s de terra. "Loops", no circuito de aterramento, são e v i t a d o s, considerando-se um único ponto de aterramento. Cabos coaxiais, tendo 75 ohms de impedância característica, são usados onde quer que sejam necessários. A área de teste é delimitada por telas metálicas aterradas. As blindagens eletrostáticas são aplicadas para todos os amplificadores, filtros e impedâncias de detecção.

Um gerador de pulso, Tektronix tipo 508, foi usado para calibração. O gerador transmite pulsos de onda quadrada com tempo de crescimento frontal menor do que 10 ms. O pulso q a d r a d o foi alimentado através de um capacitor de 100 pf para um dos terminais do transformador sob teste. Os pulsos de c a l i b r a ç ã o, por conseguinte, são alternativamente positivos e negativos. A largura da onda quadrada foi escolhida para ser suficientemente larga (10 ms), tal que a resposta do e n r o l a m e n t o do transformador para sucessivos pulsos de calibração não interfira.

4.4. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

4.4.1. Calibração

O pulso de calibração é aplicado para um terminal de alta tensão, como ficou mostrado na fig. 4.1.a, e os pulsos de tensão nos outros terminais são observados no osciloscópio. A fig. 4.9 mostra os pulsos de calibração injetados num terminal (oscilograma central) e os pulsos medidos nos outros

terminais. Este procedimento é repetido para várias combinações de terminais. O pulso de calibração é novamente injetado em um dos terminais de alta tensão, os pulsos de tensão transmitidos para os taps centrais, e os remanescentes terminais de alta tensão são observados (fig.4.2.a e 4.3.a). Este procedimento é também repetido para várias combinações de terminais.

4.4.2. Ensaio com Tensão Aplicada

Aplicando-se uma tensão entre o terminal de alta tensão e o tanque aterrado de um transformador, como o indicado na fig.4.8, o primeiro pico do pulso de descargas parciais, que atinge instantaneamente os terminais de medição C e D, onde estão acoplados os capacitores C_C e C_D , respectivamente, é observado e registrado por meio do osciloscópio. A tensão de ensaio é aumentada vagarosamente, a partir de zero, até que as descargas sejam nitidamente observadas, não excedendo da tensão nominal para a qual o transformador foi projetado. Dois pulsos de descargas são observados no osciloscópio, como mostra o oscilograma da fig. 4.10, e, neste caso, com uma tensão aplicada de 10,4 kV. O oscilograma superior corresponde ao pulso de tensão de descarga parcial que atinge o terminal de medição C, cuja leitura é V_C . O oscilograma inferior corresponde ao pulso de tensão, que atinge o terminal de medição D, cuja leitura é V_D .

Observa-se que as formas dos pulsos de descargas parciais, têm tensões semelhantes às formas dos pulsos de calibração.

Essas descargas, de aproximadamente mesma amplitude, mesmo número e mesma posição relativa, se produzem sobre os meios ciclos positivo e negativo, da forma de onda de tensão aplicada, em avanço do pico da tensão. Existe um certo grau de variação aleatória nessas descargas. As descargas corona se caracterizam por apresentarem pulsos positivos ou negativos, uniformemente espaçados no tempo, com amplitudes aproximadamente iguais, dispostos simetricamente em relação ao pico da tensão aplicada⁽²⁾.

O ensaio é repetido com aplicação de tensão nos outros terminais e a observação dos pulsos de descargas no par de terminal do enrolamento sob ensaio.

4.5. RESULTADOS

As medições sobre descargas parciais foram realizadas sobre 6 (seis) transformadores, com potências nominais de 30 a 75 kVA, classe 15 kV, 13.8 kV/380-220 V, Δ - Y, com secundário aberto e neutro aterrado. Desses seis transformadores, três são novos, sem nunca terem sido utilizados, e três são velhos, com alguns anos de utilização. Os resultados das medições, relacionados com os seis transformadores, são mostrados na Tabela I.

As tensões aplicadas nos ensaios de alta tensão não foram as mesmas para todos os seis transformadores, sendo dependente dos níveis de descargas parciais observados na tela do osciloscópio. A tensão máxima aplicada nestes ensaios foi de 11,68 kV.

As medições de calibrações deram coeficientes de atenuação α , entre 1,25 e 4,42. Os transformadores I, III e V foram testados uma única vez, sem entretanto serem abertos para comprovação ou não de locais de descargas parciais. Os testes de descargas parciais nos transformadores restantes (II, IV, VI) foram realizados duas vezes. Concluída a primeira série de calibrações e ensaios, extraiu-se o conjunto núcleo-enrolamentos do tanque destes transformadores, para verificação de ocorrência de traços de descargas parciais nos enrolamentos ou condutores para os "taps" de hV, o que foi feito em concordância ou não com os locais de descargas parciais calculados na curva de predição $k(\alpha, x)$ da fig. 4.7. Os locais de possíveis descargas parciais foram inspecionados, e quaisquer falhas evidentes nesses locais foram bem limpas com álcool, tendo sido os isolamentos recuperados à base de verniz isolante.

Foram observados, em determinados locais, condutores nus sem nenhum isolamento. Durante o tratamento, cuidados foram tomados para evitar impurezas e umidade no conjunto núcleo-enrolamento, óleo e parte interna do tanque dos transformadores, utilizando-se de cobertas de plástico para cobrir o conjunto núcleo-enrolamentos. Depois desse tratamento, novas calibrações e ensaios de descargas parciais foram realizados.

4.6. DISCUSSÃO

No transformador I, com uma tensão aplicada da ordem de 10 kV, os resultados indicaram a presença de descargas par-

ciais em cada enrolamento, com $k = 0,43$. As calibrações deram um valor de $\alpha = 1,35$ usando a curva $H(\alpha)$ e um valor de $\alpha = 1,9$, usando a curva $G(\alpha)$. Essa curva dá valores de α mais próximos para os enrolamentos de um mesmo transformador, do que a curva $H(\alpha)$ (tab. I). Isto indica que o uso de $G(\alpha)$, na determinação de α , seja o mais correto. Usando o valor de $\alpha = 1,9$, podemos determinar a existência de fontes de descargas no enrolamento H_1H_2 , a 17,5% do terminal H_2 , no enrolamento H_1H_3 , a 17,5% do terminal H_3 , e no enrolamento H_2H_3 , a 17,5% do terminal H_3 .

No transformador II, a primeira série de calibração dá um valor para $\alpha = 2,5$ e, com tensões aplicadas entre 9,05 e 11,29 kV, os resultados indicam a presença de descargas parciais nos enrolamentos H_1H_3 , a 38% do terminal H_3 , para um valor de $k = 0,60$, e no enrolamento H_1H_2 , a 60% do terminal H_2 , com $k = 1,54$. No enrolamento H_2H_3 , para o mesmo valor de $\alpha (2,5)$, a curva de predição $k (\alpha, x)$ dá um valor para k muito grande (54,39), indicando, conseqüentemente, a presença de descargas parciais no terminal H_2 .

Concluída a primeira série de ensaios e determinadas as fontes de descargas, retirou-se o conjunto núcleo-enrolamentos do transformador e realizou-se uma inspeção visual. Nesta inspeção, constatou-se a existência de uma falha (carbonização ou queima) no isolamento do lide (condutor), que liga a sexta bobina de um total de dez, do enrolamento H_1H_2 ao "tap" de comutação. Esta falha se verificou no local correspondente ao ponto calculado na curva de predição $k (\alpha, x)$, como mostra a fig. 4.11. Os enrolamentos H_1H_3 e H_2H_3 não apresentaram nenhum traço de descargas parciais. A seguir, re

cuperou-se o isolamento no local da falha e procedeu-se a uma nova série de calibra es e ensaios.

Nas calibra es, o valor encontrado para α foi 3,0. Neste caso, os resultados indicam que descargas parciais ocorreram no mesmo enrolamento H_1H_3 , a 45% do terminal H_3 para $k = 0,67$, em um local diferente (38%) daquele para o qual se recuperou o isolante. Também foi observado que as amplitudes dos pulsos de descargas decresceram por um fator de aproximadamente 4. No enrolamento H_2H_3 , com $k = 18,44$, a curva de predic o $k(\alpha, x)$ indica descargas parciais no terminal H_2 . As descargas detetadas nesse enrolamento apresentaram valores muito altos de amplitudes, para o terminal H_2 , e muito baixos para o terminal H_3 . Invertendo-se as posi es dos terminais H_2 e H_3 , os valores das amplitudes das descargas, para estes terminais, também se invertem, indicando, conseqüentemente, que existe uma fonte de descarga parcial, no terminal H_2 . Resultados semelhantes foram também determinados por Harrold e Sletten (^{9,10}). Do mesmo modo, no enrolamento H_1H_2 , mediram-se valores muito altos de descargas parciais, para o terminal H_2 , com $k = 0,05$. Esses resultados indicam que existe uma fonte de descargas no terminal H_2 .

No transformador III, as calibra es deram um valor de $\alpha = 4,42$ para os enrolamentos. Aplicando-se as mesmas tensões de ensaios entre 10,25 e 11,68 kV, os resultados indicam uma fonte de descarga parciais no enrolamento H_1H_3 , a 54% do terminal H_3 . No enrolamento H_2H_3 , detetaram-se valores de descargas parciais, que apresentaram amplitudes muito altas, para o terminal H_2 , e muito baixos para o terminal H_3 . Esses valores de amplitudes foram classificados em três

grupos distintos, com um valor mínimo de $k = 66,6$. Esses resultados indicam fontes de descargas parciais no terminal H_2 . No enrolamento H_1H_2 , detetaram-se pulsos de descargas com características de pulso corona. Esses pulsos apresentaram, ora valores de amplitudes muito altos para o terminal H_1 , ora valores de amplitudes muito altos para H_2 , o que indica descargas corona nos terminais H_1 e H_2 .

Na primeira série de ensaios do transformador IV, as tensões aplicadas foram entre 7,51 e 8,99 kV. O valor de $\alpha = 1,25$ foi obtido das calibrações. Para este valor de α , os resultados indicam uma fonte de descargas parciais no enrolamento H_2H_3 , a 51,0% do terminal H_3 . Nos enrolamentos H_1H_2 e H_1H_3 , pulsos individuais de polaridade aleatória foram obtidos, com os pulsos positivos e negativos apresentando altos valores de amplitudes para o terminal H_1 . Esses resultados indicam que existe uma fonte de descarga parcial perto do terminal H_1 .

Concluindo esta primeira série de ensaios, extraiu-se o conjunto núcleo-enrolamentos do tanque do transformador e realizou-se uma inspeção visual. Nesta inspeção, constatou-se a ocorrência de uma falha no enrolamento H_2H_3 , observando-se, para este local, uma completa deterioração de camada isolante, como é mostrado na fig. 4.12. Deteriorações semelhantes também foram observadas nos lides e nas junções com os "taps" de comutação para os três enrolamentos. A fig. 4.13 mostra o tipo de falha acima indicado para H_1H_3 . A seguir, processou-se a recuperação do isolamento, como se indicou anteriormente, apenas no local da falha ocorrida no enrolamento H_2H_3 , e procedeu-se a uma nova série de calibrações e ensaios.

Tensões entre 9,32 e 10,20 kV foram aplicadas, sendo, portanto, mais elevadas que as tensões aplicadas na primeira série de ensaios. As calibrações deram um valor de $\alpha = 1,27$. As medições dos pulsos nos terminais deram altos valores de amplitudes para H_1 , H_2 e H_3 . Esses pulsos detetados individualmente apresentam características de pulsos corona. Esses resultados indicam a ocorrência de fontes de corona nos terminais H_1 , H_2 e H_3 .

Os transformadores V e VI são novos e apresentam as mesmas especificações de projeto e construção; portanto, serão discutidos conjuntamente.

As medições de calibração dos dois transformadores deram o valor $\alpha = 3$ para ambos. As tensões aplicadas foram em torno de 8 kV para o transformador V e entre 8,55 e 10,47 kV para o transformador VI. Em todos os enrolamentos do transformador V e no enrolamento H_2H_3 do transformador VI, descargas aleatórias foram observadas no osciloscópio. Essas descargas apresentaram valores de amplitudes que foram classificadas em grupos distintos, de acordo com os valores de k.

No transformador V, no enrolamento H_1H_3 , grupos de pulsos foram observados com $k = 6,35$ e $8,10$. Isto indica que existem fontes de descargas em 87% e 94% do terminal H_3 . Um grupo de pulsos deu um valor de $k = 10,65$, o que significa a existência de uma fonte de descargas perto do terminal H_1 . Da mesma maneira, no enrolamento H_2H_3 , um grupo de pulsos foi observado com $k = 5,04$ e $13,03$. Isto indica a presença de descargas em 49% e 81% do terminal H_3 , respectivamente. Além disso, dois grupos de pulsos foram observados com $k = 0,98$

e 19,55. Logo, as origens desses pulsos estão próximas dos terminais H_2 e H_3 . No enrolamento H_1H_2 , grupos de pulsos foram observados com $k = 4,71$ e $6,96$, indicando, conseqüentemente, a existência de fontes de descargas a 20% e 11% terminal H_1 . Nesse mesmo enrolamento, grupos de pulsos, com K mínimo igual a 12,98, também foram observados, indicando a ocorrência de descargas no terminal H_1 .

No transformador VI, no enrolamento H_2H_3 , detetaram-se valores muito altos de descargas em H_2 , e baixos em H_3 , com um valor de $k = 21,89$. Isto indica o terminal H_2 como uma fonte de descargas parciais. No enrolamento H_1H_2 , com $k = 0,46$, descargas parciais com amplitudes quase constantes ocorreram a 37,5% do terminal H_2 . No enrolamento H_1 e H_3 , com $k = 1,50$, descargas parciais, com amplitudes pouco variáveis, ocorreram a 57,5% do terminal H_3 .

Concluída a primeira série de calibrações e ensaios, extraiu-se o conjunto núcleo-enrolamentos somente do transformador VI, e realizou-se uma inspeção visual. Nesta inspeção, constatou-se que existia uma falha, constando de uma lima-lha sobressaindo entre duas espiras do enrolamento H_1H_3 , como indicado está na fig. 4.14. A seguir, processou-se a recuperação do local da falha, como das vezes anteriores, e novas calibrações e ensaios foram realizadas para os dois transformadores.

As calibrações deram um valor de $\alpha = 3,1$. As tensões aplicadas foram entre 8,5 e 9,32 kV para o transformador VI. No enrolamento H_1H_3 , detetaram-se descargas com $k=0,014$. Portanto, podemos concluir que existem descargas perto do terminal H_3 . É necessário salientar que as amplitudes dos pulsos de descargas foram muito menores do que no caso anterior. Nos enrolamentos H_1H_2 e H_2H_3 , não foram detetadas descargas parciais.

4.7. CONCLUSÕES

Os resultados das descargas apresentadas na tabela I, baseados na observação dos pulsos de descarga, transferidos capacitivamente para os terminais dos enrolamentos de transformador, indicaram que descargas ocorridas nos enrolamentos, constatadas visualmente, quando da retirada do núcleo dos transformadores (II, IV, VI), corresponderam aos locais determinados pela curva de predição K (a, y).

Verificou-se ainda que, quando da recuperação de locais onde ocorreram falhas nas bobinas que compõem os enrolamentos ou de locais onde possíveis traços de descargas estariam presentes, as descargas que ocorreram para o segundo ensaio não se deram nos locais recuperados ou não ocorreram para o enrolamento em questão.

Por consequência o método, apresentado, visando a determinação de locais de descargas parciais, dá uma boa aproximação dos locais de descargas, sendo válido somente para transformadores cujos enrolamentos tenham baixo fator de atenuação.

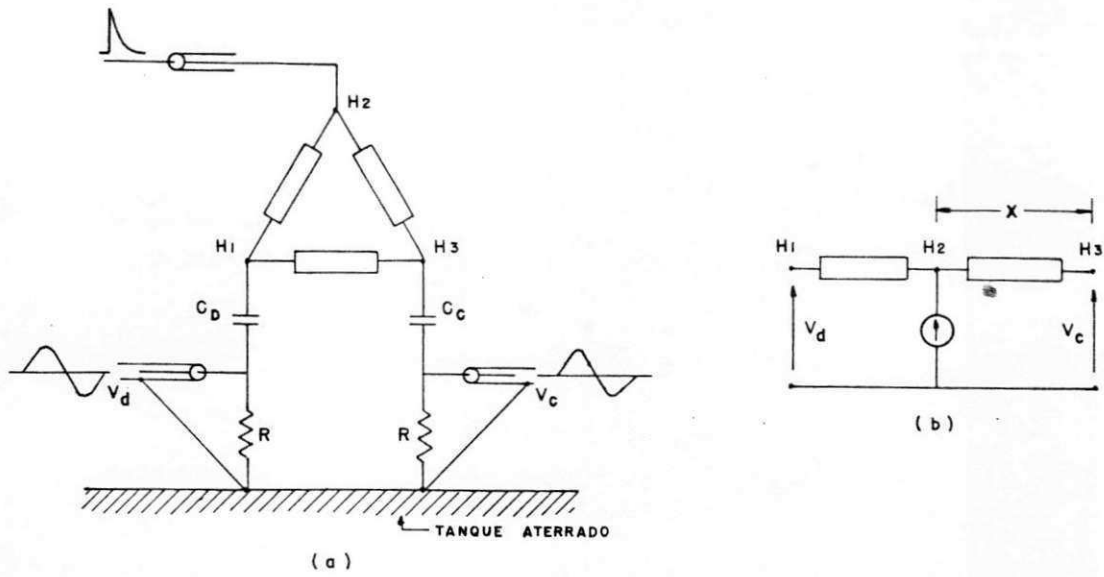


FIG. 4.1 - PULSOS DE CALIBRAÇÃO INJETADO EM H₂ E MEDIDO NOS TERMINAIS H₁ E H₃.

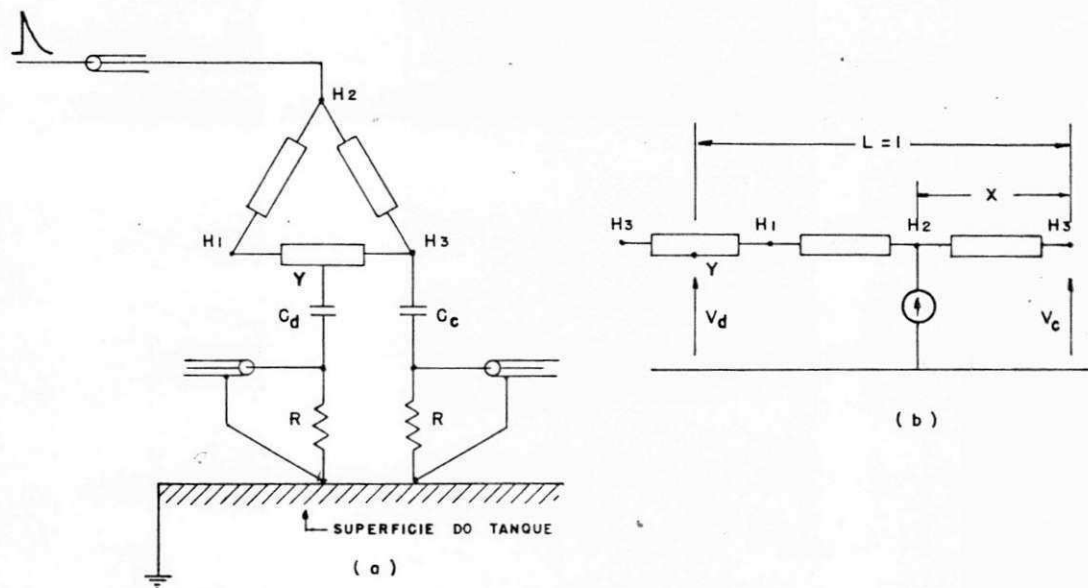


FIG. 4.2 - PULSO DE CALIBRAÇÃO INJETADO EM H₂ E MEDIDO EM H₃ E Y ("TAP" CENTRAL DO ENROLAMENTO H₁H₃).

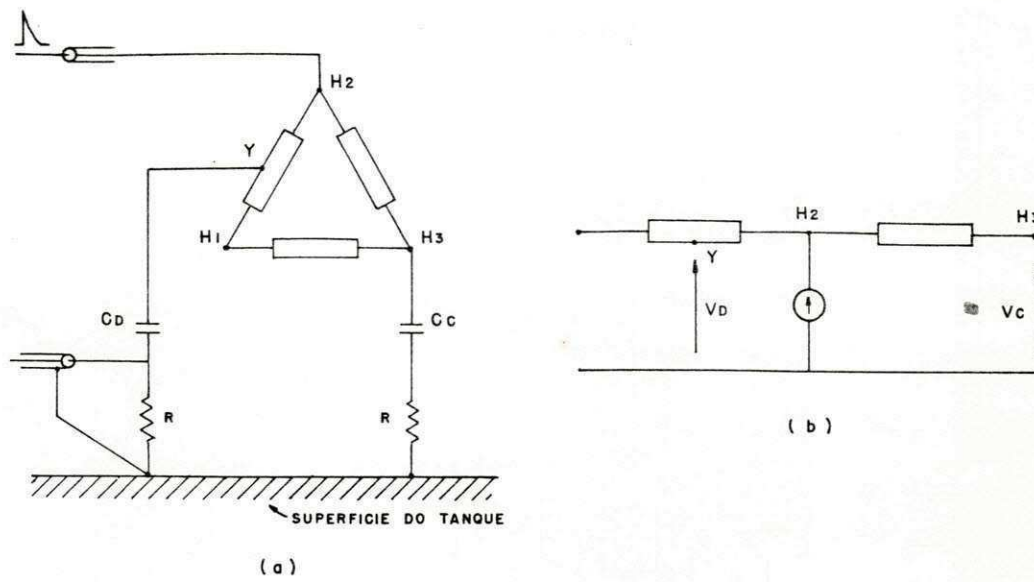


FIG. 4.3 - PULSO DE CALIBRAÇÃO INJETADO EM H₂ E MEDIDO EM H₃ E Y ("TAP" CENTRAL DO ENROLAMENTO H₁H₂).

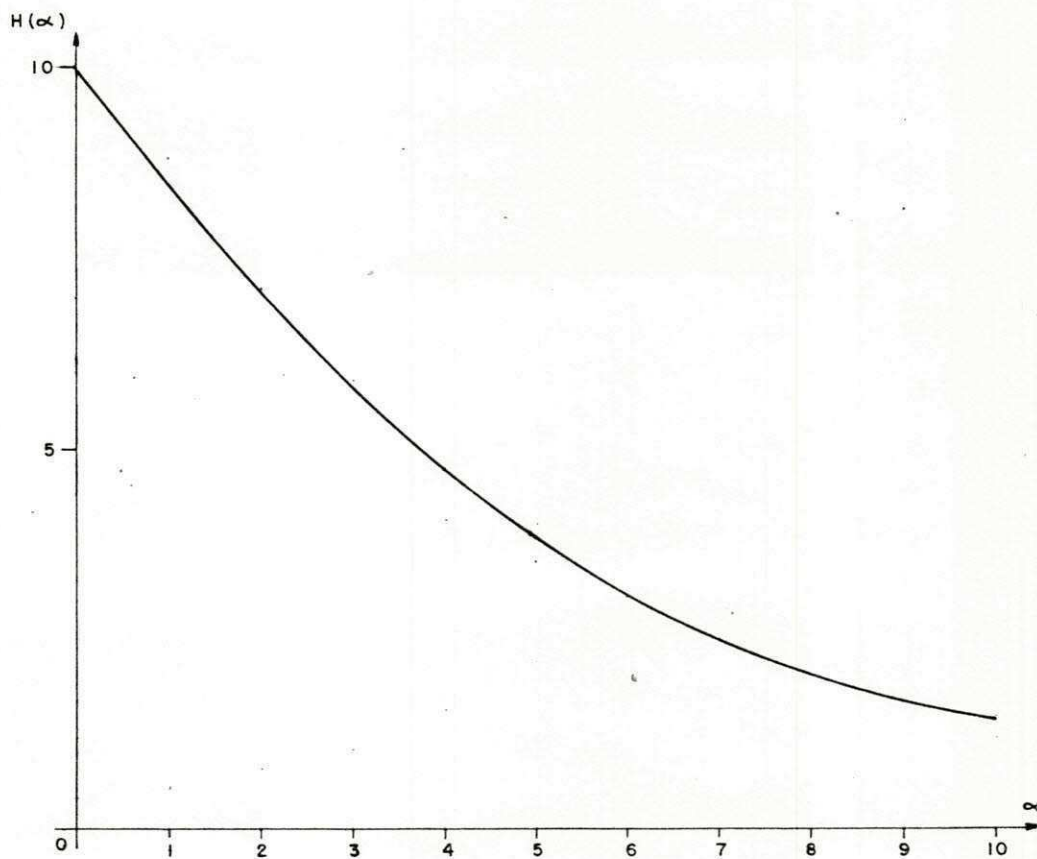


FIG. 4.4 - VARIAÇÃO DA FUNÇÃO $H(\alpha)$ COM RESPEITO A α .

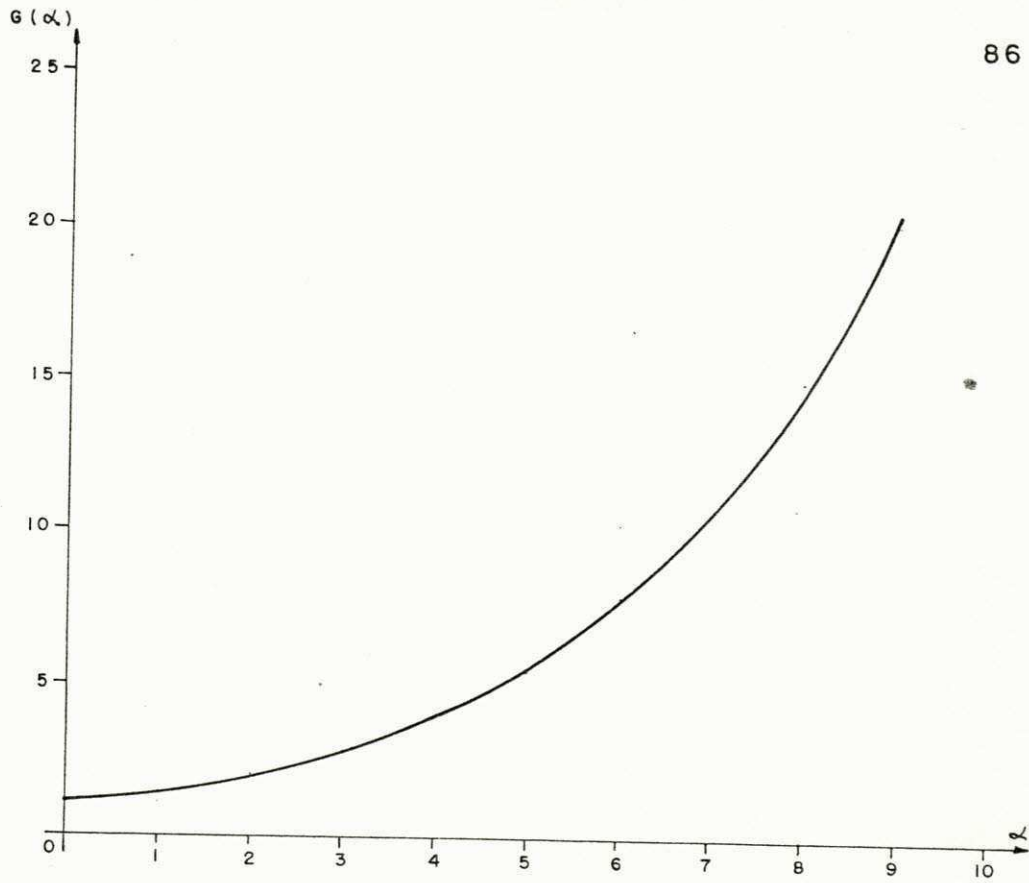


FIG. 4.5 - VARIACÃO DA FUNÇÃO $G(\alpha)$ COM RESPEITO A α

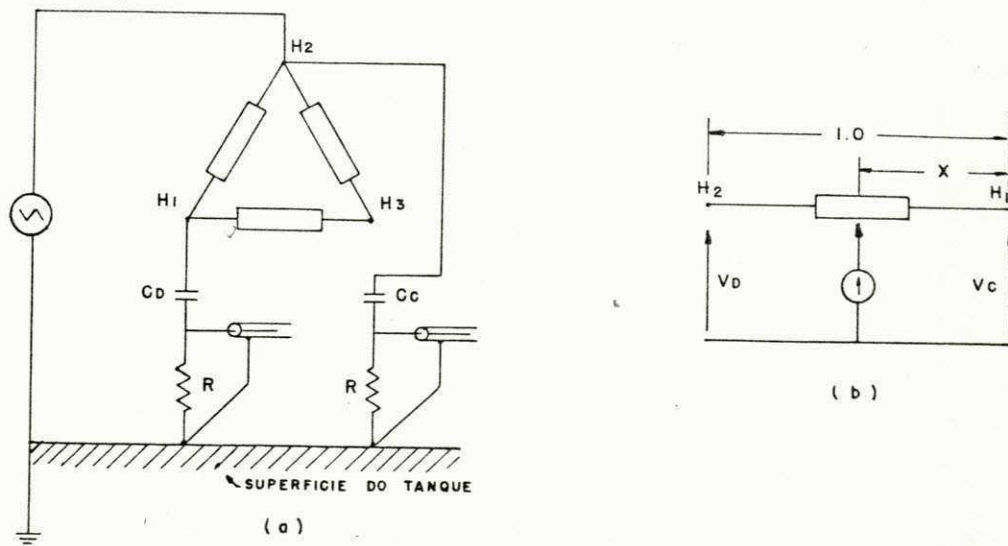


FIG. 4.6 - TENSÃO APLICADA EM H_2 E MEDIÇÃO DE PULSOS DE DESCARGAS PARCIAIS EM H_1 E H_2 .

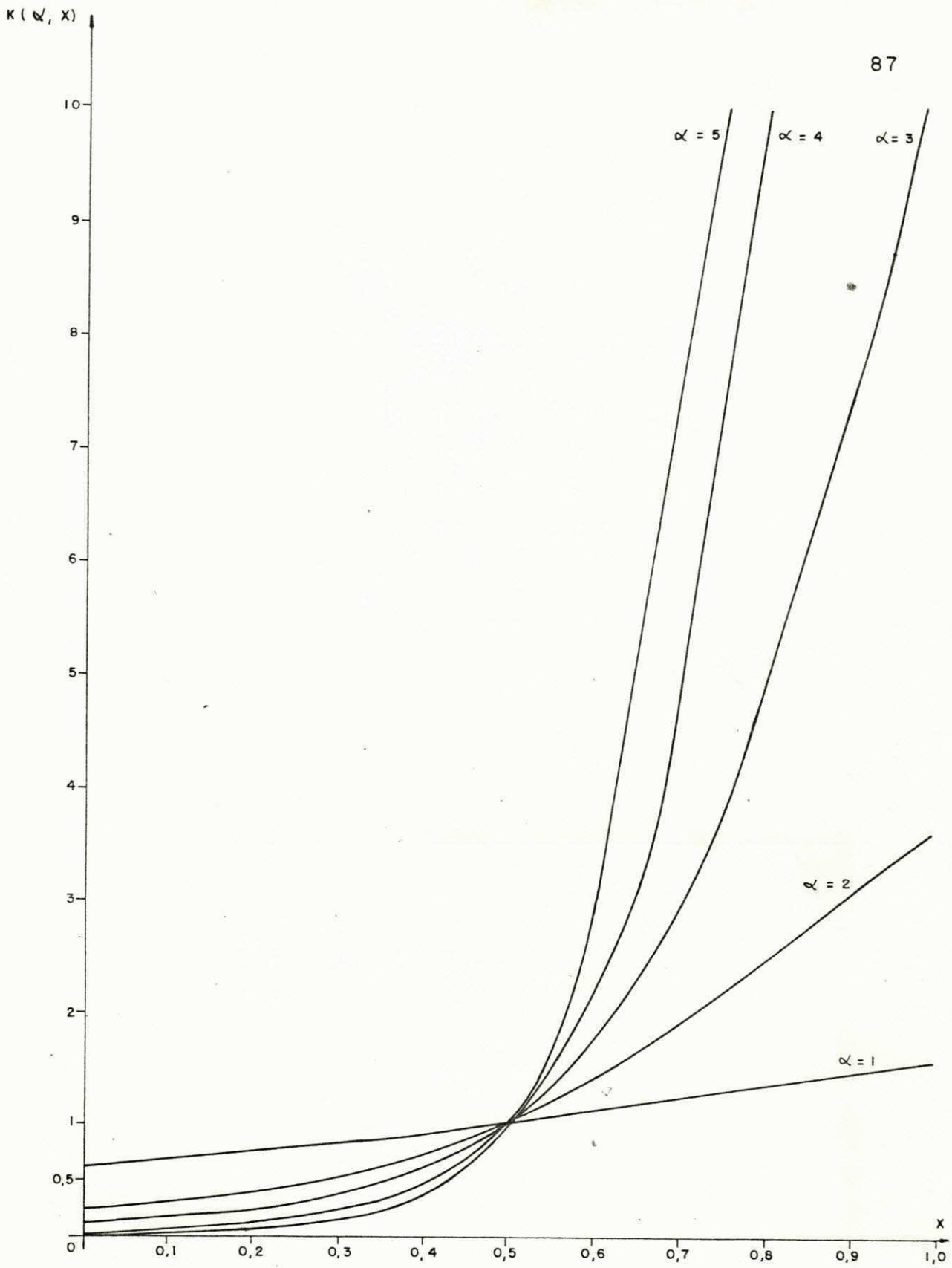
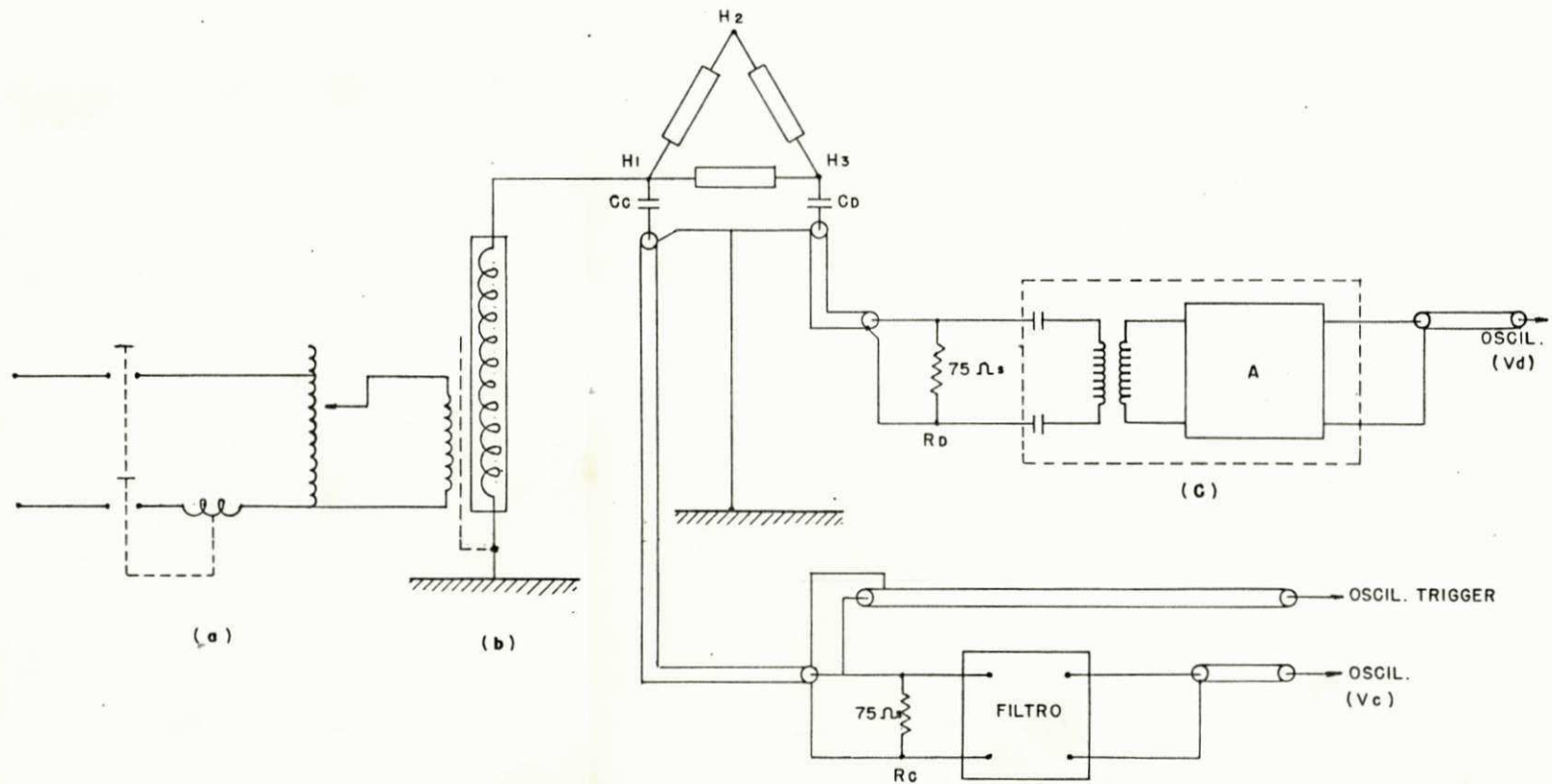


FIG. 4.7 - $K(\alpha, x)$ COMO FUNÇÃO DE x , TENDO α COMO PARÂMETRO.



- (a) - REGULADOR DE TENSÃO DE 220 V/0 - 240 V, 10 kVA
 (b) - TRANSFORMADOR MESSWANDLER BAU 220 V/100kV, 5 kVA
 (c) - FILTRO E AMPLIFICADOR DO DETETOR DE DESCARGA PARCIAL.

FIG. 4.8 - CIRCUITO DE TESTE.

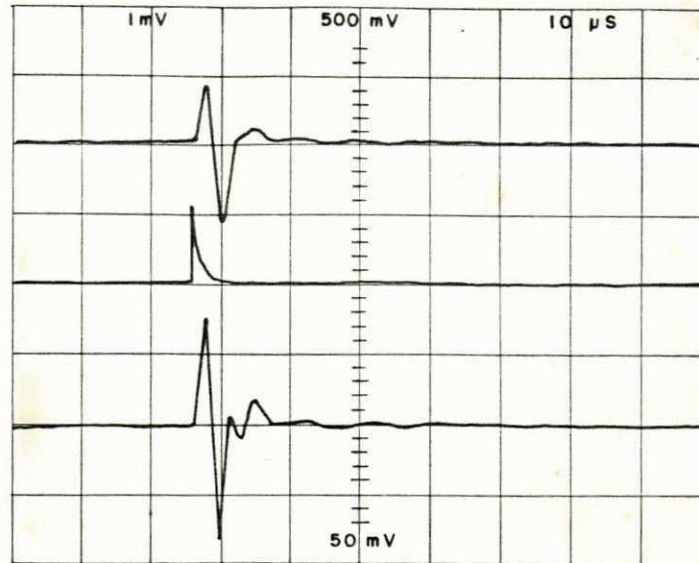


FIG. 4.9 - OSCILOGRAMA DOS PULSOS DE CALIBRAÇÃO.

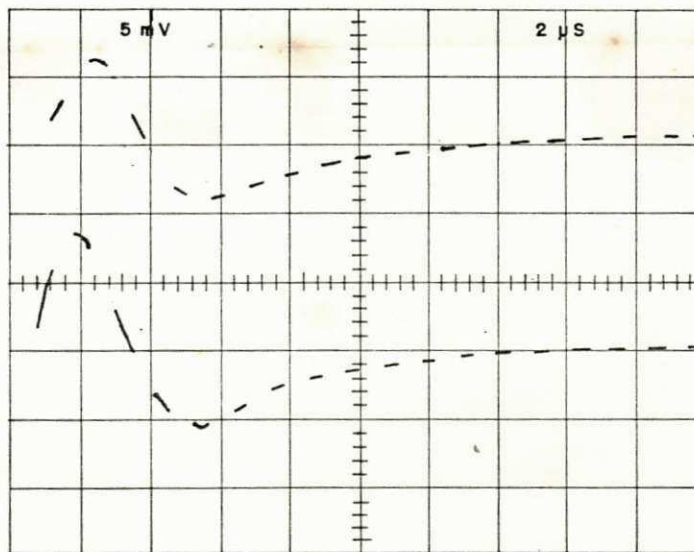


FIG. 4.10 - OSCILOGRAMA DOS PULSOS DE DESCARGA COM TENSÃO APLICADA.

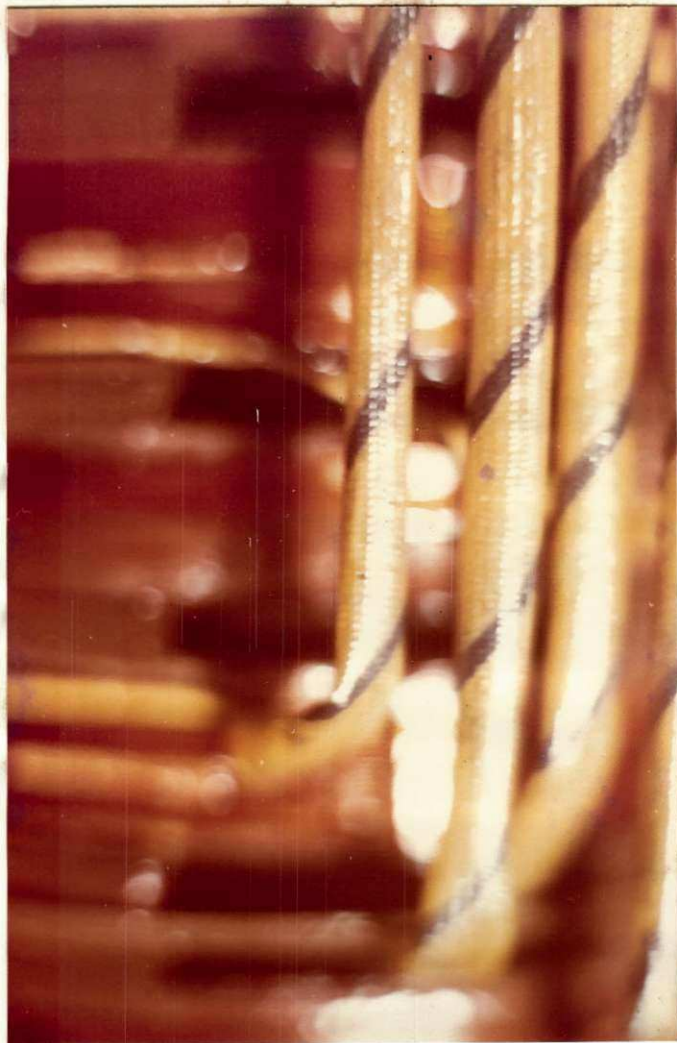


FIG. 4.II - FALHA NO LIDE QUE LIGA A BOBINA DO ENROLAMENTO $H_1 H_2$ AO "TAP" DE COMUTAÇÃO.





FIG. 4.13 - FALHA NA JUNÇÃO DO LIDE COM O "TAP" DE COMUTAÇÃO DE $H_1 H_3$.

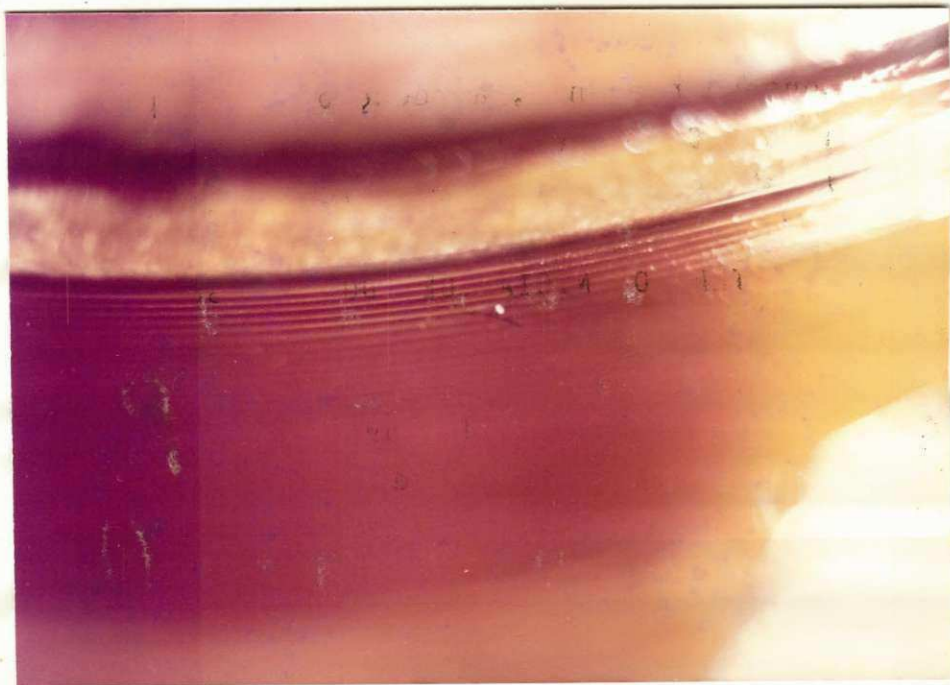


TABELA I - RESULTADOS DAS CALIBRAÇÕES E ENSAIOS.

TRANSFORMADORES SOB ENSAIOS		CALIBRAÇÕES								ENSAIOS DE TENSÃO APLICADA									OBSERVAÇÕES	
										ENROLAMENTOS										
										H1 H3			H2 H3			H1 H2				
Nº	kVA	Nº	A	B	C	$H = \frac{C}{A}$	$G = \frac{B}{A}$	α_H	α_G	Nº	T.A	V _D /V _C	$K = \frac{(V_D/V_C)}{A}$	T.A	V _D /V _C	$K = \frac{(V_D/V_C)}{A}$	T.A	V _D /V _C	$K = \frac{(V_D/V_C)}{A}$	
I	45	I	84,05	136,36	73,33	0,86	1,62	1,35	1,90	I	10,40	33,33	0,43	10,64	35,78	0,43	10,20	33,48	0,43	1) DESCARGAS PARCIAIS FORAM DETECTADAS NOS ENROLAMENTOS H ₁ H ₃ E H ₂ H ₃ A 17,5 % DO TERMINAL H ₃ ; E EM H ₁ H ₂ A 17,5 % DE H ₂ .
II	30	I	119,79	241,25	78,12	0,65	2,01	2,50	2,50	I	11,29	72,50	0,60	10,20	56,44	47,12	9,05	184,48	1,54	1) DESCARGAS PARCIAIS OCORRERAM NOS ENROLAMENTOS H ₁ H ₃ E H ₁ H ₂ A 38,0% DO TERMINAL H ₃ E A 60,0% DO TERMINAL H ₂ RESPECTIVAMENTE; E NO TERMINAL H ₂ DO ENROLAMENTO H ₂ H ₃ .
		II	69,90	168,93	31,64	0,45	2,42	4,10	3,00	II	9,65	47,30	0,67	9,32	1289,69	18,44	10,20	3,20	0,05	2) OCORRENCIA DE DESCARGAS PARCIAIS NO ENROLAMENTO H ₁ H ₃ A 45,0% DO TERMINAL H ₃ , E NO TERMINAL H ₂ DOS ENROLAMENTOS H ₁ H ₂ E H ₂ H ₃ .
III	75	I	65,00	83,33	33,33	0,51	1,28	4,42	4,42	I	11,07	88,47	1,36	11,68	43,29	66,60	10,69			1) OCORRENCIA DE DESCARGAS PARCIAIS NO ENROLAMENTO H ₁ H ₃ A 54,0% DO TERMINAL H ₃ , E EM H ₂ DO ENROLAMENTO H ₂ H ₃ . PULSOS CORONA OCORRERAM NOS TERMINAIS H ₁ E H ₂ DO ENROLAMENTO H ₁ H ₂ .

TABELA I - CONTINUAÇÃO.

TRANSFORMADORES SOB ENSAIOS		CALIBRAÇÕES								ENSAIOS DE TENSÃO APLICADA									OBSERVAÇÕES		
										ENROLAMENTOS											
										H1 H3			H2 H3			H1 H2					
Nº	kVA	Nº	A	B	C	H = $\frac{C}{A}$	G = $\frac{B}{A}$	α_H	α_G	Nº	T.A	Vd / Vc	K = $\frac{(Vd / Vc)}{A}$	T.A	Vd / Vc	K = $\frac{(Vd / Vc)}{A}$	T.A	Vd / Vc	K = $\frac{(Vd / Vc)}{A}$		
IV	45	I	68,22	85,71	58,77	0,86	1,26	1,35	1,25	I	8,66			8,99	74,31	1,09	7,51				1) OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS NO ENROLAMENTO H2 H3 A 51,0% DO TERMINAL H3. DETEÇÃO DE PULSOS CORONA NO TERMINAL H1 DOS ENROLAMENTOS H1 H2 E H1 H3. 2) PULSOS CORONA OCORRERAM NOS TERMINAIS H1, H2, E H3.
		II	55,55	70,25	37,14	0,67	1,27	2,45	1,27	II	9,32 a 10,20						8,77				
V	45	I	81,84	203,04	47,69	0,58	2,48	3,00	3,00	I	7,95	519,68 622,66 871,60	6,35 8,10 10,65	8,34	80,20 412,47 1.066,38 1.599,97	0,98 5,04 13,03 19,55	8,00	385,47 569,61 1.062,28	4,71 6,96 12,98		1) DESCARGAS PARCIAIS OCORRERAM NO TERMINAL H1 E, A 87,0% E 94,0% DO TERMINAL H3 NO ENROLAMENTO H1 H3; NO TERMINAL H2 E A 49,0% E 81,0% DO TERMINAL H3 NO ENROLAMENTO H2 H3; NO TERMINAL H1 E A 20,0% E 11,0% DO TERMINAL H1 DO ENROLAMENTO H1 H2.
VI	45	I	75,24	186,36	43,43	0,58	2,48	3,00	3,00	I	10,47 kV	112,71	1,50	9,98	40,79	21,89	8,55	51,39	0,46	1) DESCARGAS PARCIAIS OCORRERAM NO TERMINAL H2 DO ENROLAMENTO H2 H3; NOS ENROLAMENTOS H1 H2 E H1 H3 A 37,0% E 57,5% DOS TERMINAIS H2 E H3 RESPECTIVAMENTE. 2) OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS NO TERMINAL H3 DO ENROLAMENTO H1 H3. NOS ENROLAMENTOS H1 H2 E H2 H3 NÃO FORAM DETETADAS DESCARGAS PARCIAIS.	
		II	69,66	180,98	29,75	0,43	2,60	4,20	3,10	II	8,88 kV	0,96	0,014	9,32			8,50				

R E F E R Ê N C I A S

- 1 - J. H. Mason, "Discharge Detection and Measurements". Proc. IEE, vol. 112, nº 7 july 1965, pp. 1407 -1423 .
- 2 - F. H. Kreuger, "Discharge Detection in high Voltage Equipment". Heywood and Co. 1964.
- 3 - G. Mole, "Basic Characteristics of Corona Detector Calibrators", IEE trans. Pas, Vol. 89, nº 2, feb 1970, pp. 198 - 212.
- 4 - E.M. Dembinski, J. L. Douglas, "Calibration and comparison of partial discharge and radio interference measuring circuits." sept. 1968, pps. 1332 -1340.
- 5 - L.V. BEWLEY, "Travelling Waves on Transmission Systems", Pts. 1 and 2. J. Wiley and sons, 1933.
- 6 - J. AUSTIN "Use of On-line Computers Techniques for Estimation of Partial Discharge Location in transformer windings".
- 7 - A. T. Thoeng "Some aspects of the Travelling Wave Detection Method for locating Partial Discharge in Transformers". CIGRE 1968, paper 12 - 02.
- 8 - S. HARALDSEN, K. WINBERG., "Investigations on Different Partial Discharge Location Methods on Power Transformers". CIGRE 1968, paper 12 - 09.

- 9 - R. T. HARROLD, A.M. SLETTEN, "Corona Location in Transformers by Radio Frequency Spectrum Analysis". IEE transf. PAS - 89, n^o 7, setemp./October, 1970 (pt.1) pp. 1584-1590.

- 10 - R. T. HARROLD, A. M. SLETTEN, "Corona Location in Transformers by Radio Frequency Spectrum Analysis". IEE Transf. Vol. PAS - 89, n^o september/october, 1970 (pt. 2). Pps. 1591 - 1602.