Campus de São Carlos

**"IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES DE SOBRETENSÕES
E SOBRECORRENTE EMPREGANDO A TECNOLOGIA DOS
ELETRETOS"**

Autora

ANNE ANNETE SILVA FAESARELLA

Orientador

Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES DE SOBRETENSÕES E
SOBRECORRENTES EMPREGANDO A TECNOLOGIA DOS
ELETRETOS**

ANNETE S. FAESARELLA

Orientador: Prof. Dr. RUY A. CORRÊA ALTAFIM

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017774

São Carlos

Agosto/95

Class.	Tese - EESC
Cod.	2036
Tombo	155/95

Eletividade

0742747

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do
Serviço de Biblioteca-EESC-USP

F149i Faesarella, Annete S.
Implementação de sensores de sobretensões e
sobrecorrentes empregando a tecnologia dos
eletretos / Annete S. Faesarella. -- São Carlos,
1995.

78p.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1995.
Orientador: Prof. Dr. Ruy A. Corrêa Altafim.

1. Sensor eletretos. 2. Sobretensões. 3.
Sobrecorrentes. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 30-8-1995
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM - Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor JOÃO SINÉZIO DE CARVALHO CAMPOS
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - Rio Claro)

Prof. Doutor DIOGENES PEREIRA GONZAGA
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. MOUNIR KHALIL EL DEBS
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação
em exercício

Coordenador da área - Engenharia Elétrica
Prof. Dr. GERALDO ROBERTO M. DA COSTA

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela orientação e pelo incentivo.

Ao Prof. Duílio Moreira Leite e ao Eng. Clóvis Kodaíra.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica pelo suporte físico e instrumental e ao Instituto de Elétrotécnica e Energia.

A todos os alunos de iniciação científica que contribuíram e muito na realização deste trabalho, em especial ao Benigno A. Gomez que auxiliou na parte computacional.

Aos meus irmãos Ivy, Paulo e Maíla e ao meu namorado Antonio Augusto.

A Capes pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho certamente não teria sido desenvolvido.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Luiz e
Maria Lélia, numa tentativa
de minimizar a ausência cau-
sada pela dedicação a este
trabalho.

ÍNDICE

	PÁGINA
Lista de Figuras	vi
Resumo	ix
Abstract	x
Capítulo I: Introdução	1
Capítulo II: Método de Medição de Tensões Impulsivas	3
2.1-"Lightining Current Detectors"-LCD	3
2.2-Centelhadores-"Spark-Gaps"	5
2.3-Oscilógrafo de "Creater-Lamp"	6
2.4-Osciloscópio de Raios Catódicos	6
2.5-"Klydonograph"	7
2.6-Elos Magnéticos	8
2.7-"Lightning Transient Surge Recorders"	9
2.8-Elos Fusíveis	10
Capítulo III: Eletretos	11
3.1-Introdução	11
3.2-Processos de Formação	12
3.2.1-Eletrização por Contato	13
3.2.2-Método Térmico de Carregamento	14
3.2.3-Método de Deposição de Cargas Isotérmicas	14
3.2.4-Carregamento com Contato Líquido	15
3.2.5-Penetração Parcial do Elétron e Feixes de Íons	16

3.2.6-Radiação Penetrante	17
3.2.7-Processo Fotoelétrico	17
3.2.8-Formação do Eletreto pelo Método das Tensões Impulsivas	18
3.3-Modelo Esférico	23
3.4-Modelo Cilíndrico	25
Capítulo IV: Sensor de Eletretos	27
4.1-Introdução	27
4.2-Processo de Calibração	30
4.2.1-Sensibilização do Sensor	31
4.2.2-Revelação da Área Carregada	34
4.2.3-Interpretação da Área Carregada	36
4.2.3.1-Programa Área	39
4.3-Resultados do Processo de Calibração do Sensor	41
Capítulo V: Detector dos Picos de Sobrecorrentes e Sobretensões de Eletretos	44
5.1-Introdução	44
5.2-Detector dos Picos de Sobretensões	45
5.2.1-Detector dos Picos de Sobretensões Aplicado a Redes Industriais e residenciais	46
5.2.2-Detector de Sobretensões em Linhas e em Redes de Distribuição de Energia	46
5.3-Detector de Picos de Sobrecorrentes	51
Capítulo VI: Conclusão	55
Referências Bibliográficas	57
Anexo A: Programa Área	60

LISTA DE FIGURAS

FIGURA Nº	PÁGINA
3.1- Diagrama esquemático do processo de formação de de eletretos por tensões impulsivas.	19
3.2- Formação de eletreto usando a configuração eletrodos esférico-planar.	23
3.3- Mapeamento do potencial de superfície de uma amostra de Teflon-FEP de 50 μm , carregada com eletrodos esférico-planar e submetida à diferentes tensões impulsivas.	25
4.1- Dependência do potencial de superfície V_s sobre a tensão de pico V_p para o sensor planar.	28
4.2.a- Sensor de eletretos esférico - fechado.	29
4.2.b- Sensor de eletretos esférico - aberto.	29
4.3- Forma de onda padrão de descargas atmosféricas.	31
4.4- Foto do gerador de impulso projetado no Departamento de Engenharia Elétrica.	32
4.5- Diagrama esquemático do gerador de impulso usado para a calibração do sensor.	33
4.6- Forma de onda produzida pelo gerador de impulso.	34
4.7- Bastidor sendo preparado para reter a mistura de toner e pó revelador.	35
4.8- Amostras reveladas após o processo xerográfico.	36

4.9-	Laboratório Portátil usado para a revelação da área carregada de uma amostra de eletreto sensibilizada.	37
4.10-	Equipamento usado para digitalizar as imagens.	38
4.11-	Tela gráfica do Programa Área.	40
4.12-	Área calculada entre eixos.	40
4.13-	Regressão Linear dos valores de Pico de tensão impulsiva (kV) versus Diâmetro da área carregada (mm) para o eletrodo de 25 mm.	41
4.14-	Regressão Linear dos valores de Pico de tensão impulsiva (kV) versus Diâmetro da área carregada (mm) para o eletrodo de 25 mm (até 3 kV).	42
4.15-	Regressão Linear dos valores de Pico de tensão impulsiva (kV) versus Diâmetro da área carregada (mm) para o eletrodo de 50 mm.	43
5.1-	Diagrama esquemático do divisor capacitivo acoplado ao sensor de eletretos.	47
5.2-	Dimensões físicas do capacitor de baixa tensão de Teflon-FEP.	48
5.3-	Detector de sobretensões para classe de 50 kV.	50
5.4-	Detalhe do sensor de eletretos posicionado no detector de sobretensões.	50
5.5-	Diagrama esquemático da instalação dos detectores de sobrecorrentes.	52
5.6-	Detector de picos de sobrecorrentes.	53

5.7- Resultado do ensaio comparativo entre o "shunt" - Haefely e o elemento resistivo desenvolvido. Curva A: Tensão fornecida pelo Haefely; Curva B: Tensão fornecida pelo elemento resistivo.

RESUMO

Os detectores de pico de sobretensões e sobrecorrentes encontram aplicação no estudo do comportamento dos sistemas elétricos face às solicitações impulsivas.

Neste trabalho apresentam-se a implementação, calibração e desenvolvimento de infra-estrutura computacional para detectores de sobrecorrentes e sobretensões baseados na tecnologia dos eletretos.

Também são discutidas sua implementação no campo e trabalhos futuros.

ABSTRACT

Overvoltages and overcurrents surge detectors find applications in the study of the behaviour of electric systems to face the impulsive requests.

This work introduces the implementation, the calibration tests and the development of the computer structure for overvoltage and overcurrent peaks detectors, based on electrets technology.

Also, this text describes their implementation on field and future works.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A busca por uma melhor qualidade no fornecimento de energia pelas concessionárias e de uma melhor qualidade na transmissão de sinais nas comunicações tem contribuído significativamente para enfatizar os estudos das descargas atmosféricas. Atualmente, estes estudos concentram-se num melhor entendimento do processo de formação dos raios, no modelamento matemático das descargas atmosféricas, na determinação da correta localização destas (Sistemas de Localização de Raios), nas tensões induzidas por elas nas linhas de transmissão, de distribuição e de comunicação, e na determinação da intensidade, da probabilidade de ocorrência e da forma de onda de suas correntes. Técnicas de gravação digital e outros métodos computacionais têm sido empregados na medição das intensidades e formas de ondas das altas correntes que surgem nas linhas.

Esta dissertação tem como interesse principal a implementação de detectores de eletretos dedicados a medir os valores de pico das sobretensões e sobrecorrentes induzidas por raios. A parte fundamental desses detectores é um sensor de eletreto esférico-planar formado por tensões impulsivas.

Eletretos são dielétricos que, uma vez carregados, podem reter sua carga

por longos períodos (centenas de anos). Entre os muitos materiais usados como eletreto, o Teflon-FEP negativamente carregado tem demonstrado ser o mais estável, possuindo uma vida útil da ordem de décadas[1].

No capítulo II, para melhor caracterizar o uso e importância dos detectores desenvolvidos, foi feita uma pesquisa bibliográfica das diferentes técnicas de detecção das sobrecorrentes e sobretensões já implementadas.

No capítulo III, visando uma melhor compreensão da formação dos eletretos e do dispositivo sensor de tensões neles baseado, fez-se uma abordagem dos diferentes processos de formação, com ênfase ao processo de formação por tensões impulsivas.

No capítulo IV foram descritos, o sensor de eletretos, seu processo de calibração, os resultados obtidos e as curvas de calibração do sensor.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES IMPULSIVAS

Neste capítulo encontra-se descrito o estado da arte dos dispositivos utilizados para medição de valores de pico de tensões impulsivas e valores de crista de correntes impulsivas.

2.1 "LIGHTNING CURRENT DETECTOR"-LCD

Segundo Crouch[2], o "Lightning Current Detector " - LCD foi desenvolvido pela NASA- National Aeronautics and Space Administration, em 1976, para detectar altas correntes em linhas de distribuição e transmissão de energia. Este sensor consiste basicamente em uma fita magnética do tipo cassete, usada em gravadores convencionais, previamente gravada com um sinal de frequência e nível conhecidos. Quando o LCD é colocado próximo a um condutor, por onde estão passando altas correntes, o campo magnético ao redor do condutor pode modificar a orientação dos

domínios magnéticos da fita, apagando uma parte do sinal previamente gravado.

A intensidade de campo magnético H ao redor de um condutor energizado é proporcional à distância radial (r) e à corrente (i), assim tem-se:

$$H = \frac{i}{2\pi r} a_{\phi} \quad (1)$$

onde a_{ϕ} é o versor na direção do crescimento do ângulo ϕ , em coordenadas cilíndricas, tendo o eixo do condutor como eixo z .

Assim, quando a fita magnética estiver posicionada ao longo da distância radial de um condutor, ficará submetida a um campo transversal que provocará um apagamento diretamente proporcional à corrente transportada pelo condutor. Testes em laboratórios mostraram que o apagamento é linear em relação ao pico das altas correntes.

Um dos problemas deste sensor é a proximidades de outros condutores, pois as correntes nestes condutores podem falsear as medições. Esse efeito pode ser minimizado mantendo-se uma distância de pelo menos 25 pés (8,25 metros) entre o condutor monitorado pelo LCD e os demais. A medição da extensão apagada da fita magnética é feita após esta ter sido retirada do condutor e ser levada para um laboratório, onde é reproduzida e o sinal apagado é detectado por um aparelho gravador. A precisão das medidas efetuadas está diretamente relacionada com a qualidade do conjunto fita-gravador.

Normalmente, com o uso do LCD, as altas correntes podem ser medidas com precisão em torno de 5 % a 10 %.

2.2 CENTELHADORES-"SPARK GAPS"

Os dispositivos "Spark Gaps" foram um dos primeiros usados para detectar sobretensões em sistemas elétricos. Eles consistem em pequenos centelhadores esféricos colocados em paralelo com diferentes espaçamentos. A detecção das sobretensões é feita por meio de uma folha de papel introduzida no interstício dos centelhadores. Quando uma sobretensão de valor superior à tensão de ruptura de um dos centelhadores for aplicada ao conjunto, ocorrerá uma faísca elétrica que irá produzir uma pequena marca na folha de papel. O valor de pico da sobretensão será detectado pela posição dessa marca. Quanto maior a sobretensão maior o número de centelhadores disparados.

Para evitar-se o curto-circuito de todos os centelhadores quando um deles for disparado, coloca-se em série com cada um dos centelhadores um resistor de alto valor. Contudo, um dos principais problemas deste sensor é que não dispõe de nenhum mecanismo para extinguir o arco elétrico uma vez iniciado. Quando o sensor opera, necessariamente o dispositivo que protege a linha, a exemplo do disjuntor, terá que atuar.

Peek[3] montou um dispositivo com centelhadores esféricos e eletrodos do tipo agulha para obter uma indicação da forma de onda da tensão, baseando-se na consideração de que diferentes geometrias

de eletrodos apresentavam, para uma tensão com forma de onda definida, diferentes tensões de ruptura.

As principais objeções impostas ao seu uso foram, o longo tempo de resposta, a indicação de apenas um único valor, a alteração de sua calibração com as condições atmosféricas e sua interferência nos sistemas elétricos.

2.3 OSCILÓGRAFO DE "CREATER-LAMP"

Segundo Hagenguth[4], o oscilógrafo de "creater-lamp" é um oscilógrafo ótico, que usa um galvanômetro de ímã permanente com um espelho como meio de deflexão, um tubo de gás "neon creater-lamp" como fonte de luz e um filme fotográfico com rotação contínua.

Para evitar uma superposição do números de raios registrados durante uma tempestade, o galvanômetro foi montado sobre uma placa giratória.

A resposta do mecanismo é menor que $20\mu s$, o que o torna eficiente somente para registro de correntes de baixa amplitude e longa duração.

Quando se trata de correntes com frentes de ondas ríspidas, os dados obtidos são apenas qualitativos.

2.4 OSCILOSCÓPIO DE RAIOS CATÓDICOS

Os tubos de raios catódicos passaram por vários melhoramentos desde o seu surgimento, em 1897 e foram usados por

Dufour[5] para construir o primeiro osciloscópio capaz de registrar transientes. Acoplado a uma câmara fotográfica, o osciloscópio foi usado para estudar o comportamento de descargas artificiais aplicadas em uma linha experimental de 8 km, pertencente à Dusquesne Light Company dos Estados Unidos em 1926.

O acoplamento de um osciloscópio para a medição das correntes foi efetuado por meio de resistores "shunt" ou transformadores de pulso.

Nos dias atuais, o osciloscópio de raios catódicos está sendo gradativamente substituído por modernos osciloscópios digitais com melhores amostragens. Contudo, por terem um custo elevado, esses equipamentos somente são usados nas estações captoras, onde, aliados a computadores, tornam possível tanto o registro quanto o processamento das formas de onda das altas correntes.

2.5 "KLYDONOGRAPH"

O registro de surtos de tensão em linhas de transmissão sempre foi uma das principais preocupações dos pesquisadores. No final de 1923, J.F. Peters[6] desenvolveu o Klydonograph, um aparelho, baseado nas figuras de Lichtenberg, que registra transientes de tensão.

Em 1777, o Dr. G.C.Lichtenberg observou a formação de estranhas figuras a partir do descarregamento de um capacitor sobre um conjunto composto por um terminal em contato com uma placa de material isolante, do tipo ebonite recoberta com uma fina camada de enxofre e por uma placa metálica aterrada.

Estas figuras foram denominadas figuras de Lichtenberg.

Em 1888, J. Brown e E. Trouvelot descobriram que estas figuras poderiam ser reproduzidas substituindo-se a chapa isolante por uma chapa fotográfica e colocando-se todo o conjunto numa câmara escura.

Inúmeras experiências mostraram que a amplitude da tensão era proporcional ao comprimento das figuras e que a tensão mínima crítica necessária para produzir uma figura era de 2 kV.

As figuras apresentavam-se como ramificações, ou linhas provindas uniformemente do centro, mantendo esta forma para tensões de até 18 kV. Para tensões maiores, ocorria uma faísca visível sensibilizando inteiramente a chapa fotográfica.

Observou-se uma grande diferença entre as figuras produzidas por potenciais positivos e negativos. As produzidas por ondas de polaridade positiva mostravam-se duas vezes maiores que as figuras produzidas por ondas de polaridade negativa[7].

O desenvolvimento do Klydonograph em 1924 por M.J.F.Peters, veio trazer respostas às questões sobre surtos em sistemas de transmissão de energia elétrica. Porém, um de seus maiores problemas era a precisão, onde erros de até 30 % poderiam ser cometidos.

2.6 ELOS MAGNÉTICOS

Peças magnéticas quando colocadas nas proximidades de condutores por onde passam altas correntes elétricas, ficam

magnetizadas por longos períodos. Como a corrente elétrica é diretamente proporcional ao campo elétrico, Pockels[1], em 1918, teve a idéia de colocar pequenas peças de basalto nas proximidades dos condutores e com isso detectar o valor da intensidade da corrente. Esse sistema rudimentar foi logo abandonado devido a sua imprecisão. No entanto, Foust e colaboradores[3, 8, 9], no período de 1932 a 1935, resgataram a antiga idéia e desenvolveram os elos magnéticos. Os elos magnéticos são pequenas lâminas de aço-cobalto temperado, colocadas em invólucros isolantes. Quando posicionados a distâncias fixas nas torres de transmissão, ficam magnetizados com a passagem de uma sobrecorrente. Levados a um laboratório, podem ter sua magnetização medida por galvanômetros balísticos que fornecem de maneira direta e com um alto grau de precisão as correntes geradoras do campo remanescente.

Estes dispositivos são comumente usados, ainda hoje, na medição das altas correntes, a exemplo do projeto desenvolvido pela CEMIG-Companhia Energética de Minas Gerais, no morro do Cachimbo.

2.7 "LIGHTNING TRANSIENT SURGE RECORDERS" (LTSR)

O registrador de transientes LTSR é um dispositivo que possibilita registrar não só as formas de onda das correntes das descargas atmosféricas como também seu valor de pico. A captação do sinal de corrente, das linhas, é efetuada por uma bobina de

Rogoswski e o sinal é digitalizado e processado eletronicamente.

Todas as informações são registradas em um gravador cassete convencional. No campo, este equipamento apresenta problemas de manutenção e de calibração. Um de seus limitantes é o custo elevado, que o torna proibitivo para a instalação em grandes quantidades[10].

2.8 ELOS FUSÍVEIS

Elos fusíveis de diferentes tamanhos, devidamente calibrados e conectados em paralelo, permitem determinar aproximadamente a integral no tempo do quadrado da corrente da descarga, observando-se o maior elo fundido.

Este princípio foi empregado nas primeiras medições nas estações captoras, mas atualmente, a existência de equipamentos modernos torna este método obsoleto[1].

CAPÍTULO III

ELETRETOS

Os eletretos, tema principal deste trabalho, serão melhor descritos neste capítulo, visando formar uma clara idéia dos processos de formação.

Será dada ênfase ao processo de formação de eletretos por tensões impulsivas.

3.1 INTRODUÇÃO

Várias são as definições para os eletretos. Lapades[11] define o eletreto como sendo um dielétrico sólido que tem um processo de polarização elétrica persistente em virtude de uma grande constante de tempo para o decaimento da carga. Para Tareev[12], um eletreto é entendido como um corpo composto de um dielétrico, o qual preserva sua polarização por um longo tempo, mesmo depois que o campo elétrico externo produtor da polarização, tenha sido removido. Um eletreto estabelece um campo elétrico contínuo, por um longo tempo, da mesma forma que um ímã permanente estabelece um campo magnético contínuo.

Segundo Cooke e Markus[13], um eletreto é formado quando uma amostra aquecida de material dielétrico fica submetida a um forte campo elétrico enquanto esfria. Alguns tipos de cerâmicas, ceras (como a de carnaúba) e, certamente, outras misturas orgânicas tornam-se eletretos por este método.

3.2 PROCESSOS DE FORMAÇÃO

As técnicas de polarização dos eletretos estão sendo continuamente aperfeiçoadas. Atualmente, densidades de carga de até 10^{-6} C/cm² são facilmente depositadas, produzindo eletretos com tempos de vida que podem chegar a centenas de anos.

Dentre os materiais dielétricos destacam-se os polímeros, tais como o polifluoreto de vinilideno (PVDF), polietileno e fluorados como o Teflon-FEP, polifluoretileno propileno e Teflon-PTFE-politetrafluoretileno, que, além de apresentarem excelentes propriedades isolantes, podem ser fabricados com espessuras de 10µm a 50µm[1].

Há basicamente dois métodos de formação dos eletretos, os formados por depósito ou excesso de cargas e os formados por polarização dielétrica.

O carregamento de eletretos por excesso de cargas é realizado principalmente por injeção (ou deposição) de portadores de carga, por meio de descargas elétricas, feixe de íons e eletrização por contato.

Eletretos dipolares são formados de substâncias que possuem momentos dipolares permanentes[19]. Os momentos dipolares podem ser intrínsecos aos materiais (ácidos carboxílicos) ou podem ser artificialmente induzidos. Nestes materiais, a polarização é feita pela aplicação de um campo elétrico no material, na temperatura ambiente ou em uma temperatura decrescente de um valor superior à do ambiente.

A orientação dipolar também tem sido realizada pelo carregamento por corona. Neste caso a orientação é causada pelas cargas depositadas.

O carregamento máximo do eletreto deve-se à espessura da amostra e é limitado pelas rupturas interna e externa. A ocorrência da ruptura interna depende principalmente da rigidez dielétrica do material. Nos polímeros, a rigidez dielétrica é elevada, da ordem de MV/cm (para o Teflon-FEP é de aproximadamente $2,2 \times 10^6$ V/cm), o que torna difícil a ocorrência da ruptura interna.

A situação é diferente em relação à ruptura externa. Esta ocorre quando a tensão através do "gap" de ar (entre a face não metalizada do eletreto e o eletrodo) atinge um valor determinado pela geometria dos eletrodos, composição do gás e pressão. Este fenômeno é chamado de ruptura reversa de Paschen porque a ruptura ocorre quando a tensão no "gap" de ar excede a curva de Paschen[14].

Nos itens subseqüentes serão melhor descritos alguns dos processos de formação dos eletretos.

3.2.1 ELETRIZAÇÃO POR CONTATO

A eletrização por contato é definida como carregamento de dois

dielétricos em contato um com o outro. É uma superposição do efeito causado pela fricção de dois pedaços de mesmo material e um efeito de equilíbrio entre eles. Este método não tem sido muito usado por causa da fraca reprodutibilidade[14].

3.2.2 MÉTODO TÉRMICO DE CARREGAMENTO

O método térmico de carregamento é usual na formação de eletretos dipolares. Os materiais, como por exemplo as ceras, são aquecidos até o ponto de fusão e submetidos a um campo elétrico por alguns minutos. Depois, eles são lentamente esfriados ainda na presença deste campo.

Os eletretos formados por este processo denominam-se termoeletretos e possuem cargas com sinais opostos aos dos eletrodos, ou seja, são formados por heterocargas[14].

3.2.3 MÉTODO DE DEPOSIÇÃO DE CARGAS ISOTÉRMICAS

O método de deposição de cargas isotérmicas caracteriza-se pela injeção de cargas em um dielétrico é por meio de um bombardeio do material dielétrico por uma descarga por corona, no ar, ou por feixe de elétrons, no vácuo.

Na descarga por corona[14] é gerado um alto campo elétrico não homogêneo pela aplicação de alta tensão entre um eletrodo superior em forma de ponta, localizada a uma certa distância do dielétrico, e um eletrodo inferior.

Se o eletrodo superior estiver com polaridade negativa, como

geralmente ocorre no carregamento do Teflon-FEP, os portadores negativos fluirão para o dielétrico. No ar e à pressão atmosférica, estes portadores são os íons CO^{-3} , que, devido a sua pequena energia térmica, acabam sendo depositados na superfície do material.

A penetração das cargas na amostra depende da polaridade, de sua densidade e das características superficiais do próprio material isolante.

No Teflon-FEP, por exemplo, cargas negativas penetram muito pouco, enquanto uma penetração substancial é observada para cargas positivas no mesmo material.

Os métodos de deposição de cargas têm ganhado muita importância devido ao fato de filmes de polímeros poderem ser carregados de uma forma fácil e rápida, o que torna o potencial de superfície do eletreto possível de ser controlado pela tensão de uma grade existente entre eletrodo superior e o dielétrico, podendo obter-se amostras dielétricas com potencial de superfície de algumas centenas de volts.

As vantagens do carregamento por corona estão na simplicidade para o estabelecimento do processo e na velocidade de carregamento.

3.2.4 CARREGAMENTO POR CONTATO LÍQUIDO

O carregamento por contato líquido baseia-se no uso de uma pequena quantidade de líquido para fornecer o contato entre o eletrodo e a superfície do dielétrico. Normalmente, emprega-se um filme de polímero com um dos lados metalizado. O lado não metalizado fica em contato com um líquido que pode ser água ou álcool etílico ou HCl. A este conjunto

aplica-se uma diferença de potencial, fazendo com que ocorra transferência de cargas do líquido para o filme de polímero. As vantagens deste método são a simplicidade, o controle da densidade de carga inicial pela tensão aplicada e uma distribuição uniforme de cargas.

3.2.5 PENETRAÇÃO PARCIAL DO ELÉTRON E FEIXES DE ÍON

A penetração parcial do elétron e feixes de íon consiste na injeção de feixes de partículas monoenergéticas em um dielétrico. Em dielétricos finos, os feixes são de baixa energia e todo o processo é realizado no vácuo.

Quando a superfície de uma amostra dielétrica é atingida pelo feixe de elétrons, ocorre a emissão de alguns elétrons secundários, carregando positivamente uma camada da superfície. A produção da emissão secundária de elétrons, definida como a razão do número de elétrons emitidos pelo número de elétrons primários, depende da energia do elétron e das propriedades da superfície do material[14]. Esta emissão causa uma Condutividade Induzida por Radiação-RIC de magnitude maior que a condutividade intrínseca do material. Devido às colisões, os elétrons primários são totalmente capturados, formando inicialmente uma distribuição de cargas negativas ao redor da extensão média da amostra.

Em amostra com um dos lados metalizado, o campo elétrico é direcionado para o eletrodo. Deste modo a maior parte dos elétrons penetram nas regiões onde a RIC é grande o bastante para permitir o movimento interno de elétrons ou o movimento externo de buracos, fora da superfície média.

Este processo é finalizado em alguns minutos, após o término do carregamento.

A carga armazenada terá grande uniformidade se o feixe de elétrons for uniforme. Outra vantagem deste processo é o completo controle sobre a deposição, sobre a distribuição e sobre a densidade de cargas.

3.2.6 RADIAÇÃO PENETRANTE

Neste método aplica-se tensão no dielétrico e uma radiação incide sobre ele. Esta radiação pode ser de um acelerador de partículas, de uma máquina de raios X, γ ou β ou de uma fonte radioativa. Após a exposição do dielétrico a uma certa dose de radioatividade, a fonte emissora é desligada e a tensão removida.

A amostra resultante deste processo exibe propriedades comuns aos eletretos e é chamada de radioeletreto.

O carregamento é esclarecido quando o processo de ionização molecular é conhecido. A radiação produz pares elétron-buraco que se movem na presença do campo aplicado pelos eletrodos, ocasionando uma separação de cargas.

Os eletretos produzidos por este método não são tão estáveis quanto os produzidos por outros.

3.2.7 PROCESSO FOTOELÉTRICO

Materiais fotocondutores quando revestidos por eletrodos transparentes, submetidos à uma diferença de potencial e irradiados com

luz ultravioleta ou visível, carregam-se pelo processo fotoelétrico.

Terminada a irradiação e removido o campo elétrico, é encontrada no dielétrico uma forte e permanente polarização. O material daí resultante chama-se fotoeletreto.

A polarização é atribuída à geração de portadores pela luz irradiada, a qual deve possuir energia suficiente para remover os elétrons de sua banda de valência, criando pares elétron-buraco. Assim, estes portadores livres, sob a ação do campo elétrico podem mover-se para uma das extremidades do material.

3.2.8 FORMAÇÃO DO ELETRETO PELO MÉTODO DAS TENSÕES IMPULSIVAS

A formação de eletretos por tensões impulsivas foi desenvolvida por Altafim e colaboradores[15].

Neste método, um filme dielétrico é posicionado entre dois eletrodos planares, de maneira que um dos eletrodos fique diretamente em contato com o dielétrico e o outro fique separado deste por um interstício de ar. Quando uma tensão impulsiva é aplicada ao conjunto, uma descarga elétrica é produzida e cargas elétricas são transferidas do eletrodo superior para o dielétrico. As cargas ficam ali retidas por armadilhas energéticas, formando o eletreto.

Em medições realizadas com Teflon-FEP, percebeu-se uma deposição uniforme de cargas elétricas e um aumento linear do potencial de superfície com relação à tensão de pico aplicada.

Este método pode ser melhor compreendido, através do diagrama esquemático da figura 3.1, onde:

ϵ = permissividade do dielétrico;

ϵ_0 = permissividade do ar;

$\sigma(t)$ = densidade de carga da superfície do eletreto;

$V_l(t)$ = potencial na superfície do eletreto;

$V_g(t)$ = queda de potencial do "gap" de ar;

$V(t)$ = tensão aplicada

FIGURA 3.1 Diagrama esquemático do processo de formação de eletretos por tensões impulsivas[15].

Quando uma tensão impulsiva de polaridade negativa $V(t)$, é produzida por um gerador de impulso e aplicada nos eletrodos, a diferença de potencial $V_g(t)$ através do "gap" de ar aumenta com o tempo até

alcançar um valor crítico V_c . Uma descarga elétrica é produzida e os portadores negativos são transferidos do eletrodo superior para a superfície do dielétrico, onde são armazenados para formar o eletreto.

Para uma dada densidade de carga σ_0 no eletreto, a diferença de potencial $V_g(t)$ através do "gap" de ar é dada por:

$$V_g(t) = V(t) - V_l(t) = \frac{\frac{\epsilon V(t)}{L} - \sigma_0}{\frac{\epsilon_0}{d} + \frac{\epsilon}{L}} \quad (2)$$

onde L é a espessura do dielétrico e d é a espessura do "gap" de ar.

Assumindo que a densidade de carga transferida alcança seu valor máximo σ_m quando $V(t)$ alcança seu valor de pico V_p , e que a transferência de carga ocorre somente quando V_g é ligeiramente alto, então, da equação (2) tem-se:

$$V_c = V_p - V_l = \frac{\frac{\epsilon V_p}{L} - \sigma_m}{\frac{\epsilon_0}{d} + \frac{\epsilon}{L}} \quad (3)$$

ou seja:

$$\sigma_m = \epsilon \frac{V_p}{L} - V_c \left(\frac{\epsilon_0}{d} + \frac{\epsilon}{L} \right) \quad (4)$$

Usualmente, a densidade de carga do eletreto é determinada pela medição do potencial correspondente da superfície V_s em circuito aberto. Este valor está relacionado com σ_m por:

$$V_s = \sigma_m \frac{L}{\epsilon} \quad (5)$$

Assim, das equações (4) e (5) tem-se:

$$V_s = V_p - V_c \left(1 + \frac{\epsilon_0 L}{d \epsilon} \right) \quad (6)$$

fazendo-se:

$$V_c'' = V_c \left(1 + \frac{\epsilon_0 L}{\epsilon d} \right) \quad (7)$$

tem-se:

$$V_s = V_p - V_c'' \quad (8)$$

Esta equação descreve o resultado final do processo de carregamento, ou seja, o máximo potencial de superfície final, para uma dada tensão de pico V_p . O termo V_c'' é identificado como a tensão limiar para o processo de carregamento.

Todo o processo de carregamento pode ser assim sintetizado. Quando uma tensão impulsiva de polaridade negativa $V(t)$ é aplicada aos eletrodos, a diferença de potencial $V_g(t)$ aumenta com o tempo até alcançar um valor crítico V_c , produzindo uma descarga elétrica. O fenômeno persiste até a tensão de pico ser atingida e o potencial de superfície ser igual ao indicado pela equação (8).

Cabe ressaltar que as cargas injetadas no dielétrico são da mesma polaridade que aquelas existentes no eletrodo, o que indica a formação do eletreto por homocargas[1]. Deste modo, cargas negativas passarão a ser transferidas para a superfície do dielétrico, formando o eletreto.

Testes iniciais utilizando eletrodos planares, foram feitos com o filme de TEFLON-FEP de 50 μ m de espessura, com um dos lados metalizado e uma tensão de impulso com forma de onda descrita por:

$$V(t) = V_m (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}) \quad (9)$$

onde V_m é relativo à tensão de pico V_p ; $\beta_1 = 1,47 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ e $\beta_2 = 2,09 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.

O tempo de subida de $V(t)$, que é o intervalo de tempo entre a origem da sobretensão e o instante em que ela alcança seu valor máximo, e o tempo de meia cauda, que é o tempo de decréscimo do valor máximo da sobretensão até a metade do valor da cauda, são respectivamente iguais a $1,2 \mu\text{s}$ e a $50 \mu\text{s}$. Os resultados confirmaram a equação (9) e mostraram que a densidade máxima de carga está associada à ruptura reversa de Paschen, fornecendo para o máximo valor da tensão de superfície V_s o valor de $2 V_c$ [15].

3.3 MODELO ESFÉRICO

O eletrodo superior planar da figura 3.1 pode ser substituído por um eletrodo esférico, encostado ou não na amostra, como o representado na figura 3.2.

FIGURA 3.2 Formação de eletreto usando a configuração eletrodos esférico-planar[18].

Esta configuração apresenta, no entanto, uma distribuição de cargas não uniforme, semelhante a cones com o topo deformado, como ilustra a figura 3.3. Esta distribuição pode ser determinada pelo processo de mapeamento do potencial de superfície por meio de um eletrômetro eletrostático com sonda de varredura.

O caráter aleatório das deformações nas extremidades superiores dos cones também é explicado pela ruptura reversa de Paschen.

Neste caso, a distância do eletrodo superior d é variável e em diferentes regiões ocorrerá a ruptura reversa. Esta ruptura irá descarregar a amostra e neste caso, deformará aleatoriamente o topo do cone.

Um ponto muito interessante deste processo é que o diâmetro da base do cone se mostra extremamente estável e correlaciona-se com a tensão de pico.

A curva que relaciona o diâmetro da base do cone à tensão de pico, na configuração esférico-planar, aproxima-se de uma curva exponencial.

No gráfico da figura 3.3, podem ser vistos três mapeamentos de potencial de superfície para uma amostra de Teflon-FEP de 50 μm de espessura, sendo que cada um deles refere-se a um determinado valor de tensão impulsiva.

Nota-se que o limite superior da faixa de leitura pode ser ampliado até o valor de tensão correspondente à ruptura dielétrica do material isolante.

Nota-se também que o uso de esferas de maiores diâmetros possibilita o registro, com maior sensibilidade, das tensões de pico mais elevadas[1].

FIGURA 3.3 Mapeamento do potencial de superfície de uma amostra de Teflon-FEP de $50 \mu\text{m}$, carregada com eletrodo esférico-planar e submetida a diferentes tensões impulsivas[1].

3.4 MODELO CILÍNDRICO

De acordo com a abordagem feita por Altafim[1] na configuração de eletrodos cilíndrico-planar, pode-se definir uma distância δ como sendo a largura média da área do carregamento da superfície do eletreto, na direção do eixo axial. Esta distância também correlaciona-se com a tensão de pico na forma de uma exponencial. Contudo, esta configuração apresenta um grande problema, qualquer modificação do eixo axial pode causar erros de interpretação quando se usa o processo de mapeamento por eletrômetro de varredura.

Neste caso é possível a solução do problema da determinação da distância média δ dispensando-se o uso do eletrômetro eletrostático de varredura e utilizando-se do processo xerográfico. Determinando-se assim, o diâmetro da área carregada do eletreto, o parâmetro δ desejado.

CAPÍTULO IV

SENSOR DE ELETRETOS

Serão descritos, neste capítulo o sensor de eletretos e seu processo de calibração. Serão também apresentados os resultados obtidos e as curvas de calibração.

4.1 INTRODUÇÃO

Estudos têm mostrado que o processo de formação de eletretos também pode ser utilizado como sensor de tensões impulsivas por apresentar uma excelente correlação linear entre o pico das tensões impulsivas e a carga armazenada, na configuração planar e entre a tensão de pico e a área carregada, nas configurações esféricas ou cilíndricas.

Na geometria planar, mostrada na figura 3.1, a tensão de pico apresenta uma correlação linear descrita na figura 4.1. Esta geometria torna-se muito difícil de ser empregada como sensor por apresentar um processo de saturação para tensões superiores a 1,8 kV, o que reduz muito a faixa de atuação do sensor.

Nas geometrias cilíndricas ou esféricas, o limitante de saturação não

existe mas, em contrapartida, a linearidade e sensibilidade do sensor são reduzidas. O limitante, nestas geometrias, é apenas a rigidez dielétrica do material isolante.

FIGURA 4.1 Dependência do potencial de superfície V_s sobre a tensão de pico V_p para o sensor planar[15].

Estes dois novos problemas não são significativos para o propósito de medição de tensões e correntes impulsivas. Muito mais do que em valores reais e exatos, o interesse está na ordem de grandeza dos valores envolvidos. Erros de até 10 % são plenamente aceitáveis.

Assim, o sensor com eletrodos esféricos foi adotado no trabalho.

Este sensor é constituído de um eletrodo superior esférico, de um eletrodo inferior de forma planar e um bastidor contendo filme de Teflon-FEP, com um dos lados metalizado.

Nas figuras 4.2a e 4.2b, pode-se observar a geometria do sensor montado.

Todo o conjunto é submetido a um invólucro que o protege de umidade e que permite a utilização do sensor no campo.

FIGURA 4.2.a *Sensor de eletretos esférico- fechado;*

Uma tensão impulsiva negativa aplicada a este conjunto, provoca a sensibilização e armazenamento das cargas elétricas na folha de Teflon-FEP.

Isto ocorre normalmente por ocasião de uma sobretensão que atinge os sistemas elétricos. As cargas elétricas armazenadas no evento irão possibilitar a obtenção dos valores estatísticos da sobretensão ocorrida.

FIGURA 4.2.b *Sensor de eletretos esférico- aberto.*

A informação sobre os níveis de sobretensão pode ser obtida por meio do mapeamento do potencial de superfície, sendo este mapeamento feito por um eletrômetro eletrostático com sonda de varredura ou por meio de um método semelhante ao processo xerográfico.

Para que este conjunto possa ser utilizado como sensor é necessário que seja devidamente calibrado.

4.2 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

O processo de calibração compõe-se basicamente das fases de sensibilização do sensor, da revelação da área carregada e da determinação do valor da sobretensão. Os ensaios realizados para a calibração do sensor de

eletretos foram feitos numa temperatura média de 19°C, com 63 % de umidade relativa do ar e à uma pressão de 690 mmHg.

4.2.1 SENSIBILIZAÇÃO DO SENSOR

Para simular as reais condições atmosféricas no campo, foram empregados em todos os ensaios tensões impulsivas de polaridade negativa.

Estas tensões impulsivas simulam, em laboratório, as descargas atmosféricas que ocorrem com maior incidência nos sistemas elétricos[20]. A forma padrão destas ondas encontra-se na figura 4.3, onde T_1 é denominado tempo de frente da onda, com valor aproximadamente igual à $1.2\mu s$ e T_2 , tempo de meia onda, com valor de aproximadamente $50\mu s$.

0101173

FIGURA 4.3 Forma de onda padrão de descargas atmosféricas[17].

Um gerador de impulsos, mostrado na figura 4.4, projetado e construído no Laboratório de Alta Tensão (LAT) do SEL da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, foi o equipamento usado para produzir estas tensões impulsivas.

FIGURA 4.4 Foto do gerador de impulso projetado no Departamento de Engenharia Elétrica.

Os valores de pico das tensões impulsivas gravadas no laboratório podem variar de 800 V à 6 kV. Seu diagrama esquemático é apresentado na figura 4.5.

Este gerador pode produzir tanto tensões negativas quanto positivas. Como fonte de alimentação contínua foi utilizada uma fonte e alta tensão de alta precisão, marca Spellman.

FIGURA 4.5 Diagrama esquemático do gerador de impulso usado para a calibração do sensor.

O sistema de disparo deste gerador foi feito por aumento de tensão em um "gap" de ar de dois eletrodos esféricos. Este sistema de disparo não é muito adequado para esta classe de tensão por apresentar muitos ruídos na frente da onda. Contudo, como o objetivo do trabalho é registrar apenas os valores de pico, este problema não foi levado em conta no sistema de calibração.

O sistema de medição foi composto por uma ponta de prova da Tektronix - modelo P6015 (classe de impulso até 30 kV e frequência de 15 MHz) acoplada a um osciloscópio de memória Kikusui - modelo 7101A.

As formas de onda deste gerador são similares às aquelas ilustradas no oscilograma da figura 4.6. Embora não apareçam na figura, estas formas apresentam algumas oscilações na frente de onda como já foi relatado.

A cauda está dentro do especificado em norma.

FIGURA 4.6 *Forma de onda produzida pelo gerador de impulso*

4.2.2 REVELAÇÃO DA ÁREA CARREGADA

Nesta etapa, o filme de Teflon-FEP, colocado em um bastidor de alumínio, encontra-se sensibilizado. Ele é retirado da câmara de sensibilização interna ao gerador de impulso e transferido para o sistema revelador. Lá, ele é colocado em um orifício-suporte situado na superfície de um recipiente cilíndrico. O recipiente tem em sua base, um ventilador que agita uma mistura de toner e pó revelador para aderí-la ao eletreto. A mistura de toner e pó foi devidamente preparada para que apenas as partes não carregadas a retenham. Na figura 4.7, observa-se o detalhe do bastidor, contendo uma amostra de Teflon-FEP carregada, sendo colocado no orifício-suporte.

Deste modo, tem-se a parte carregada pela descarga elétrica no eletreto evidenciada pelo toner. Apesar de ser visualizada, esta área ainda não pode ser medida, porque qualquer toque ou giro no bastidor pode redistribuir a mistura e falsear as medições.

O passo seguinte é transferir a informação do eletreto para um papel, o que é feito colocando-se o bastidor de eletreto em um suporte inferior de uma prensa para que este seja prensado a outro bastidor localizado em sua parte superior. O segundo bastidor contém papel vegetal umedecido com silicone.

FIGURA 4.7 *Bastidor sendo preparado para reter a mistura de toner e pó revelador.*

Concluída a transferência de imagem para o papel vegetal, o segundo bastidor é colocado sob uma lâmpada que queima o toner, retendo-o por

tempo indeterminado neste papel. O resultado dessa operação é similar a um xerox da área carregada. Pode-se observar na figura 4.8, alguns exemplos de áreas reveladas que foram usadas no processo de calibração.

FIGURA 4.8 Amostras reveladas após o processo xerográfico.

Uma foto de todo o equipamento usado para realizar o processo xerográfico encontra-se na figura 4.9. Cabe ressaltar que este equipamento é portátil, podendo ser levado de um laboratório para outro, ou mesmo para o campo. Isso facilitou em muito todo o processo de calibração.

4.2.3 INTERPRETAÇÃO DA ÁREA CARREGADA

Nesta etapa, já se tem o bastidor de papel vegetal gravado com a figura

da área carregada e pode-se passar para a fase de medição propriamente dita.

FIGURA 4.9 *Laboratório portátil usado para a revelação da área carregada de uma amostra de eletreto sensibilizada.*

Entretanto, essa área apresenta-se muitas vezes com formas geométricas diferentes de um círculo perfeito, o que torna inviável a leitura simples de seu diâmetro por uma régua calibrada. Surge assim o processo digital para leitura desta área, usando-se um "Scanner" acoplado a um microcomputador. Nesse processo, a área é digitalizada, medida e associada a um círculo equivalente, para ter seu diâmetro determinado. Isto exigiu que fosse desenvolvido um programa computacional especial que pudesse não só controlar o "hardware" do "Scanner" como também, efetuar todos os cálculos necessários. Grande parte deste programa já havia sido desenvolvido na tese

de mestrado do engenheiro Marcelo Fernandes da Silva "ACLAT-Auxílio Computacional para Laboratórios de Alta Tensão"[16] e apenas as rotinas referentes a identificação e cálculo da área foram aqui implementadas. Este programa é descrito no item subsequente.

Algumas modificações mecânicas tiveram que ser implementadas no sistema "HandScanner", para garantir uma correta digitalização da imagem. Dentre elas estão a construção de um trilho para que o "HandScanner" não deslizesse de forma aleatória sobre a amostra e a elaboração de um suporte especial para o bastidor de papel vegetal, com luz incidente na parte posterior.

Na figura 4.10, encontra-se uma foto mostrando o detalhe das modificações introduzidas.

FIGURA 4.10 *Equipamento usado para digitalizar as imagens.*

4.2.3.1 PROGRAMA ÁREA

O programa área foi construído tendo como suporte básico o programa ACLAT . Grande parte das sub-rotinas ali desenvolvidas foram usadas sem qualquer modificação.

Assim, o programa área pode ser descrito por três grandes blocos: a captura da imagem, o tratamento ou limpeza da imagem e a determinação da área propriamente dita. As etapas de captura e limpeza da imagem são partes integrantes do ACLAT e estão melhor descritas na dissertação de mestrado de Marcelo Fernandes da Silva[16].

Quanto à determinação da área, o algoritmo usado foi o da contagem de "pixels", dentro de uma região delimitada.

Normalmente, a área carregada, após ter sido digitalizada pelo "HandScanner", apresenta-se na tela como um conjunto de pontos iluminados. Juntamente com os pontos indicadores da área surgem também outros tantos pontos espúrios. Estes pontos indesejáveis surgem em decorrência do processo de digitalização e devem ser eliminados no processo de limpeza, para não falsear os resultados. Terminada esta fase, o Programa Área automaticamente identifica as bordas da região a ser medida e determina sua área. Todo o programa foi calibrado com diferentes áreas conhecidas e os erros encontrados foram menores que 1 %.

Apresenta-se nas figuras 4.11 e 4.12, as fotos da tela gráfica do Programa Área e de uma área calculada entre os eixos formados por quatro retas.

FIGURA 4.11 Tela gráfica do Programa Área.

FIGURA 4.12 Área calculada entre eixos.

4.3 RESULTADOS DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR

O sensor foi calibrado para dois eletrodos esféricos superiores, com diâmetros respectivamente iguais a 25 mm e 50 mm, aplicando-se tensões de até 6 kV. As curvas de calibração estão expostas nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15. Para estas curvas foram testadas diferentes regressões, sendo a linear aquela que apresentou os melhores resultados. Um ponto a ser ressaltado é aquele ilustrado na figura 4.11, no qual, para o eletrodo de 25 mm, a partir de 3 KV, a correlação entre os o pico da tensão impulsiva e o diâmetro da área carregada torna-se muito ruim.

FIGURA 4.13 *Regressão Linear dos valores de Pico de Tensão impulsiva (kV) versus Diâmetro da área carregada (mm) para o eletrodo de 25 mm.*

Isto, de certa forma era esperado, porque a partir de uma certa distância do ponto central do eletrodo o campo elétrico torna-se muito heterogêneo e causa descargas aleatórias.

FIGURA 4.14 *Regressão Linear dos valores de Pico de Tensão*

impulsiva (kV) versus Diâmetro da área carregada (mm) para o eletrodo de 25 mm (até 3kV).

FIGURA 4.15 *Regressão Linear dos valores de Pico de Tensão impulsiva (kV) versus Diâmetro da área carregada (mm) para o eletrodo de 50 mm.*

CAPÍTULO V

DETECTOR DOS PICOS DE SOBRECORRENTES E SOBRETENSÕES DE ELETRETOS

Neste capítulo, será descrita a implementação dos detectores de sobrecorrentes e de sobretensões de eletretos, voltados ao estudo do comportamento das redes de distribuição face às solicitações impulsivas.

5.1 INTRODUÇÃO

As sobretensões e sobrecorrentes provocadas por descargas atmosféricas em sistemas de distribuição apresentam-se como formas de ondas impulsivas, similares àquelas descritas na Figura 4.5. Estas formas de onda foram registradas por inúmeros pesquisadores desde a década de 30, quando os oscilógrafos de raios catódicos ainda eram usados. Contudo, ainda há muito a ser feito neste campo de estudo, principalmente no Brasil, onde são poucas as regiões que contam com um estudo já desenvolvido. Estas regiões concentram-se basicamente na jurisdição coberta pela empresa FURNAS, que desenvolve

estudos de descargas atmosféricas no morro do Cachimbo. Objetivando estender estes estudos ao nível nacional para redes de distribuição de alta e de baixa tensão foram desenvolvidos dois detectores um de sobretensões e outro de sobrecorrentes, que empregam o sensor de eletretos descrito no capítulo IV. Eles se encontram descritos nos itens subseqüentes, bem como os testes e circuitos de calibração em laboratório e seus resultados.

5.2 DETECTOR DOS PICOS DE SOBRETENSÕES

Os detectores dos picos de sobretensões são destinados a registrar os valores dos picos das sobretensões que assolam as redes por ocasião das descargas atmosféricas. Surtos dessa natureza são esporádicos e com valores de pico aleatórios, exigindo que longos estudos estatísticos sejam efetuados. Desta forma, os detectores devem ser instalados em paralelo à rede, entre um condutor fase e o terra, e distribuídos ao longo da região em estudo. De tempos em tempos, os sensores dos detectores devem ser levados ao laboratório para ter sua informação recuperada. Os períodos de coleta dos sensores devem, sempre que possível, iniciar-se após à ocorrência de tempestades que ocorram na região. Isto é necessário, pois, estudos anteriores[18] mostraram que o sensor submetido a inúmeras sobretensões sucessivas, sem um prévio descarregamento, registrará sempre o maior valor de pico das sobretensões aplicadas, o que certamente prejudica a estatística das sobretensões com valores de picos baixos.

Estes detectores podem ser empregados tanto em redes de distribuição como em instalações elétricas industriais e prediais. Estas duas aplicações são melhor descritas nos itens subseqüentes.

5.2.1 DETECTOR DOS PICOS DE SOBRETENSÕES APLICADO A REDES INDUSTRIAIS E RESIDENCIAIS.

Os detectores dos picos de sobretensões aplicados a redes industriais são normalmente submetidos a sobretensões com picos menores que 10 kV e podem ser constituídos apenas pelo elemento sensor, sem qualquer outro acessório. Desta maneira, os detectores podem ser colocados em paralelo à rede, nos pontos de entrada de energia e montados em invólucros semelhantes àquele mostrado na figura 4.2. Neste caso, como eles não ficarão sujeitos a intempéries, o sistema de vedação do sensor pode ser simplificado.

Quando este estudo estatístico for desenvolvido pelas concessionárias de energia, os próprios funcionários encarregados da leitura dos medidores poderão fazer mês a mês, a coleta e substituição dos detectores, facilitando o trabalho estatístico.

5.2.2 DETECTOR DE SOBRETENSÕES EM LINHAS E EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA.

Nas redes e linhas de distribuição de energia, as sobretensões originam-se, em sua maioria, das descargas que ocorrem nas proximidades da linha,

sendo denominadas sobretensões induzidas. Estas sobretensões podem atingir valores superiores a 200 kV em sistemas mal protegidos. Nestes casos, a simples utilização do elemento sensor como detector é impraticável, exigindo que os detectores sejam um pouco mais aprimorados. Estes devem compor-se de um elemento sensor acoplado a divisores de tensão, capacitivos ou resistivos, para reduzirem as sobretensões das linhas a valores compatíveis com os valores do sensor. Neste trabalho, mostrou-se que, devido à facilidade de construção e menores custos, os divisores de tensão capacitivo são os mais adequados. Um diagrama esquemático de todo o conjunto encontra-se na figura 5.1.

FIGURA 5.1 Diagrama esquemático do divisor capacitivo acoplado ao sensor de eletretos.

A título de ilustração e de verificação da viabilidade técnica da construção do dectetor, montou-se um divisor de tensão com um capacitor C_1

de alta tensão de 50 pF, e um capacitor de baixa tensão de 1,47 nF. O capacitor de alta tensão é um isolador de vidro do tipo disco e classe de tensão de 50 kV. O capacitor de baixa tensão foi especialmente construído para este trabalho. Ele é do tipo planar, com a forma e dimensões ilustradas na figura 5.2.

FIGURA 5.2 Dimensões físicas do capacitor de baixa tensão de Teflon-FEP.

O dielétrico utilizado foi Teflon-FEP, com espessura de 50 μm , não metalizado. O material condutor, alumínio, foi depositado por vaporização em câmara a vácuo em ambas as faces. Sua capacitância pôde ser calculada pela expressão

$$C = \frac{\epsilon_o A}{d} \quad (10)$$

sendo A, a área, e d, a espessura da amostra. Como o divisor capacitivo tem uma relação dada pela expressão

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (11)$$

V_2 , a tensão sobre o sensor, será igual 0,033 V_1 . Convém lembrar que V_1 é a tensão total aplicada ao detector. Para uma tensão máxima V_2 de 6 kV, o detector poderá ser usado para registrar sobretensões com picos de até 180 kV.

Contudo, o limitante para o detector é a classe de isolamento do isolador de vidro de 50 kV. Assim, este detector poderá ser usado somente para registro de sobretensões de, no máximo, 50 kV. Isto não impede naturalmente, que outros isoladores sejam colocados em série com o primeiro e com isso, aumentar-se a classe de tensão do detector.

Como este detector será usado em instalações expostas às intempéries, operando em condições climáticas geralmente desfavoráveis, foi construído um invólucro especial para revestir todo o conjunto. Uma foto de todo o conjunto com o circuito de ensaio está exposta na figura 5.3.

Para facilitar a retirada do elemento sensor, este teve seu terminal de terra adaptado, para poder ser extraído do detector, usando uma simples vara de manobra.

FIGURA 5.3 *Detector de sobretensões para classe de 50 kV.*

Apresenta-se na figura 5.4, o detalhe do sensor de eletretos posicionado no detector de sobretensões.

FIGURA 5.4 *Detalhe do sensor de eletretos posicionado no detector de sobretensões.*

O detector completo foi ensaiado em laboratório, em um gerador de impulso de 25 kV, especialmente montado para este trabalho. Os resultados dos ensaios confirmaram a relação do divisor de tensão e o sensor detectou o valor do pico da sobretensão aplicada, segundo a curva de calibração para um eletrodo esférico superior, de 50 mm, mostrada no capítulo IV.

5.3 DETECTOR DOS PICOS DE SOBRECORRENTES

As altas correntes que surgem nas redes de distribuição, em decorrência das sobretensões, escoam para a terra, através de elementos aterrados.

Em linhas totalmente protegidas elas escoam pelos cabos guarda e torres aterradas. Em redes não protegidas, geralmente as usadas no Brasil, o escoamento dessas correntes acontece através dos pára-raios de linha, que protegem os equipamentos, tipo transformador, ou mesmo trechos da linha.

Estas correntes são, como as sobretensões, aleatórias e tem valores de pico que variam de 2 kA a 200 kA.

Os detectores desenvolvidos neste trabalho, diferentes dos elos magnéticos que devem ser colocados próximos aos cabos de descida dos pára-raios ou nos pés das torres para registrar as altas correntes, são colocados em série com o terminal de terra dos pára-raios de linha, como o ilustrado na figura 5.5.

FIGURA 5.5 Diagrama esquemático da instalação dos detectores de sobrecorrentes.

Também da figura 5.5, observa-se que o sensor de sobrecorrentes é composto de um resistor "Shunt" em paralelo com o sensor de eletretos.

A tensão sobre o resistor, sendo diretamente proporcional às altas correntes que escoam para a terra, pode ter seu pico registrado pelo sensor de eletretos. Detectores com resistores de $0,1 \, \Omega$ podem registrar correntes de até 60 kA. Estes valores são aqueles, cuja probabilidade da corrente de descarga exceder esse valor é de 10 % e serão os valores máximos adotados para o detector.

Cabe ressaltar que valores superiores de sobrecorrentes, normalmente

quando ocorrem nas linhas, tem um efeito muito destruidor e são assumidos como riscos.

O detector foi construído com o formato indicado na figura 5.6. Ele consiste em um tubo de aço inox montado em terminais de alumínio, formando o elemento resistivo, e o elemento sensor, composto por eletrodos esféricos-planares e a folha de Teflon-FEP.

FIGURA 5.6 *Detector de picos de sobrecorrentes.*

A configuração do detector montada acima foi adaptada para ser colocada no terminal do terra dos pára-raios de linha.

Testes desenvolvidos no Instituto de Eletrotécnica e Energia sobre o elemento resistivo mostraram que ele é não indutivo e apresenta uma excelente característica linear.

Um oscilograma do resultado do ensaio comparativo entre o "shunt" Haefely e o elemento resistivo é mostrado na figura 5.7.

A curva "A" mostra o sinal obtido pelo "shunt" Haefely e a curva "B", pelo elemento resistivo, para uma corrente de 5,163 kA.

FIGURA 5.7 Resultado do ensaio comparativo entre o "shunt" - Haefely e o elemento resistivo desenvolvido. Curva A: Tensão fornecida pelo Haefely; Curva B: tensão fornecida pelo elemento resistivo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Para situar todo o trabalho dentro de seu universo de estudo foi efetuada uma revisão completa de toda a bibliografia sobre sensores de sobretensões e sobrecorrentes, e uma revisão pormenorizada dos principais processos de carregamento de eletretos, concentrando-se no carregamento por tensões impulsivas, principal tema deste trabalho.

Embora, em trabalhos de mestrado, não sejam exigidas contribuições inéditas, aqui pode-se ressaltar três: - a implementação de todo o processo de calibração do sensor de pico de sobretensões esférico-planar, a implementação do detector de sobretensões e implementação do detector de sobrecorrentes.

Na implementação do processo de calibração, foram desenvolvidos:- a construção do processo xerográfico para a revelação da área carregada; - as rotinas computacionais, acopladas ao programa ACLAT[16], dedicadas a calcular áreas de figuras; -o gerador de impulso classe 10 kV; -todo o processo de calibração de dois sensores, um com um eletrodo esférico de 25 mm e outro com 50 mm. Resultado extremamente interessante foi observado por meio das curvas de calibração. A bibliografia consultada indicava que a aproximação exponencial entre a tensão de pico e a distância δ da figura 3.3, era a mais indicada para este tipo de sensor. Contudo neste trabalho, verificou-se que a aproximação linear entre a tensão de pico e o diâmetro médio da área carregada é a mais indicada. Isto, acredita-se, deve-

se ao novo processo de medição da área, que permitiu que o diâmetro médio substituísse a distância δ como grandeza de referência. O diâmetro médio é uma grandeza muito mais representativa da região carregada e muito difícil de ser determinada pelo processo de mapeamento eletrostático anteriormente utilizado[18].

No desenvolvimento do detector de sobretensões, foram construídos o divisor de tensão capacitivo, o invólucro, adaptado para a fácil extração dos sensores e o circuito de ensaio de calibração. Verificou-se que esse detector é viável e poderá ser utilizado em redes de distribuição.

O detector de sobrecorrentes foi também implementado, e mostrou-se que o elemento resistivo implementado tem uma excelente característica de resposta. Seu baixo custo e configuração permitem que ele seja acoplado aos pára-raios de linha, pelas equipes de linha-viva, sem nenhum problema.

A excelente resposta do elemento resistivo implementado indica que ele, com poucas modificações, pode também ser utilizado em laboratórios de alta correntes como elementos "Shunt" de medição, podendo ser implementado em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALTAFIM, R.A.C.; Eletreto-Novo Sensor de Tensões e Correntes Impulsivas; Tese de Doutorado; EPUSP; 1990.
- [2] CROUCH, K.E.; Calibration Tests on Magnetic Tape Lightning Current Detectors; NASA Contractor Report 3270; Lightning Technologies, Inc.; Pittsfield, Massachussetts; 1980.
- [3] FOUST, C.M.; and KUEHNY, H.P.; The Surge-Crest Ammeter; General Electric Review; v.35; n.12; p.644-648; December, 1932.
- [4] HAGENGUTH, J.H.; Lightning Recording Instruments; Part II; General Electric Review; v.43; n.6; p.248-255; June, 1940.
- [5] DUFOUR, A.; Cathode-ray oscillograph; Comtes Rendus; v.158; p.1139-1154; 1914.
- [6] PETERS, J.F.; The Klydonograph Electrical World; p.3-9; April, 1924.
- [7] COX, J.H.; LEGG, J.W.; The Klydonograph and Its Application to Surge Investigation; Transaction AIEE; v.XLIV; p.129-150; 1925.

- [8] FOUST, C.M. and HENDERSON, J.T.; Direct measurement of surge currents; Electrical Engineering; v.54; n.4; p.373-378; April, 1935.
- [9] FOUST, C.M. and GARDNER, G.F.; A new surge-crest ammeter; General Electric Review; v.37; n.7; p.324-327; July, 1934.
- [10] SCNEIDER, H.M. and STILLWELL, H.R.; Measurement of lightning current waveshapes on distribution systems; IEEE Summer Meeting; Vancouver; May, 1979 (Paper A 79 526-5).
- [11] LAPEDES, D.N.; Dictionary of Scientific and Technical Terms; Ed. Mc Graw-Hill Book Company; p.468; 1974.
- [12] TAREEV, B.; Nonlinear Dielectrics; Physics of Dielectric Materials; Second Edition; Ed. Mir Publishers; cap.5; p.215; 1979.
- [13] COOKE, N.M.; MARKUS, J.; Electronics and Nucleonics Dictionary First Edition; Ed. Mc Graw-Hill Book Company Inc.; p.141; 1966.
- [14] SESSLER, G.M.; Electrets, Topics in Applied Physics; Second Enlarged Edition; v.33; p.20-39; 1987.

- [15]ALTAFIG; R.A.C.; GIACOMETTI, J.A. e JANISZEWSKI, J.M.; A Novel Method for Electret Production using Impulse Voltages; IEEE Transactions on Electrical Insulation; v.27; n.4; p.739-743; August 1992.
- [16]SILVA, M. F.; Aclat - Apoio Computacional Para Laboratórios de Alta Tensão, Dissertação apresentada na EESC - USP, 1993.
- [17] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION; IEC Recommendation; High-voltage test techniques; part 2: Test Produces; First edition; p. 49; 1973.
- [18] ALTAFIG; R.A.C.; GIACOMETTI, J.A. e JANISZEWSKI, J.M.; An Electret Transducer for Impulse Voltage Measurements; IEEE Transactions On Industry Applications; v. 28; n. 5; p. 1217-1222; September/ October 1992.
- [19] GROSS, B.; The electret- Endeavour; v.30; n.11; p. 115-119; sept. 1971.
- [20]UMAN, M. A.; Natural and Artificially-Initiated Lightning and Lightning Test Standards; Proceedings of the IEEE; v. 76; n. 12; p. 1548-1565; December 1988.

ANEXO A

PROGRAMA ÁREA

PROGRAMA LATSCANNER

Este programa controla todas as funções de aquisição de dados do "scanner", como por exemplo: habilitar e desabilitar a operação do scanner e armazenar os dados em um determinado arquivo.

```
{ $M 64000,0,655360 }
```

```
Program LatScanner;
```

```
Uses Dos,Crt,Graph,BgiDriv,BgiFont,Arqui,mouse,Scanner,mouse2;
```

```
{ $i grafico.mod }
```

```
{ $i tela.pas }
```

```
{ $i menu.pas }
```

```
begin
```

```
if Verify <> 0 then
```

```
begin
```

```
inicializa;
```

```
sc001;
```

```
reseta;
```

```
habilita;
```

```
sc006;
```

```
desabil;
```

```
closegraph;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Writeln;
```

```
Writeln('Driver do Mouse nao Instalado ...');
```

```
Writeln('Mouse nao Encontrado !');
```

```
Writeln;
```

```
Writeln;
```

```
end;
```

```
end.
```

SUBROTINA PARA CÁLCULO DE ÁREA

Esta subrotina faz o cálculo da área digitalizada através do "scanner" e limitada por quatro retas, por meio da contagem de "pixels" habilitados.

Depois de terem feito uma varredura na tela do microcomputador, as retas estacionam-se, demarcando os "pixels" limites da figura.

Sucedese a contagem dos "pixels" habilitados e através de um fator de conversão tem-se a área da figura digitalizada mostrada na tela do microcomputador.

Procedure Calc_area;

const fator=1/26.336;

Var i,j : integer;
Pixel,p1,p2 : word;
Flag : boolean;
c_ini,c_fin,l_ini,l_fin : integer;
tabela : array[0..300,0..150] of byte;
Ox,Oy,Cx,Cy,cont : integer;
sflag : boolean;

Procedure Monta_Tabela(c_ini,l_ini,c_fin,l_fin : integer);

var k,m,a,ii,jj : integer;

begin
k:=l_ini-1;
Repeat
k:=k+1;
m:=c_ini-1;
Repeat
m:=m+1;
tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=1;
Pixel:=GetPixel(m,k);
if Pixel <> 0 then
begin
p1:=getpixel(m-1,k);
p2:=getpixel(m+1,k);
if p1<>p2 then
tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=1
else
begin
p1:=getpixel(m,k-1);
p2:=getpixel(m,k+1);
if p1<>p2 then
tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=1
else tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=6;
end;
end
else
begin
tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=0;
end;
Until m=c_fin;
Until k=l_fin;


```

for jj:=l_ini to l_fin do
  for ii:=c_ini to c_fin do
    begin
      pixel:=getpixel(ii,jj);
      if pixel <> 0 then putpixel(ii,jj,0) else putpixel(ii,jj,3);
    end;
  end;
end;

```

```

Procedure traca_l(i:integer);
begin
  setcolor(3);
  line(0,i,639,i);
end;

```

```

Procedure traca_c(i:integer);
begin
  setcolor(3);
  line(i,0,i,199);
end;

```

```

Procedure Calcula;

```

```

  var ii,jj : integer;
      key : char;

  begin
    flag:=false;
    cont:=0;
    for ii:=0 to (l_fin-l_ini) do
      for jj:=0 to (c_fin-c_ini) do
        begin
          flag:=true;
          if tabela[jj,ii]<>0 then cont:=cont+1;
        end;
      if flag then cont:=cont-1;
    area:=cont*3.2*fator;
  end;

```

```

Procedure Varredura;
var p : pointer;
    size : word;
    key : char;
    coluna,linha : integer;
    flag : boolean;

```

```

function tec:byte;
begin

```

```

key:=readkey;
if key=chr(0) then key:=readkey;
tec:=ord(key);
end;

```

```

procedure salvar(x1,y1,x2,y2: integer);
begin
size:=imagesize(x1,y1,x2,y2);
getmem(P,size);
getimage(x1,y1,x2,y2,P^);
end;

```

```

procedure restaurar(x1,y1:integer);
begin
putimage(x1,y1,P^,NormalPut);
end;

```

```

procedure um;
begin
linha:=0;
flag:=false;
salvar(0,linha,639,linha);
traca_l(linha);
repeat
case tec of
80 : begin
restaurar(0,linha);
if linha<199 then linha:=linha+1;
end;
72 : begin
restaurar(0,linha);
if linha>0 then linha:=linha-1;
end;
13 : begin
l_ini:=linha;
flag:=true;
end;
else begin
restaurar(0,linha);
end;
end;
salvar(0,linha,639,linha);
traca_l(linha);
Until (flag);
end;

```

```

procedure dois;

```

```

begin
  linha:=199;
  flag:=false;
  salvar(0,linha,639,linha);
  traca_l(linha);
  repeat
    case tec of
      80 : begin
        restaurar(0,linha);
        if linha<199 then linha:=linha+1;
        end;
      72 : begin
        restaurar(0,linha);
        if linha>0 then linha:=linha-1;
        end;
      13 : begin
        l_fin:=linha;
        flag:=true;
        end;
    else begin
      restaurar(0,linha);
      end;
    end;
  salvar(0,linha,639,linha);
  traca_l(linha);
  Until (flag);
end;

```

```

procedure tres;
begin
  coluna:=0;
  flag:=false;
  salvar(coluna,0,coluna,199);
  traca_c(coluna);
  repeat
    case tec of
      77 : begin
        restaurar(coluna,0);
        if coluna<639 then coluna:=coluna+1;
        end;
      75 : begin
        restaurar(coluna,0);
        if coluna>0 then coluna:=coluna-1;
        end;
      13 : begin
        c_ini:=coluna;
        flag:=true;

```

```

        end;
    else begin
        restaurar(coluna,0);
    end;
end;
salvar(coluna,0,coluna,199);
traca_c(coluna);
Until (flag);
end;

procedure quatro;
begin
    coluna:=639;
    flag:=false;
    salvar(coluna,0,coluna,199);
    traca_c(coluna);
    repeat
        case tec of
            77 : begin
                restaurar(coluna,0);
                if coluna<639 then coluna:=coluna+1;
            end;
            75 : begin
                restaurar(coluna,0);
                if coluna>0 then coluna:=coluna-1;
            end;
            13 : begin
                c_fin:=coluna;
                flag:=true;
            end;
        else begin
            restaurar(coluna,0);
        end;
    end;
    salvar(coluna,0,coluna,199);
    traca_c(coluna);
    Until (flag);
end;

begin
    um;
    dois;
    tres;
    quatro;
end;

var key : char;

```



```
Begin  
  Varredura;  
  Monta_Tabela(c_ini,l_ini,c_fin,l_fin);  
  Calcula;  
End;
```

PROGRAMA UNIT ARQUI

Este aplicativo gerencia a análise de dados adquiridos pelo "scanner" através das duas primeiras subrotinas citadas anteriormente, as quais estão embutidas nesta unidade.

Unit Arqui;

interface

Uses Graph,crt;

var imagem : array[0..16383] of byte;
 var t : file of byte;

Procedure Leitura (nome : string;
 var erro: integer);

Procedure Grava (nome : string;
 var erro: integer);

Procedure Guarda;

Procedure Show;

Procedure P_telaC;

Procedure Calc_Area (var area : real);

Procedure Inverte;

implementation

Procedure Leitura;

 var i : integer;
 tela : array [0..16383] of byte absolute \$B800:0000;

begin
 Assign(vart,nome);
 {\$i-}
 Reset(vart);
 {\$i+}
 erro:=ioresult;
 if erro = 0 then
 begin
 for i := 0 to 16383 do
 read(vart,imagem[i]);
 close(vart);
 end;
 end;
end;

Procedure Grava;

```

var i : integer;

begin
  Assign(vart,nome);
  {$i-}
  Rewrite(vart);
  {$i+}
  erro:=ioresult;
  if erro = 0 then
  begin
    i:=-1;
    Repeat
      i:=i+1;
      {$i-}
      write(vart,imagem[i]);
      {$i+}
      erro:=ioresult;
    Until (i=16383) or (erro<>0);
    close(vart);
  end;
end;

```

Procedure Guarda;

```

var i : integer;
    tela : array [0..16383] of byte absolute $B800:0000;

begin
  for i := 0 to 16383 do
    imagem[i]:=tela[i];
  end;

```

Procedure Show;

```

var i : integer;
    tela : array [0..16383] of byte absolute $B800:0000;

begin
  for i:=0 to 8000 do
    if ((i/80)>=5) and ((i/80)<96) then
      tela[i]:=imagem[i];
  for i:=8191 to 16191 do
    if (((i-8191)/80)>5) and (((i-8191)/80)<=95) then
      tela[i]:=imagem[i];
  end;

```


Procedure P_telaC;

```
var i : integer;
    tela : array [0..16383] of byte absolute $B800:0000;

begin
    for i:=0 to 16383 do
        tela[i]:=imagem[i];
    end;
```

Procedure Calc_area;

const fator=1/26.336;

```
Var i,j : integer;
    Pixel,p1,p2 : word;
    Flag : boolean;
    c_ini,c_fin,l_ini,l_fin : integer;
    tabela : array[0..300,0..150] of byte;
    Ox,Oy,Cx,Cy,cont : integer;
    sflag : boolean;
```

Procedure Monta_Tabela(c_ini,l_ini,c_fin,l_fin : integer);

```
var k,m,a,ii,jj : integer;
```

```
begin
    k:=l_ini-1;
    Repeat
        k:=k+1;
        m:=c_ini-1;
        Repeat
            m:=m+1;
            tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=1;
            Pixel:=GetPixel(m,k);
            if Pixel <> 0 then
                begin
                    p1:=getpixel(m-1,k);
                    p2:=getpixel(m+1,k);
                    if p1 <> p2 then
                        tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=1
                    else
                        begin
                            p1:=getpixel(m,k-1);
                            p2:=getpixel(m,k+1);
                            if p1 <> p2 then
```

```

        tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=1
        else tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=6;
    end;
end
else
begin
    tabela[m-c_ini,k-l_ini]:=0;
end;
Until m=c_fin;
Until k=l_fin;
for jj:=l_ini to l_fin do
for ii:=c_ini to c_fin do
begin
    pixel:=getpixel(ii,jj);
    if pixel <> 0 then putpixel(ii,jj,0) else putpixel(ii,jj,3);
end;
end;
end;

```

```

Procedure traca_l(i:integer);
begin
    setcolor(3);
    line(0,i,639,i);
end;

```

```

Procedure traca_c(i:integer);
begin
    setcolor(3);
    line(i,0,i,199);
end;

```

```

Procedure Calcula;

```

```

var ii,jj : integer;
    key : char;

begin
    flag:=false;
    cont:=0;
    for ii:=0 to (l_fin-l_ini) do
    for jj:=0 to (c_fin-c_ini) do
    begin
        flag:=true;
        if tabela[jj,ii]<>0 then cont:=cont+1;
    end;
    if flag then cont:=cont-1;
    area:=cont*3.2*fator;
end;

```

```

Procedure Varredura;
var p : pointer;
    size : word;
    key : char;
    coluna,linha : integer;
    flag      : boolean;

function tec:byte;
begin
    key:=readkey;
    if key=chr(0) then key:=readkey;
    tec:=ord(key);
end;

procedure salvar(x1,y1,x2,y2: integer);
begin
    size:=imagesize(x1,y1,x2,y2);
    getmem(P,size);
    getimage(x1,y1,x2,y2,P^);
end;

procedure restaurar(x1,y1:integer);
begin
    putimage(x1,y1,P^,NormalPut);
end;

procedure um;
begin
    linha:=0;
    flag:=false;
    salvar(0,linha,639,linha);
    traca_l(linha);
    repeat
        case tec of
            80 : begin
                restaurar(0,linha);
                if linha<199 then linha:=linha+1;
                end;
            72 : begin
                restaurar(0,linha);
                if linha>0 then linha:=linha-1;
                end;
            13 : begin
                l_ini:=linha;
                flag:=true;
                end;
            else begin

```

```

        restaurar(0,linha);
    end;
end;
salvar(0,linha,639,linha);
traca_l(linha);
Until (flag);
end;

```

```

procedure dois;
begin
    linha:=199;
    flag:=false;
    salvar(0,linha,639,linha);
    traca_l(linha);
    repeat
        case tec of
            80 : begin
                restaurar(0,linha);
                if linha<199 then linha:=linha+1;
                end;
            72 : begin
                restaurar(0,linha);
                if linha>0 then linha:=linha-1;
                end;
            13 : begin
                l_fin:=linha;
                flag:=true;
                end;
            else begin
                restaurar(0,linha);
                end;
        end;
    until (flag);
    salvar(0,linha,639,linha);
    traca_l(linha);
    Until (flag);
end;

```

```

procedure tres;
begin
    coluna:=0;
    flag:=false;
    salvar(coluna,0,coluna,199);
    traca_c(coluna);
    repeat
        case tec of
            77 : begin
                restaurar(coluna,0);
            end;
        end;
    until (flag);
end;

```



```

        if coluna<639 then coluna:=coluna+1;
    end;
75 : begin
    restaurar(coluna,0);
    if coluna>0 then coluna:=coluna-1;
    end;
13 : begin
    c_ini:=coluna;
    flag:=true;
    end;
else begin
    restaurar(coluna,0);
    end;
end;
salvar(coluna,0,coluna,199);
traca_c(coluna);
Until (flag);
end;

```

```

procedure quatro;
begin
    coluna:=639;
    flag:=false;
    salvar(coluna,0,coluna,199);
    traca_c(coluna);
    repeat
        case tec of
            77 : begin
                restaurar(coluna,0);
                if coluna<639 then coluna:=coluna+1;
                end;
            75 : begin
                restaurar(coluna,0);
                if coluna>0 then coluna:=coluna-1;
                end;
            13 : begin
                c_fin:=coluna;
                flag:=true;
                end;
            else begin
                restaurar(coluna,0);
                end;
        end;
        salvar(coluna,0,coluna,199);
        traca_c(coluna);
    Until (flag);
end;

```

```
begin  
  um;  
  dois;  
  tres;  
  quatro;  
end;
```

```
var key : char;
```

```
Begin  
  Varredura;  
  Monta_Tabela(c_ini,l_ini,c_fin,l_fin);  
  Calcula;  
End;
```

```
{ $L \adriano\asm\inverte.obj }
```

```
Procedure Inverte; External;
```

```
End.
```