

# **Processamento Digital de Sinais aplicado às Descargas Parciais**

**ALUNO: Warner Peixoto Pinheiro Barros**

**MATRICULA: 20311257**

**ORIENTADOR: Edson Guedes**

Campina Grande, Fevereiro de 2009.

# Agradecimentos

Dedico este trabalho aos meus pais, minha família, minha amada Kaíza, meus amigos: Stênio, Vitor, Cilço, Bola, Claudio, Daniel e Ricardo.

Agradeço, principalmente, ao meu Orientador Prof. Edson Guedes, por todo o seu empenho e paciência em me ajudar neste trabalho. Agradeço, também, a todo o Grupo de Sistemas Elétricos por ter me acolhido durante esses 5 meses de trabalho, especialmente ao aluno de doutorado George Lira e de graduação André Chaves.

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>5</b>
1.1 Objetivos e justificativas.....	5
1.2 Descrição.....	5
<b>2. Revisão e Interpretação de Descargas Parciais.....</b>	<b>7</b>
2.1 Definições de carga aparente e carga medida.....	7
2.2 Circuitos de ensaio.....	9
2.3 Medições e Identificação das Descargas.....	10
<b>3. Processamento Digital de Sinais aplicado na Detecção de Descargas Parciais.....</b>	<b>13</b>
3.1 Descargas parciais inerentes ao ruído.....	13
3.2 Faixa Dinâmica AD e Detecção de DP.....	14
3.3 Redução dos ruídos externos nas medições de DP.....	17
<b>4. Detector de descargas parciais fabricado pela Lemke.....</b>	<b>19</b>
4.1 Características.....	19
4.2 Componentes do Detector.....	19
4.2.1 Sistema de medição do LDS-6.....	19
4.2.2 Impedância de medição.....	21
4.2.3 Calibrador.....	22
<b>5. Experimentos práticos com o detector LDIC.....</b>	<b>23</b>
5.1 Montagem do circuito de medição.....	23
5.2 Calibração.....	24
5.3 Medições.....	26
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>31</b>
<b>7. Referências bibliográficas.....</b>	<b>32</b>
<b>8. Anexo.....</b>	<b>33</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 Formação das Descargas Parciais

Figura 1.2 Processo de descargas parciais em um dielétrico

Figura 2.1 Circuito simplificado de medição

Figura 2.2 Influência do capacitor de acoplamento  $C_k$  sobre a relação  $q_m/q$

Figura 2.3 Impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento.

Figura 2.4 Impedância de medição em série com a amostra.

Figura 2.5 Circuito Balanceado

Figura 2.6 Descarga de corona detectada através de um sistema de Banda Ultra Larga  $\Delta f = 50$  MHz (canal 1) e detectada através de um filtro passa baixas de 2 MHz (canal 2)

Figura 2.7 Descarga parcial detectada através de um sistema de Banda Ultra Larga  $\Delta f = 50$  MHz (canal 1) e detectada através de um filtro passa-baixas de 2 MHz (canal 2)

Figura 3.1 Processo de conversão analógico-digital

Figura 3.2 Curva de entrada e saída para a Lei- $\mu$  de compressão para  $\mu = 255$

Figura 3.3 Exemplo de quantização de um sinal

Figura 3.4 Sinal de DP contaminado com ruídos

Figura 3.5 Sinal de DP após aplicação da WT

Figura 4.1 Diagrama esquemático básico do LDS-6

Figura 4.2 Impedância de medição (LDM-5/U)

Figura 4.3 Calibrador (LDC-5)

Figura 5.1 Transformador de Potencial da classe de 15 kV

Figura 5.2 Impedância de medição em série capacitor de acoplamento

Figura 5.3 Circuito de calibração

Figure 5.4 Interface principal do programa

Figura 5.5 Interface utilizada para calibração

Figura 5.6 Interface do LDS-6 software utilizada para medições

Figura 5.7 Visualização das descargas na forma de pontos e na forma de elipse

Figura 5.8 Salvando medições no formato .lxd

Figura 5.9 Classificação dos tipos de descargas detectadas no experimento

# 1. Introdução

Empresas de energia elétrica estão prestando cada vez mais atenção na preservação de seus equipamentos mais importantes (e mais custosos), especialmente transformadores de potência, para garantir um serviço contínuo de energia elétrica.

O forte crescimento da demanda faz com que os transformadores de potência trabalhem com sobrecarga por períodos de tempo longos, aumentando os riscos de falha, sobreaquecimentos e degradação dos materiais isolantes, causando a perda acelerada de suas propriedades elétricas e mecânicas. Estes fatores contribuem para uma possível formação de descargas parciais (DP).

Uma das preocupações do pessoal técnico envolvido na operação de equipamentos elétricos de alta tensão é evitar o envelhecimento prematuro dos isolamentos, assim como mantê-los em bom nível de proteção, prevenindo riscos de faltas severas, e o aumento das saídas de serviço não programadas. Uma maneira de reduzir estes riscos é realizar medições periódicas por testes de DP, os quais são avaliados por especialistas e instrumentação sofisticada.

## 1.1 Objetivos e justificativas

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo sobre descargas parciais e seus efeitos nos transformadores de potência. Em seguida, elaborar um guia de experimento para um sistema comercial de medições e diagnóstico de descargas parciais fabricado pela Lemke, mostrando como fazer a calibração e montagem do circuito de medição até a captação das descargas e, sua visualização utilizando um software.

A medição e monitoração dos níveis de descargas parciais, além de serem eficientes na verificação da qualidade da isolação elétrica, podem também fornecer informações sobre a expectativa de vida do equipamento.

## 1.2 Descrição

Descargas parciais são descargas elétricas, na ordem de nano segundo, que curto circuitam parcialmente a isolação. Estas descargas podem aparecer em cavidades gasosas, em meio isolante sólido ou líquido, ou ao longo de uma superfície ao redor de pontas. As descargas parciais em gases, em torno de um condutor, são conhecidas como “corona”.

As descargas parciais são decorrentes da ionização de uma determinada região do dielétrico. A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da forma do eletrodo, das características do dielétrico e da tensão aplicada. Devido a não-uniformidade do campo elétrico, pequenas regiões do isolamento podem ser submetidas a solicitações superiores a sua rigidez dielétrica, resultando em descargas parciais.

A topologia estudada poder ser observada através do circuito elétrico equivalente [1] da Figura 1.1.

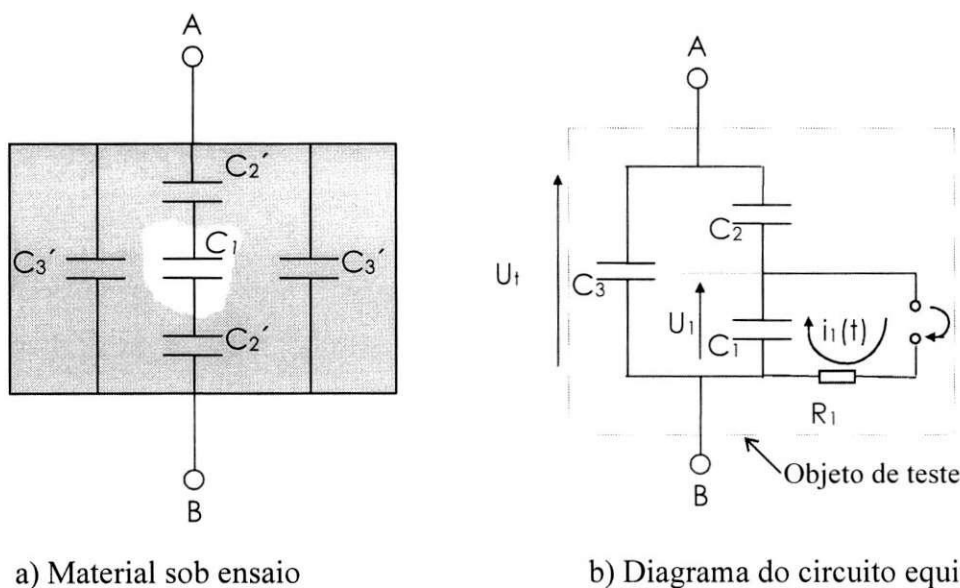


Figura 1.1 Formação das Descargas Parciais

No circuito equivalente,  $C_1$  representa a capacitância da cavidade do dielétrico,  $C_2$  a capacitância em série com a cavidade e  $C_3$  a capacitância restante da amostra.

A Figura 1.2 ilustra as formas de onda aplicadas à amostra. A tensão da fonte de alimentação é representada por  $U_1(t)$ .  $U_1(t)$  é a forma de onda da tensão aparente na

cavidade (isto, se ela não existisse) e  $U_+$  ( $U_-$ ) a tensão disruptiva da cavidade.  $V_+$  ( $V_-$ ) é a tensão residual na cavidade após a descarga.

Quando a tensão  $U_1(t)$  atinge o valor de  $U_+$ , ocorre uma descarga na cavidade reduzindo a tensão para  $V_+$ . O fenômeno pode se repetir várias vezes durante cada ciclo. A duração da descarga é da ordem de  $10^{-7}$  s, sendo um tempo curto comparado com o período da onda de 60 Hz.

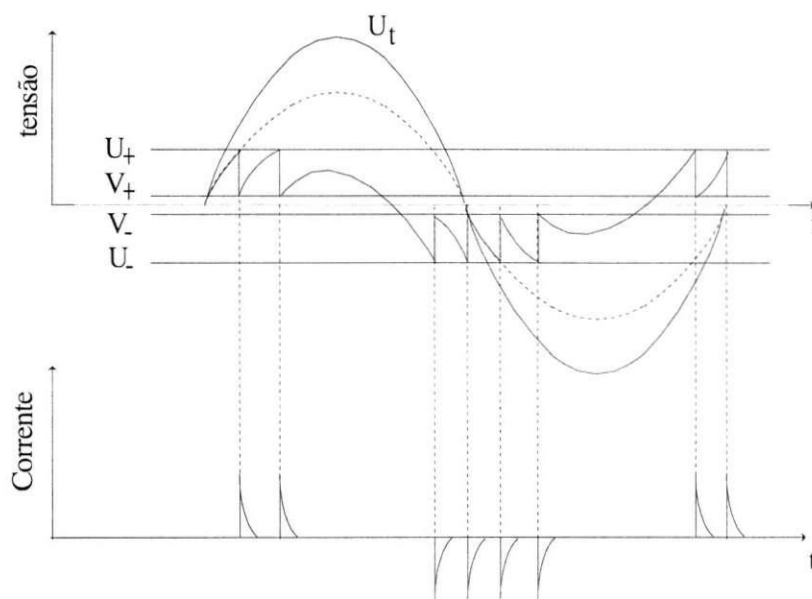


Figura 1.2 Processo de descargas parciais em um dielétrico.

## 2. Revisão e Interpretação de Descargas Parciais

Este capítulo será dedicado a uma pequena revisão de descargas parciais, as possibilidades de circuitos de ensaio, além dos mecanismos de interpretação e medição destas descargas.

### 2.1 Definições de carga aparente e carga medida

A queda de tensão  $\Delta U_1$ , como mostrado na figura 1.1 do capítulo anterior, provocada pela corrente de descarga  $i_1$  na cavidade, libera uma carga  $\Delta q_1$ , onde

$$\Delta q_1 = \Delta U_1 \cdot C_1. \quad (1)$$

A corrente local  $i_1$  não pode ser medida, mas a descarga provoca uma queda de tensão  $\Delta U_1$  em  $C_1$  e uma transferência de carga para  $C_2$ . Assim, a carga transferida é:

$$q = C_2 \cdot \Delta U_1, \quad (2)$$

Sendo redistribuída entre  $C_2$  e  $C_3$ . Logo,

$$q = C_2 \cdot \Delta U_1 = (C_2 + C_3) \cdot \Delta U.$$

Assim, a queda de tensão resultante  $\Delta U$  pode ser obtida por:

$$\Delta U = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \Delta U_1. \quad (3)$$

Baseado em estimativas empíricas para  $C_2$  e  $C_3$ , os valores de  $\Delta U$  são da ordem de mV, enquanto que  $\Delta U_1$  é da ordem de kV. Substituindo a equação (1) em (3) tem-se:

$$\Delta U = \frac{C_2}{(C_2 + C_3) C_1} \Delta q_1. \quad (4)$$

Como os valores precisos para  $C_2$  e  $C_3$  são normalmente desconhecidos,  $\Delta U_1$  e  $\Delta q_1$  não podem ser determinados diretamente.

A medição de descargas parciais pode ser feita com o auxílio do circuito da Figura 2.1, onde  $C_k$  é a capacitância de acoplamento e  $C_l$  é a capacitância equivalente da amostra.



Como os valores precisos para  $C_2$  e  $C_3$  são normalmente desconhecidos,  $\Delta U_1$  e  $\Delta q_1$  não podem ser determinados diretamente.

Da equação (1) em (2) tem-se:

$$q = \frac{C_2}{C_1} \Delta q_1 \quad (5)$$

A carga  $q$  é denominada de “carga aparente” do pulso de descarga parcial porque ela é somente relacionada com  $\Delta q_1$  através da razão de capacitâncias  $C_2/C_1$ . Considerando-se o circuito da Figura 2.1 sem o capacitor de acoplamento, a carga transferida para o objeto de teste devido à ocorrência de descargas parciais é:

$$q = C_t \cdot \Delta U. \quad (6)$$

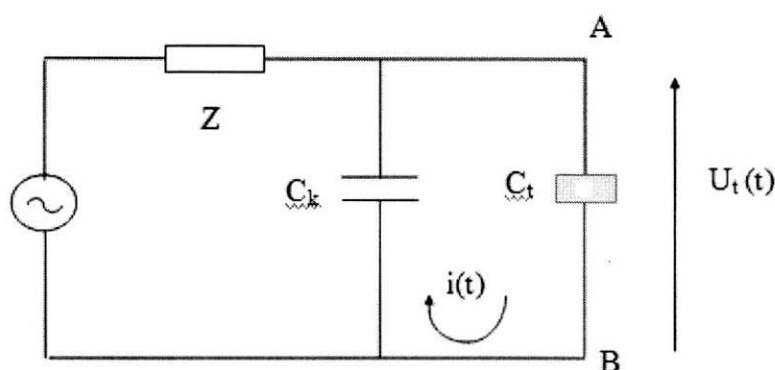


Figura 2.1 Circuito simplificado de medição

$C_k$  : Capacitância de acoplamento

$C_t$  : Capacitância da amostra.

Incluindo o capacitor de acoplamento, a carga é redistribuída entre  $C_k$  e  $C_t$ , sendo

$$q = (C_t + C_k) \cdot \Delta U', \quad (7)$$

Onde:  $\Delta U'$  representa a queda de tensão residual após a transferência de carga. A carga  $q_m$ , liberada pelo capacitor de acoplamento, pode agora ser medida e comparada com a carga  $q$  no objeto de teste. Assim,

$$q_m = C_k \cdot \Delta U' \quad (8)$$

e

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (9)$$

A Figura 2.2 ilustra a influência do capacitor de acoplamento na relação  $q_m/q$ , que é uma quantidade essencial para medição de sensibilidade nos ensaios. No caso ideal  $C_k \gg C_t$ , porém na prática essa condição geralmente não é satisfeita. Não é economicamente viável a utilização de capacitores de acoplamento com capacitâncias elevadas por sobrecarregarem a fonte de alimentação. Por outro lado, a sensibilidade na medição é reduzida se os capacitores de acoplamento forem apenas um pouco maiores do que  $C_t$ .

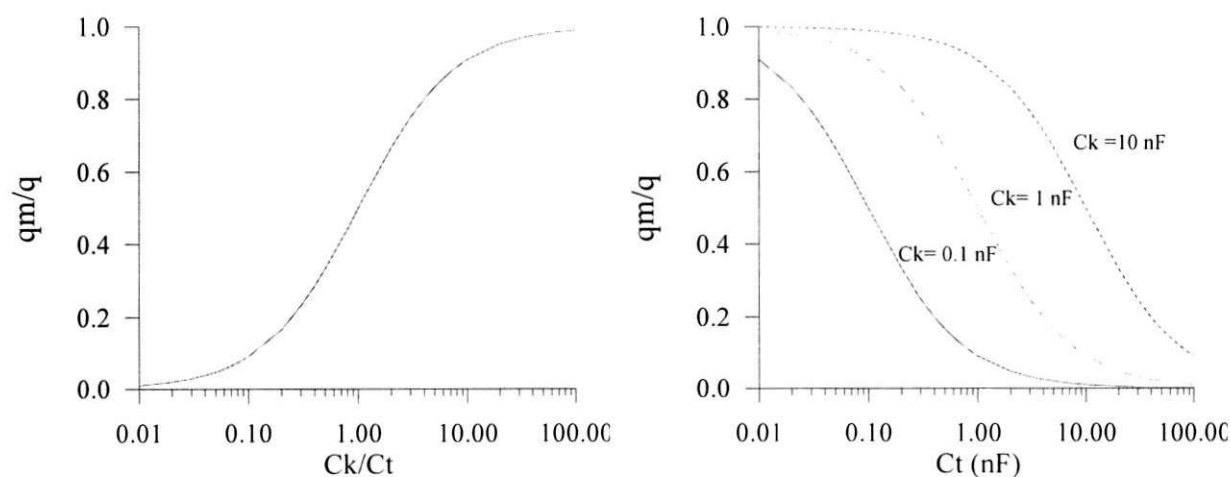


Figura 2.2 Influência do capacitor de acoplamento  $C_k$  sobre a relação  $q_m/q$

## 2.2 Circuitos de ensaio

Na medição de carga ( $q$ ), três circuitos básicos podem ser utilizados, conforme indicado nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

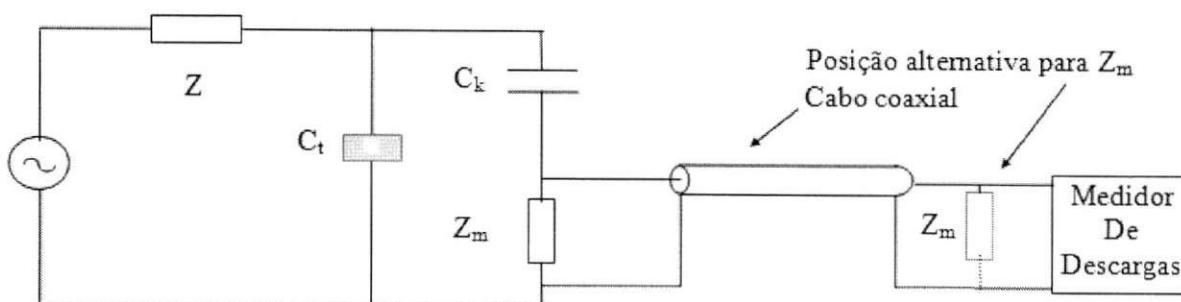


Figura 2.3 Impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento.

Vantagem: se ocorrer ruptura em  $C_t$ , o circuito de medição não estará sujeito à alta tensão.

Desvantagem: medição indireta dos pulsos. Precisão depende da relação  $C_k/C_t$ .

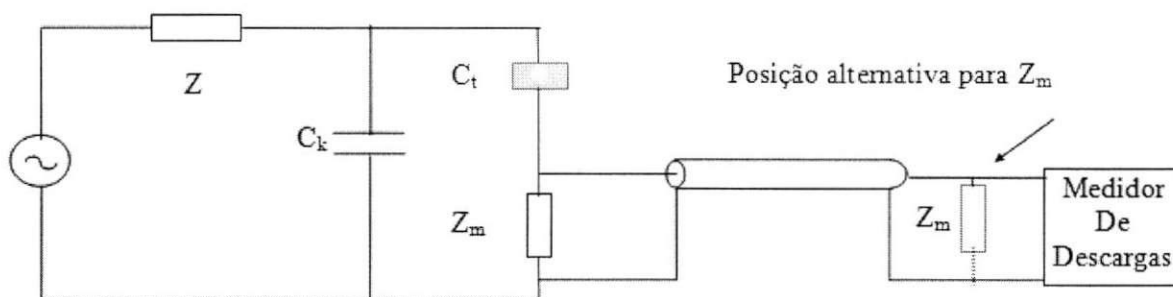


Figura 2.4 Impedância de medição em série com a amostra.

Vantagem: medição direta dos pulsos na amostra sob ensaio.

Desvantagem: se ocorrer ruptura em  $C_t$ , o circuito de medição estará sujeito à alta tensão.

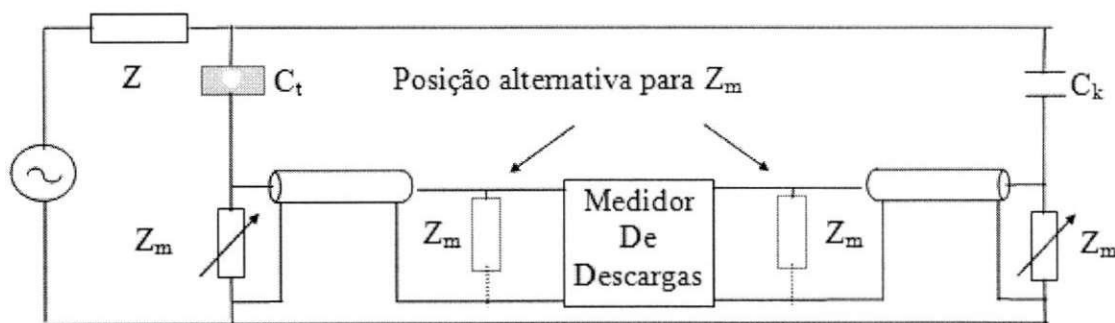


Figura 2.5 Circuito Balanceado.

Vantagem: elimina o ruído externo.

Desvantagem: se ocorrer ruptura em  $C_t$ , o circuito de medição estará sujeito à alta tensão.

O circuito da Figura 2.5 apresenta como principal vantagem a eliminação do ruído externo, entretanto, exige que o capacitor de acoplamento  $C_k$  seja isento de descargas parciais na tensão de ensaio, bem como para um bom balanceamento ( $C_k = C_t$ ). Tem-se ainda, para uma falha em  $C_t$ , alta tensão sobre o circuito de medição.

O circuito da Figura 2.4 apresenta a vantagem de detectar todo pulso de descarga oriundo da amostra sob ensaio, entretanto caso ocorra alguma falha em  $C_t$ , o circuito de medição ficará submetido à alta tensão.

O circuito da Figura 2.3 tem como principal deficiência a medição indireta dos pulsos de descarga oriundos de  $C_t$ , e a sua precisão depende da relação  $C_k/C_t$ , conforme demonstrado anteriormente, entretanto a sua principal vantagem é que se houver ruptura em  $C_t$ , não ocorrerá alta tensão sobre o circuito de medição.

## 2.3 Medição e Identificação das Descargas

Devido às componentes de alta frequência contidas nos pulsos de DP, em alguns casos os tempos de subida dos pulsos de DP podem chegar à ordem de 1 a 2 ns. É necessária uma taxa de amostragem suficiente alta para uma medição de DP em sistemas digitais [2].

Assim, a banda passante dos detectores de DP é um parâmetro fundamental para a classificação das DP pelos sistemas de diagnóstico automático de isolamentos elétricos. Segundo, os modernos sistemas de medição de DP utilizam técnicas digitais para adquirir e armazenar os dados das DP. Eles são capazes de operar em uma faixa de frequência de até poucos GHz.

Existem basicamente dois tipos de análise para identificar a natureza da descarga parcial. O primeiro tipo de análise leva em consideração a fase da descarga, que é a localização da descarga em relação à senóide da alimentação. A fase da descarga, juntamente com informações adicionais como a tensão de iniciação e extinção da descarga podem fornecer subsídios para a caracterização do sinal como descarga parcial, corona, superficial ou ruído. Os sistemas de medição de descargas parciais de

Banda Larga ou Ultra Larga são normalmente utilizados para análise das descargas parciais pela sua fase.

O segundo tipo de análise leva em consideração parâmetros temporais dos sinais de descarga parcial tais como: tempo de frente da onda e duração da descarga. Para realizar medições precisas dos parâmetros temporais os sistemas de medição de descargas parciais utilizam banda passante de até um GHz.

Com uma largura de banda de 400 kHz, conforme recomenda a IEC 60270 [3], não existem diferenças significativas entre a forma de uma descarga parcial e de distúrbios como as descargas de corona. Nas Figuras 2.6 e 2.7 é possível observar as formas de onda das descargas de corona e parcial, medidas com diferentes sistemas. Em cada figura, no canal 1 é exibida a forma das descargas detectadas com um sistema de Banda Ultra Larga (banda passante de 50 MHz), enquanto no canal 2 as descargas foram detectadas através de um filtro passa-baixas de 2 MHz. Quando detectadas através de um sistema de Banda Ultra Larga as descargas apresentam formas de onda completamente diferentes (canal 1 da Figura 2.6 e canal 1 da Figura 2.7), entretanto quando detectadas através de um sistema com um filtro passa-baixas de 2 MHz as formas de onda são praticamente idênticas (canal 2 da Figura 2.6 e canal 2 da Figura 2.7). Ou seja, com os sistemas de medição recomendados pela norma IEC 60270 não é possível distinguir as descargas de corona das descargas parciais pela suas respectivas formas de onda.

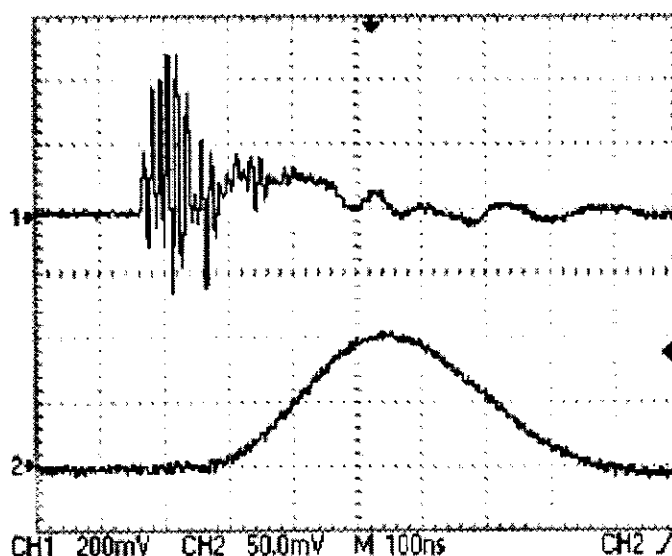


Figura 2.6 Descarga de corona detectada através de um sistema de Banda Ultra Larga  $\Delta f = 50$  MHz (canal 1) e através de um filtro passa baixas de 2 MHz (canal 2) [2]

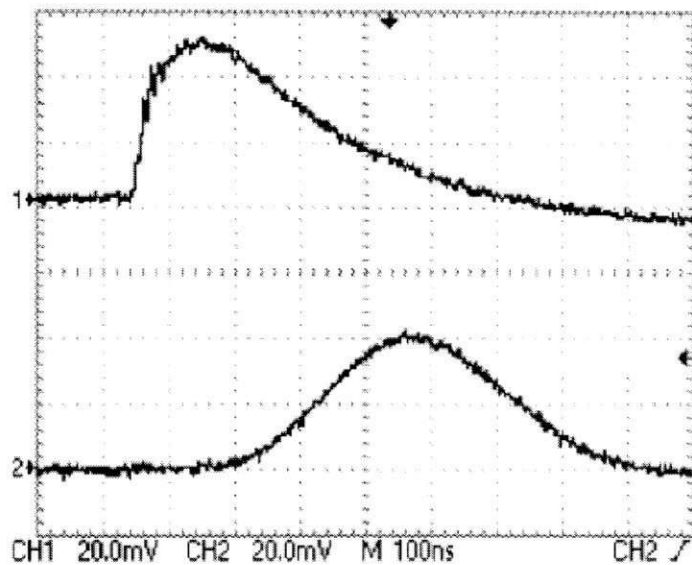


Figura 2.7 Descarga parcial detectada através de um sistema de Banda Ultra Larga  $\Delta f = 50$  MHz (canal 1) e detectada através de um filtro passa-baixas de 2 MHz (canal 2) [2]

Assim, para a análise das descargas parciais com base em parâmetros temporais, a medição de DP na faixa de VHF é preferível, pois, nessa faixa de frequência, é claramente possível distinguir entre DP e outros distúrbios como descargas de corona pela investigação de suas formas de onda. Porém, ainda segundo os autores, a distinção dos sinais de DP e distúrbios podem ser realizados com um detector de DP de banda-passante acima de 20 MHz.

### 3. Processamento Digital de Sinais Aplicados na Detecção de Descargas Parciais

O diagnóstico de DP é essencial para identificar a natureza do defeito no isolamento de sistemas causado pelas descargas. A mais comum aproximação automatizada é baseada no reconhecimento de teste padrão usando redes neurais.

As interferências de fontes de ruídos têm sido um problema persistente nos testes de DP em geral, principalmente testes em tempo real. Logo, vários métodos de redução de ruídos têm sido desenvolvidos e aprovados com sucesso no local de medição de DP. Técnicas de eliminação de ruídos como filtros na entrada da linha elétrica, transformadores de isolamento da entrada e filtros para atenuação de ruídos de alta tensão.

Este capítulo será dedicado às técnicas de processamento digital de sinais para o reconhecimento de pulsos de descargas parciais no ruído, incluindo conversões analógicas/digitas (A/D) e Transformadas Wavelets Discretas (DWT) para separação do ruído elétrico inerente nas medições.

#### 3.1 Descargas Parciais inerentes no ruído

Ruído pode ser definido como qualquer sinal não desejado que não seja relacionado com o sinal de entrada. As fontes de ruído primárias como ondas de rádio, descargas eletrostáticas, iluminação e ruídos térmicos, aparecem nos sistemas de potência.

Uma eletrônica de banda larga é necessária para detectar pulsos rápidos de descargas parciais quando requerido preservar as informações relativas ao tempo. Quando um sinal muito ruidoso for processado para detectar DP, o nível de ruído superposto ao sinal de DP supera a capacidade de processamento eletrônico ou causa uma série de picos em posições incorretas.

A habilidade de separar o sinal do ruído melhora com o aumento do conhecimento do sinal fonte da DP como: largura de banda, fase relativa para algumas referências, características da forma de onda. Por exemplo, a probabilidade e a magnitude de uma DP gerada sob condições de tensão AC são funções da fase, e

conhecimento desta função melhora a sensibilidade de detecção como informações sobre a natureza da fonte de DP.

Técnicas avançadas de processamento de sinais como cálculo da média, autocorrelação, estatística de ordem elevada, filtros adaptativos e Wavelets podem ser empregadas para detectar DP [4]. Parâmetros estatísticos e coeficientes de Fourier em combinação com redes neurais também podem ser usados.

Um pulso de DP é geralmente muito curto, na faixa de 1ns a 10ns. De qualquer modo como um pulso de DP se propaga da fonte até o instrumento de detecção, perdas de alta frequência no meio da transmissão geralmente causam redução na largura de banda utilizada entre 10 MHz e 50 MHz.

### 3.2 Faixa dinâmica AD e Detecção de DP

As larguras de banda dos sinais de DP apresentam o maior desafio para sistemas digitais de aquisição. Conversores analógico-digitais (ADC) impõem limitações no processamento digital de sinais como um resultado do limite da faixa dinâmica para a largura de banda requerida. A figura 3.1 ilustra um processo completo de conversão analógico-digital [4].

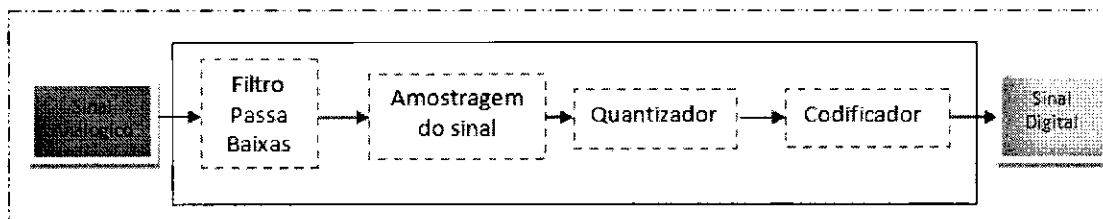


Figura 3.1 Processo de conversão analógico-digital

O Teorema de Amostragem de Nyquist define a frequência mínima requerida para representar um sinal analógico. O sinal analógico pode ser representado exatamente se a frequência mínima de amostragem é maior ou igual a duas vezes a componente de frequência mais elevada do sinal original. Quanto maior a frequência de amostragem do sinal, melhor a representação do sinal original. Porém, o aumento da frequência de amostragem implica no aumento da carga computacional durante o processamento digital do sinal.



As duas primeiras etapas da conversão analógico/digital consistem na filtragem (filtro passa baixa) e na amostragem do sinal de entrada. Em seguida, vem o processo de quantização do sinal (processo de atribuição de valores discretos para um sinal cuja amplitude varia entre infinitos valores). A quantização não-uniforme equivale a duas operações sucessivas: compressão do sinal amostrado e quantização uniforme. Habitualmente a compressão realiza-se recorrendo a uma de duas normas internacionais que usam as chamadas *lei -A* e *lei -μ*.

A lei-μ vem dada pela seguinte expressão, onde o valor  $\mu = 255$  é o mais usado [4]:

$$v(m) = \frac{\ln(1 + \mu|m|)}{\ln(1 + \mu)} \text{sign}(m)$$

onde:  $\mu$  é o grau de compressão;

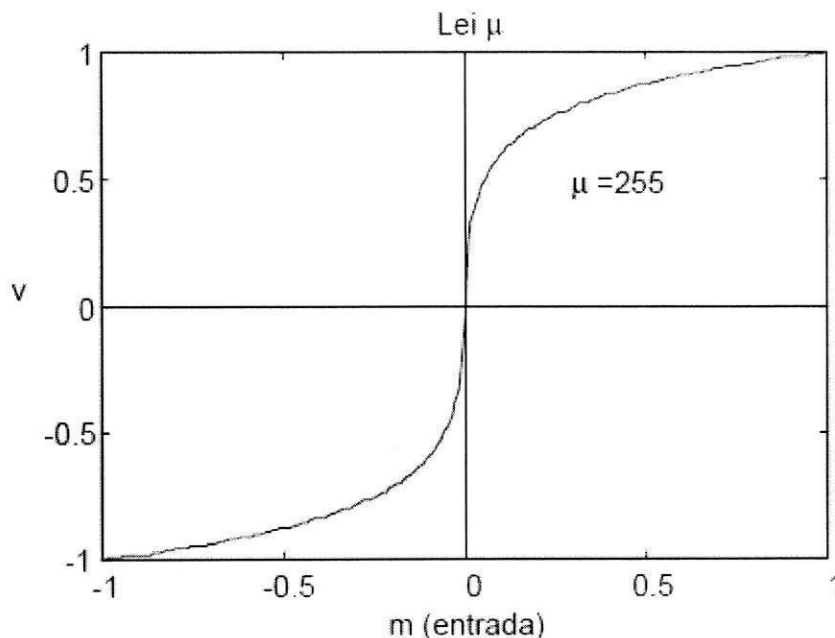


Figura 3.2 Curva de entrada e saída para a Lei-μ de compressão para  $\mu=255$

As amostras comprimidas atravessam em seguida um quantizador uniforme. A quantização introduz um erro na representação do sinal analógico. Esse erro de

quantização ou ruído de quantização depende do degrau de quantização usado,  $\Delta$ . Admitindo que os níveis sejam equiprováveis e igualmente espaçados, a potência média do ruído de quantização vale:

$$\varepsilon\{q^2(n)\} = \frac{\Delta^2}{12}$$

onde :  $q$  = erro de quantização

$\Delta$  = tamanho do degrau do quantizador =  $2^{-B}$  (“**B**” é o número de bits utilizado para representar cada amostra)

O conversor analógico/digital (ADC) tem um número finito de bits, limitando o nível de resolução e a quantização. A *relação sinal/ruído de quantização* (SQNR), em decibéis, é dada por:

$$SQNR = 6.02xB + 1.76 \text{ dB}$$

Cada bit adicional usado no ADC fornece aproximadamente 6 dB no nível da relação sinal/ruído (SQNR). Após a quantização, cada amostra quantizada é representada por uma palavra de código, ou seja, a etapa de codificação. Os valores quantizados do sinal analógicos são convertidos (codificados) em números binários de acordo com uma determinada correspondência (nº de bits e nº de níveis de quantização). Sabendo que o número de níveis do quantizador é dado por  $L=2^B$ .

Em descargas parciais, os sinais de pequenas amplitudes são típicos e conseqüentemente é necessário um processo de compansão (compressão e expansão) antes da digitalização. O sinal é primeiramente comprimido usando um elemento não linear, o qual comprime os valores extremos do sinal enquanto realça os valores menores do mesmo, como ilustra a Figura 3.3.

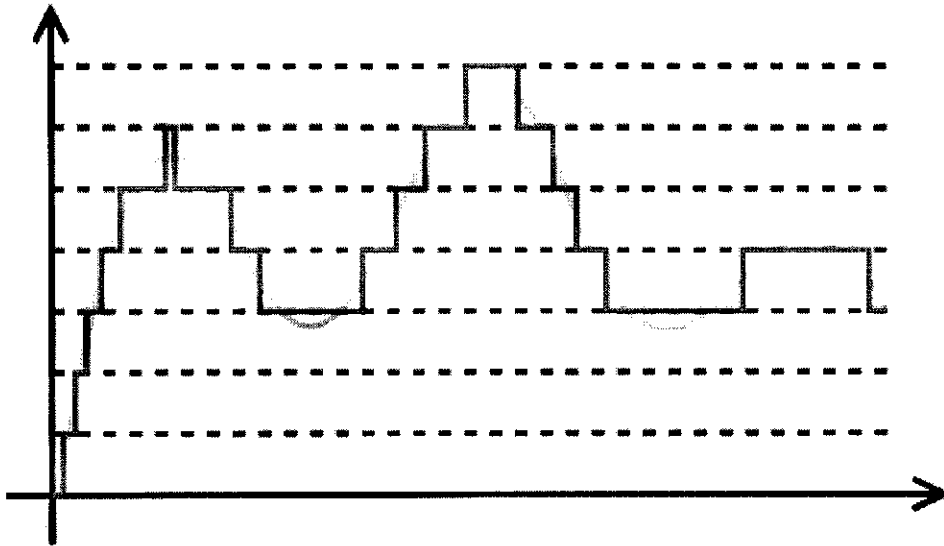
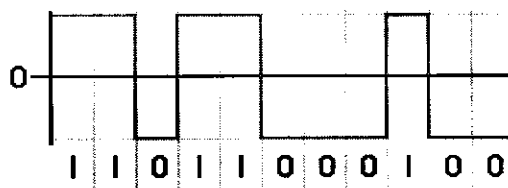


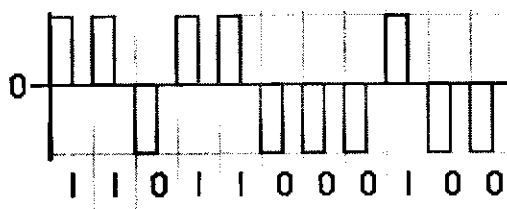
Figura 3.3 Exemplo de quantização de um sinal

No que diz respeito às principais técnicas de codificação, pode-se dividi-las em 3:

- **Non Return Zero (NRZ) ou Non Return to Zero:** Existem dois níveis de tensão ou corrente, para representar os dois símbolos digitais (0 e 1). É a forma mais simples de codificação e consiste em associar um nível de tensão a cada bit: um bit 1 será codificado sob a forma de uma tensão elevada e um bit 0 sob a forma de uma tensão baixa ou nula.



- **Return Zero (RZ) ou Return to Zero:** Na codificação RZ o nível de tensão ou corrente retorna sempre ao nível zero após uma transição provocada pelos dados a transmitir (a meio da transmissão do bit). Geralmente um bit 1 é representado por um nível elevado, mas a meio da transmissão do bit o nível retorna a zero.



- **Diferenciais:** Neste tipo de codificação, os 0 e 1 são representados através de uma alteração do estado da tensão ou corrente. Assim, o valor 1 é representado pela passagem de uma tensão ou corrente baixa/nula para uma tensão ou corrente elevada. O valor 0 é o contrário, ou seja, passa-se de uma tensão ou corrente elevada para outra baixa/nula.

### 3.3 Redução de ruídos externos em medições de DP

A figura 3.4 ilustra um sinal de DP digitalizado gravado em tempo real durante um serviço de medição em uma linha de transmissão de 1.8 km de 33 kV [5], onde o ruído inibe qualquer DP presente.

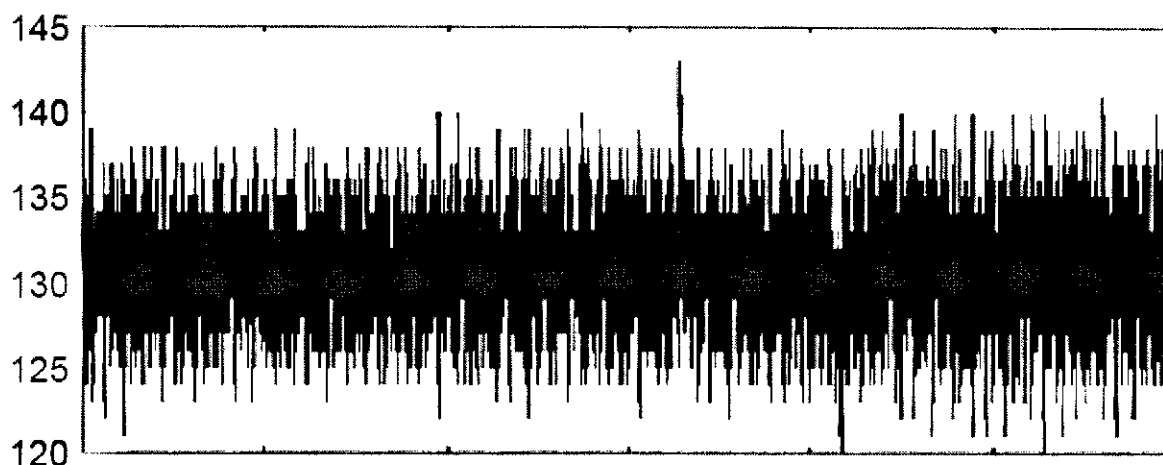


Figura 3.4 Sinal de DP contaminado com ruídos

Em geral, técnicas de redução de ruídos podem ser do tipo malha aberta ou malha fechada. No caso de sistemas de malha fechada, várias medições de ruídos devem ser disponíveis, e o ruído proveniente da fonte deve ser relacionado com ruído adquirido na medição de DP. Na aproximação de malha fechada, uma antena pode ser usada para detectar ruídos magnéticos ao mesmo tempo em que da medição do sinal de DP cheio de ruídos.

No caso da aproximação de malha aberta, “post-processing” (tratamento posterior ou subsequente) é aplicado à medição do sinal de DP para melhorar a SQNR baseado no conhecimento das características do sinal de DP, a diferença entre a natureza dos sinais de DP e a natureza dos ruídos aleatórios. Varias técnicas de redução de ruído

em malha aberta incluem filtragem, técnicas de correlação, subtração espectral e transformadas Wavelets.

A aplicação de técnicas de malha aberta empregando transformadas Wavelets [6] vem sendo utilizada para discriminar sinais de DP dos dados obtidos (durante o serviço normal) de redes de linha de transmissão. Este procedimento de retirada do ruído desenvolvido para DP é descrito a seguir:

- Aplicação da Transformada Wavelet (WT) no sinal com ruídos para produzir os coeficientes wavelets ruidosos;
- Limiar para remover ou reduzir elementos nos coeficientes wavelet que são postulados para caracterizar o ruído;
- Transformada Wavelet Inversa dos coeficientes anteriores para obter um sinal de DP sem ruídos.

A Figura 3.5 abaixo ilustra o sinal de DP mostrado acima após a utilização da WT para eliminação do ruído [6].

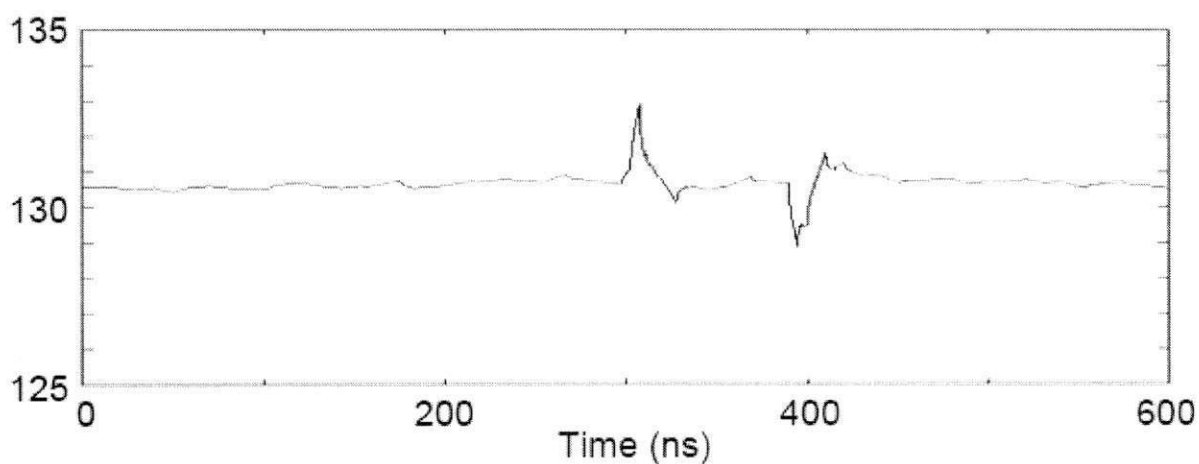


Figura 3.5 Sinal de DP após aplicação da WT

Dessa forma, técnicas de malha aberta para eliminação de ruído usando WT podem ser eficientes para separar o ruído do sinal de DP, para uma análise e diagnóstico de uma determinada linha de transmissão ou de equipamentos de potência, como por exemplo, transformadores de potencial.

A etapa seguinte será dedicada ao detector da Lemke disponível no laboratório, que faz uma aquisição das descargas parciais através de unidade de controle digital. E as DP são mostradas usando um software instalado num computador pessoal.

## 4. Detector de descargas parciais fabricado pela Lemke

O processo de aquisição e digitalização dos sinais de DPs vem experimentando um grande desenvolvimento nos últimos anos. Sistemas de aquisição com taxas de amostragem mais rápidas estão cada vez mais baratos e acessíveis.

O detector da Lemke [7] é um equipamento especializado para testes em dielétricos, diagnósticos e monitoramento de elementos de um sistema elétrico de potência. Com este equipamento, pode-se detectar DPs, diagnosticar os tipos de descargas detectadas, como também, importantes características para interpretação dos sinais de DPs:

- ✓ Fase dos sinais de descarga;
- ✓ Polaridade da descarga;
- ✓ Taxa de repetição e estabilidade das descargas;
- ✓ Variação da intensidade das descargas com a tensão de ensaio.

### 4.1 Características

As características elétricas do detector são dadas abaixo:

- Faixa de Frequência da Medição 50 / 60 Hz
- Mínima Carga Aparente Mensurável < 1 pC
- Máxima Carga Aparente Mensurável = 100.000 pC
- Atenuação da entrada ajustável entre 0 e 93 dB, em passos de 3 dB
- Resolução para pulsos simples de até 100 kHz (Taxa de Repetição)
- Distância Crítica entre dois Pulsos > 10  $\mu$ s
- Detector de Banda Larga:  
Frequência de corte inferior: 100 kHz  
Frequência de corte superior: 1000 kHz
- Identificação da polaridade do pulso a partir de 1 pC

## 4.2 Componentes do Detector de DP

O detector é composto de um sistema de medição (LDS-6 PD MEASUREMENT SYSTEM) ligado a um computador através de um cabo de rede, uma impedância de medição (LDM-5/U MEASURING IMPEDANCE) e um calibrador (LDC-5 CALIBRATOR).

### 4.2.1 Sistema de Medição do LDS-6

A detecção de descargas parciais é uma ferramenta indispensável para testes qualificados em laboratório depois da fabricação de componentes de alta potência, como também, para diagnósticos e monitoração após a instalação desses componentes.

Devido à larga faixa de aplicação para medições de DPs, o arranjo da instrumentação pode ser flexível de acordo com uma situação de medição particular. Isso ocorre tendo em vista os hardwares internos disponíveis no sistema de medição LDS-6, assim como as interconexões entre os mesmos, como mostradas abaixo através do diagrama esquemático básico do LDS-6.

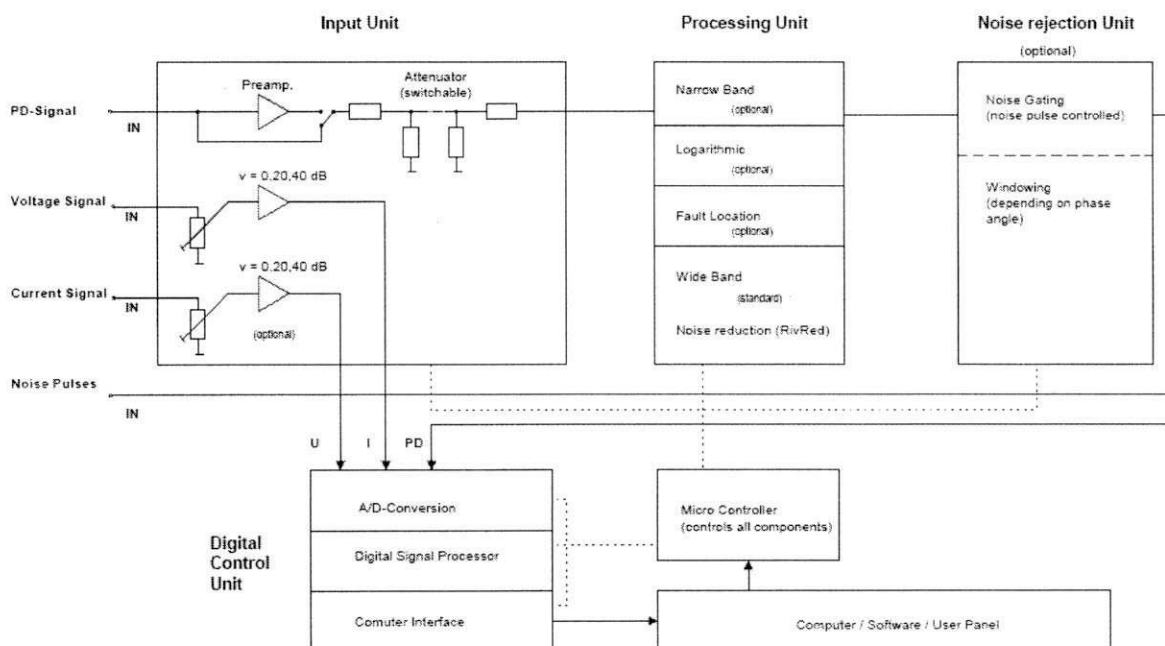


Figura 4.1 Diagrama esquemático básico do LDS-6

As principais unidades do detector e suas respectivas características são descritas a seguir:

**(I) UNIDADE DE ENTRADA**

Possui duas entradas:

***Entrada de DP***

- Impedância de entrada = 50  $\Omega$

(Ajustável para 500  $\Omega$  com amplificador adicional)

- Máxima amplitude do impulso = 100 V

***Entrada de Tensão***

- Impedância de entrada = 1 M $\Omega$
- Máxima amplitude  $V_{rms}$  = 50 V

**(II) UNIDADE DE PROCESSAMENTO**

Existem diferentes unidades de processamento selecionáveis, como:

***Banda Larga Linear***

- Sensibilidade máxima:  $q = 0,5$  pC (com RSR = 6 dB)
- Modos de Operação: “Alta Sensibilidade” e “Baixa Sensibilidade” (a partir de 20 pC)

***Banda Larga Logarítmica***

- Faixa Dinâmica 60 dB (30 pC ... 30 nC aprox.)

***Banda Estreita***

- Frequência central ajustável em três faixas:
  - 240 kHz (200 - 280 kHz)
  - 480 kHz (440 - 520 kHz)
  - 1,6 MHz (1,1 - 2,1 MHz)
- Largura da Banda = 40 kHz aprox.
- Nível Interno de Ruído = 3 pC



### **(III) UNIDADE DE CONTROLE DIGITAL**

A unidade de controle digital representa a relação principal entre a parte analógica do detector de DPs e o computador pessoal. Esta unidade inclui conversores analógico/digital assim como o controle baseado em microprocessador.

- **CARGA:** Impedância de saída de 1K Ohm, a opção “CHARGE” dá o sinal análogo proporcional à carga aparente derivada do estágio da integração. O sinal pode ser visualizado na modalidade clássica através do osciloscópio.
- **AMPLIFICADOR:** dá a faixa larga do sinal amplificado de DP derivado do quadripolo de medição externo.
- **CONTROLES 1,2:** Ambas as saídas do suplemento são pretendidas para finalidades do controle digital de componentes disponíveis opcionais externos tais como o gerador de pulsos, etc.

#### **4.2.2 Impedância de Medição**

##### *Especificações*

- Impedância da Saída: 50  $\Omega$
- Tempo de subida do pulso: 35 ns
- Limite de frequência superior: 10 MHz
- Capacitor de baixa tensão de acordo com a requisição do cliente

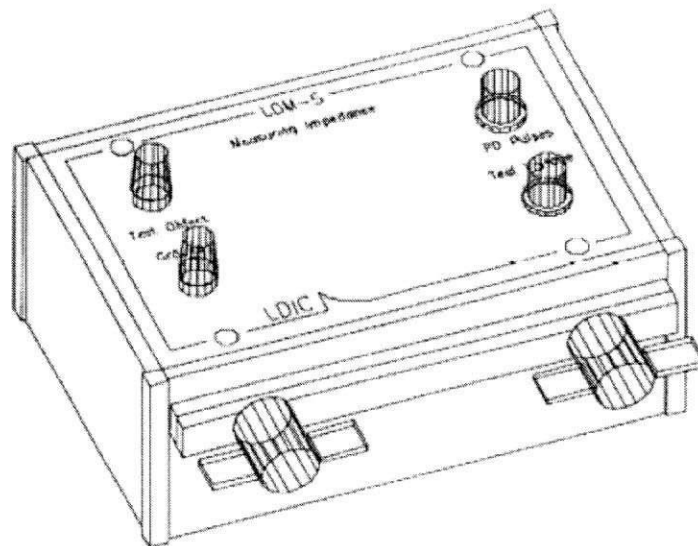


Figura 4.2 Impedância de medição (LDM-5/U)

### 4.2.3 Calibrador

#### *Especificações*

- Cargas Geradas: 5, 20, 100, 500 pC
- Erro < 5%
- Capacitor interno: 100 pF
- Duração da injeção do pulso: 50 ns
- Taxa de repetição do pulso: 500 Hz
- Impedância interna: 50  $\Omega$

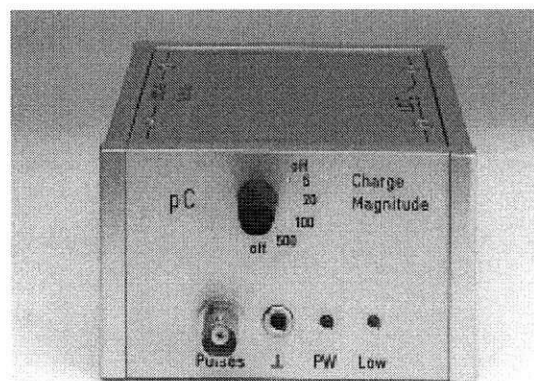


Figura 4.3 Calibrador (LDC-5)

## 5. Experimentos práticos com o Detector

Os ensaios elétricos foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande. Os sinais de descargas parciais foram medidos em transformadores de potencial e de distribuição da classe de 15 kV, que comprovadamente apresentavam descargas parciais. O transformador é ilustrado na Figura 5.1.

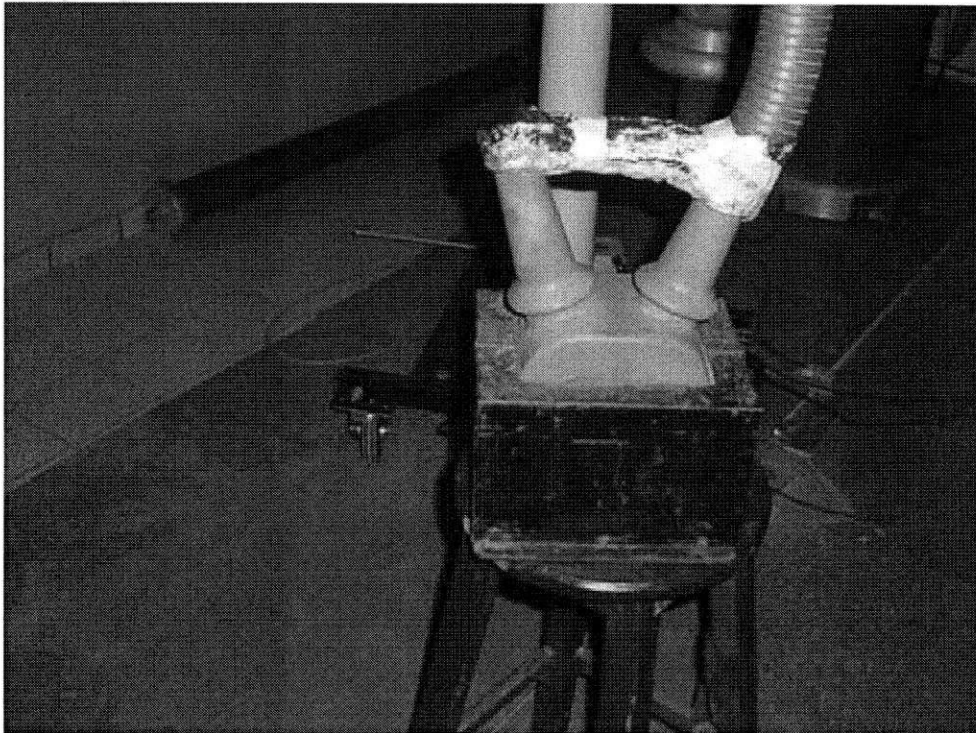


Figura 5.1 Transformador de Potencial da classe de 15 kV

Os experimentos foram realizados com aplicação de tensão 20% acima da tensão de iniciação de descargas parciais. Tanto a calibração do detector, quanto as medições foram observadas utilizando um **LDS-6 Software da LEMKE** [7] próprio para o detector, que será descrito adiante.

## 5.1 Montagem do circuito de medição

O primeiro passo foi curto circuitar os terminais de entrada e saída do transformador e, depois fazer a montagem do circuito de medição de acordo com a norma IEC 60270, como mostra a figura abaixo:

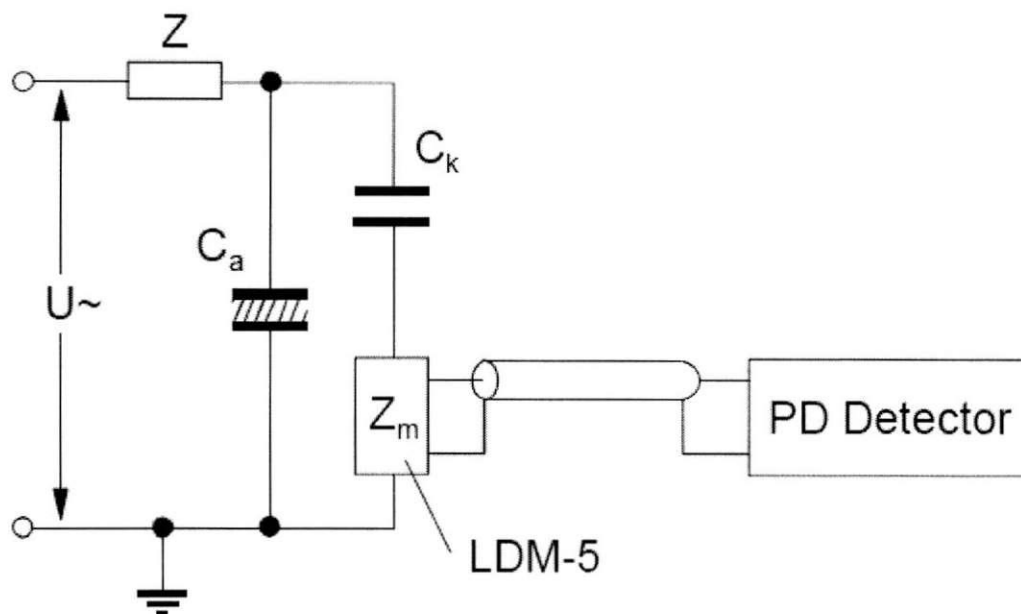


Figura 5.2 Impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento

Onde:  $C_k$  = capacitor de acoplamento

$C_a$  = transformador com os terminais curto circuitados na entrada e na saída

- **Primeiro passo:** conectar o computador ao LDS-6 utilizando o cabo de rede fornecido.
- **Segundo passo:** conectar as entradas “PD Input” e “VOLTAGE Input” do LDS-6 no “PD Pulses” e “Test Voltage” do LDM-5/U, respectivamente.
- **Terceiro passo:** conectar os terminais de entrada do transformador no LDM-5/U e os terminais de saída do transformador no capacitor de acoplamento.

## 5.2 Calibração

Nos ensaios de descargas parciais, a carga aparente  $q$  dos pulsos de corrente das descargas medidas é normalmente especificada. Contudo, cada sistema de medição pode

somente detectar a carga mensurável  $q_m$ , que depende do tamanho do capacitor de acoplamento  $C_k$ , sendo apenas uma fração da carga aparente.

A calibração correta do circuito de ensaio torna-se parte essencial da medição das descargas parciais. O processo de calibração deve ser repetido para cada arranjo de ensaio ou sempre que grandes variações no circuito forem feitas.

O gerador de calibração LDC-5 é parte integrante do instrumento de medição. Ele consiste de um gerador de onda quadrada. Os pulsos de calibração  $q_o$ , são emitidos através de um capacitor pequeno  $C_o$ . O tempo de subida é em torno de 50 ns com frequência de 500 Hz, de forma a assegurar que os pulsos tenham um espectro de frequência similar aos pulsos de descargas parciais.

Deve-se conectar o calibrador LDC-5 como mostra o circuito abaixo:

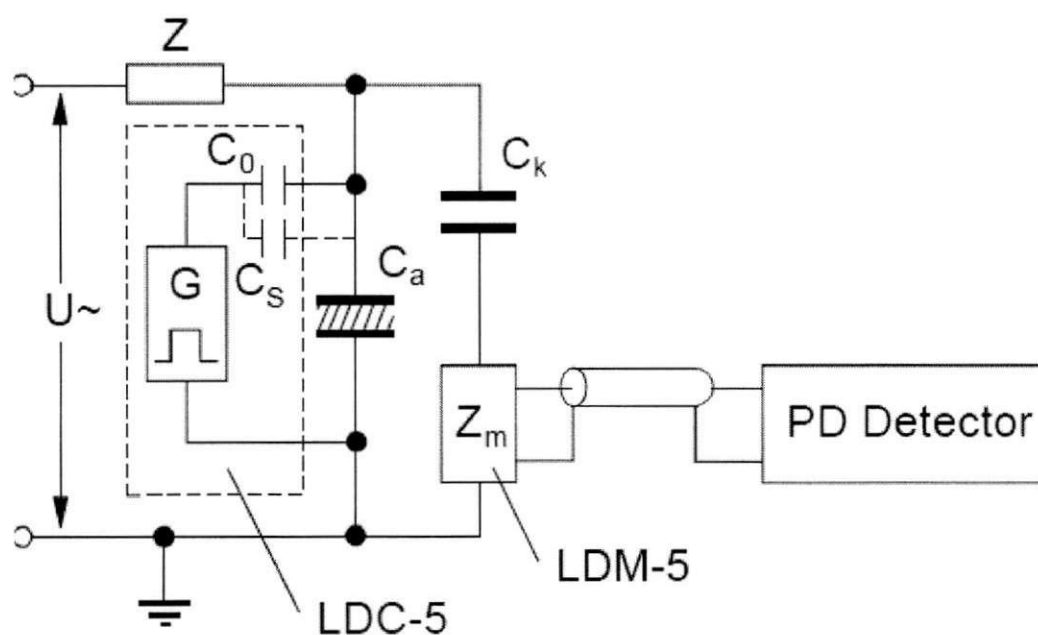


Figura 5.3 Circuito de calibração

Após conectar o calibrador no objeto de teste, deve-se aterrar o calibrador e em seguida selecionar a magnitude da carga desejada.

Em seguida, deve-se utilizar o LDS-6 software para iniciar a calibração. Na figura abaixo, observa-se a interface principal do programa com todas as funções disponíveis. Inicialmente, escolhe-se a função **“Calibration”**.

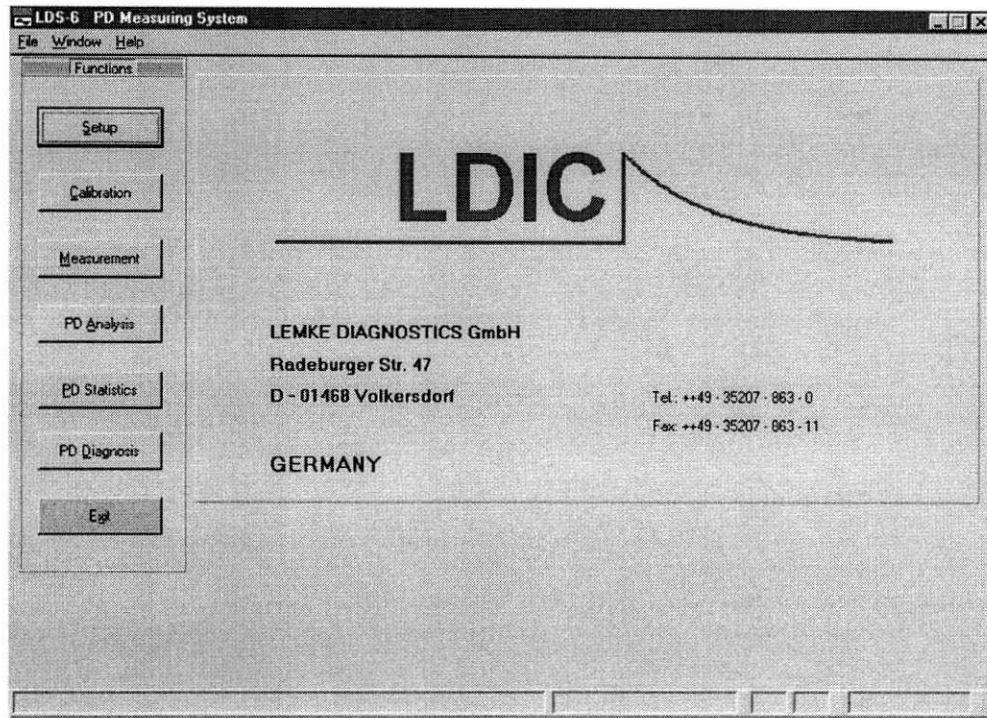


Figure 5.4 Interface principal do programa

Na interface de calibração, deve-se escolher em **“Calibration signal”** o sinal de calibração, ou a carga do calibrador. O valor da carga injetada nos terminais do objeto de teste deve estar entre 50% e 200% do valor da carga esperada devido as DP’s, de acordo com o IEC 60270. A opção **“Autoranging”** indica uma seleção automática do ganho do amplificador. A opção **“Int. calibrator”** diz respeito à calibração interna.

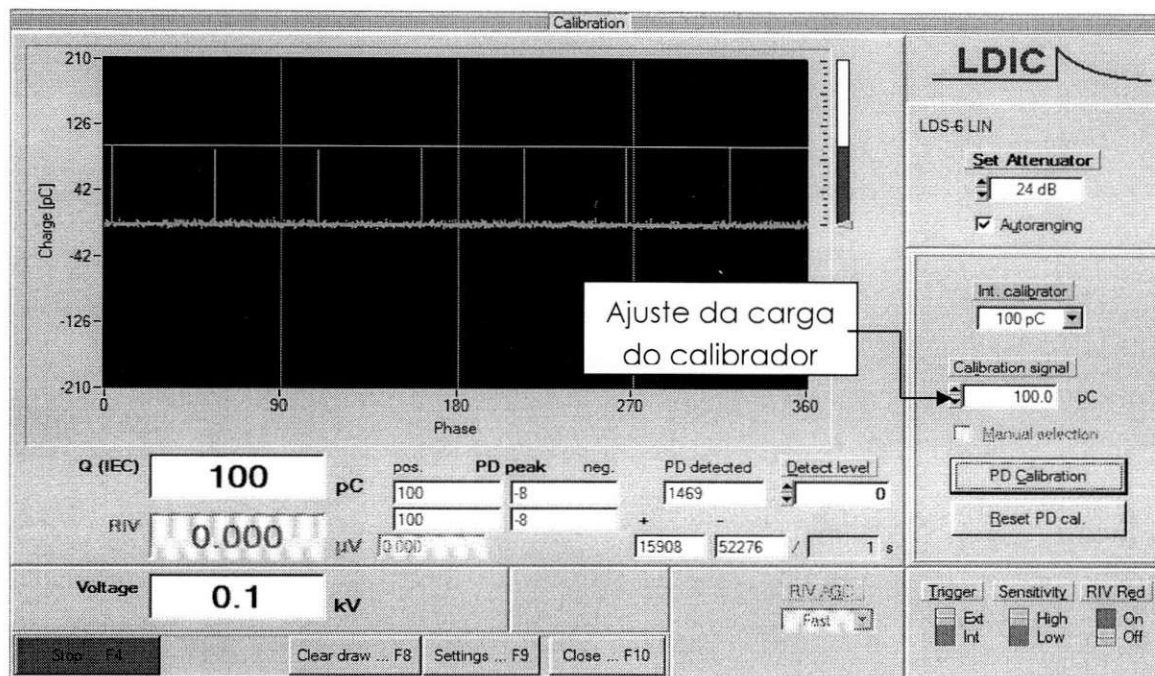


Figura 5.5 Interface utilizada para calibração

Após selecionar os parâmetros desejados que foram citados anteriormente, clique em “*PD Calibration*”. Quando “*PD peak*” (pico de descargas parciais) chegar próximo do valor ajustado para o sinal de calibração, pode-se parar a calibração e iniciar as medições de descargas parciais.

### 5.3 Medições

Na interface principal do programa, escolhe-se a função “Measurement”. Com essa função é possível observar as descargas parciais, a tensão em kV medida pelo divisor capacitivo da montagem feita e salvar essas medições para fazer, posteriormente, a análise, estatística e diagnóstico das descargas detectadas.

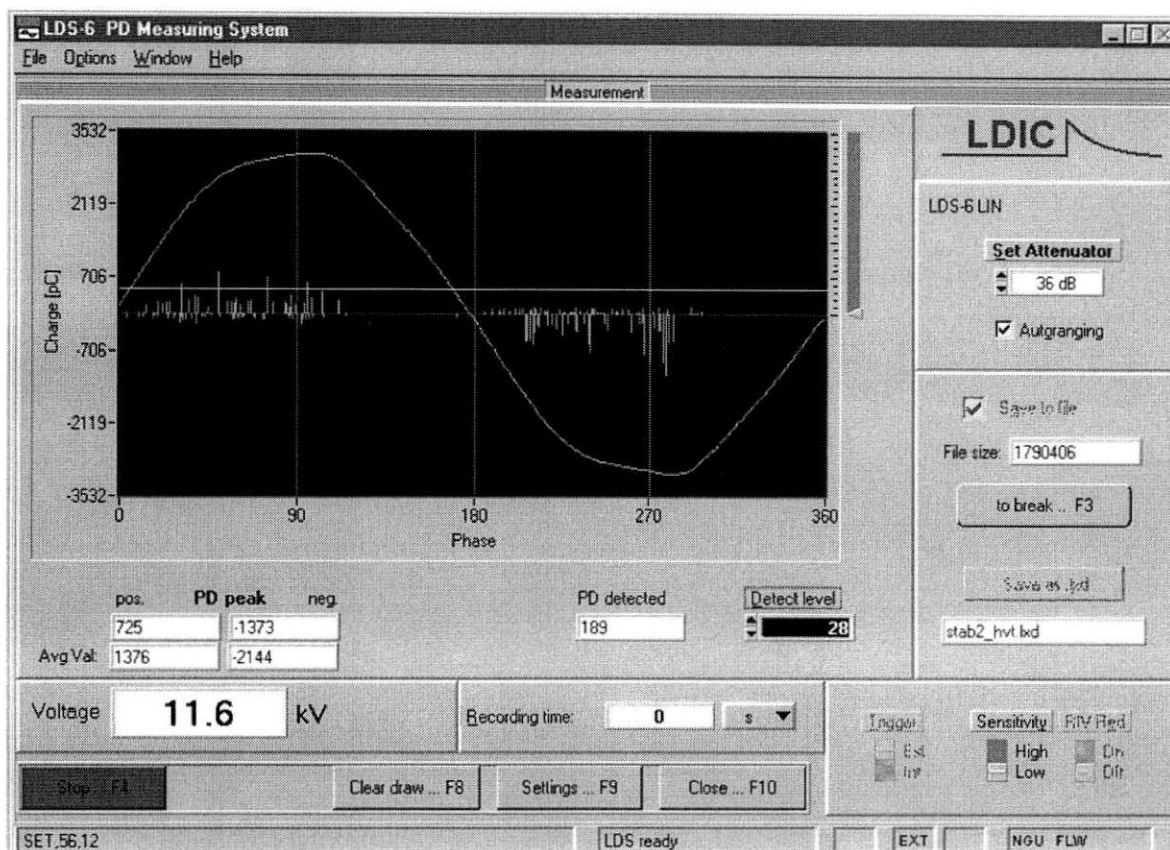


Figura 5.6 Interface do LDS-6 software utilizada para medições

As descargas detectadas acima estão na forma de pulsos, mas clicando em “Settings” ou apertando F9, é possível visualizar as descargas na forma de elipse ou de pontos como mostra a figura abaixo:



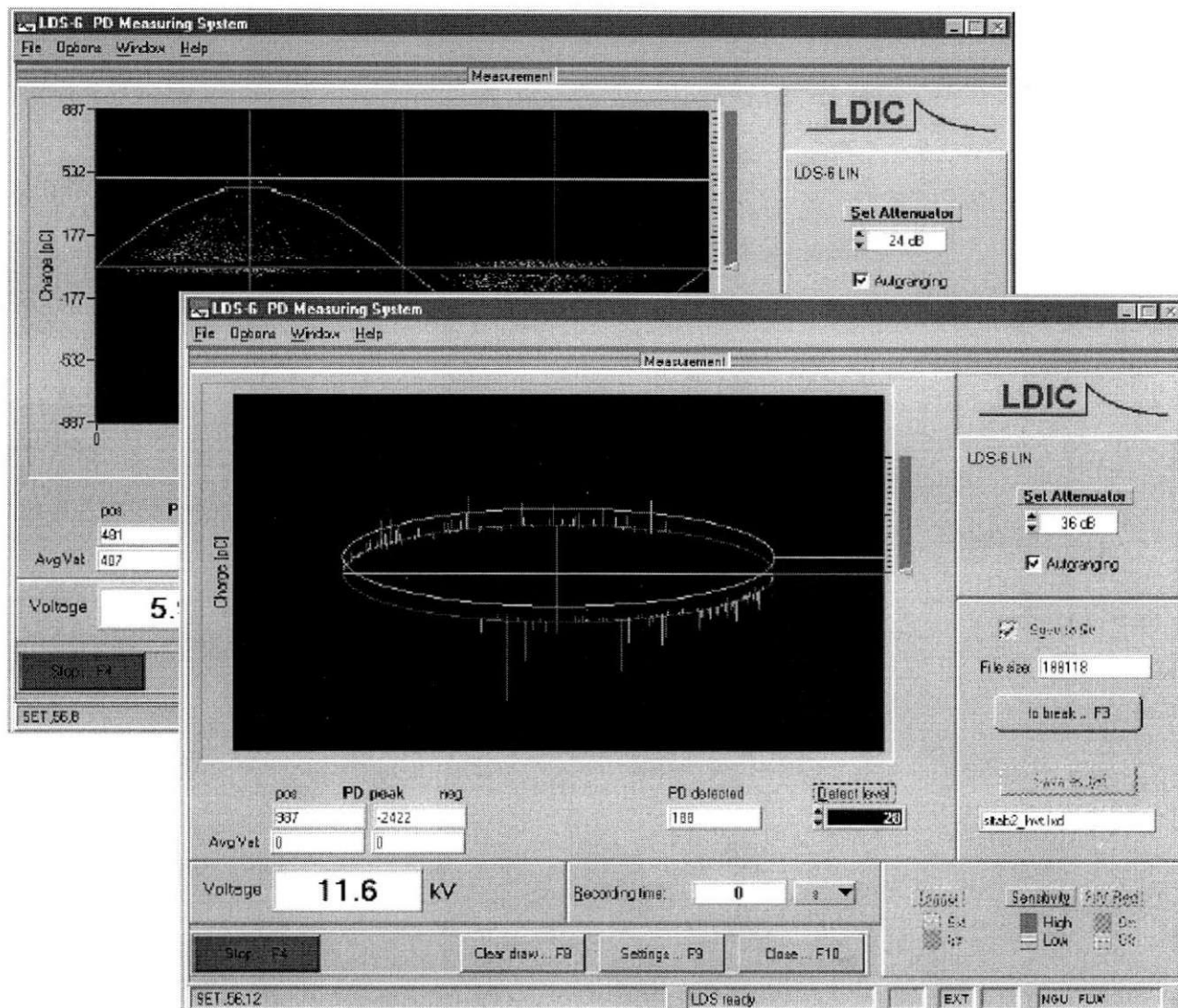


Figura 5.7 Visualização das descargas na forma de pontos e na forma de elipse

Para salvar as medições feitas visando uma análise futura dos dados, selecione a opção “Save to file” e em seguida “Save as .lxd”, como ilustra a figura seguinte.

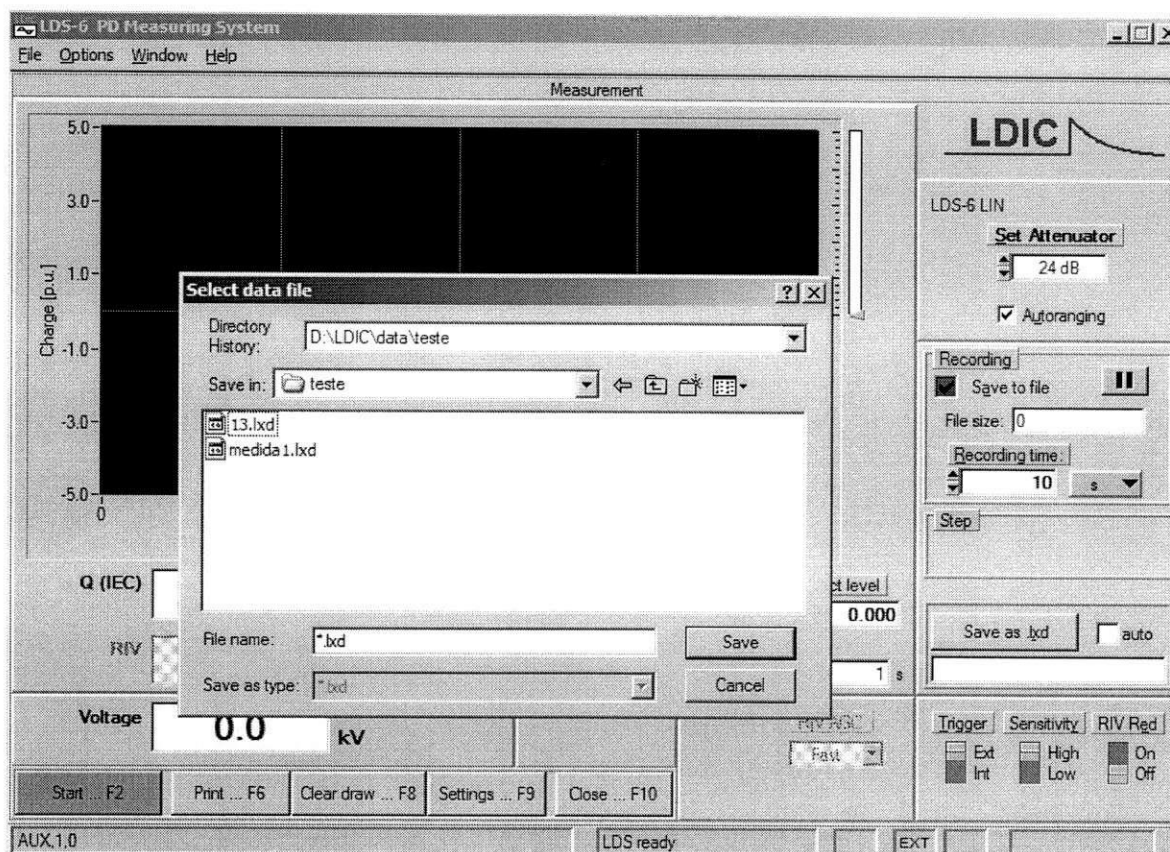


Figura 5.8 Salvando medições no formato lxd

Voltando para o menu principal, os dados salvos anteriormente podem ser utilizados para fazer a análise, a estatística e o diagnóstico das descargas. Como por exemplo, a correlação entre as descargas, a classificação dos tipos de descargas detectadas, etc.

Com o uso do diagnóstico computadorizado do equipamento comercial foi possível garantir a predominância das descargas em vários tipos de padrões de descargas. As descargas detectadas foram: descargas parciais, descargas superficiais, corona com ponta aterrada, corona com ponta em alta tensão e isolamento da barra da máquina.

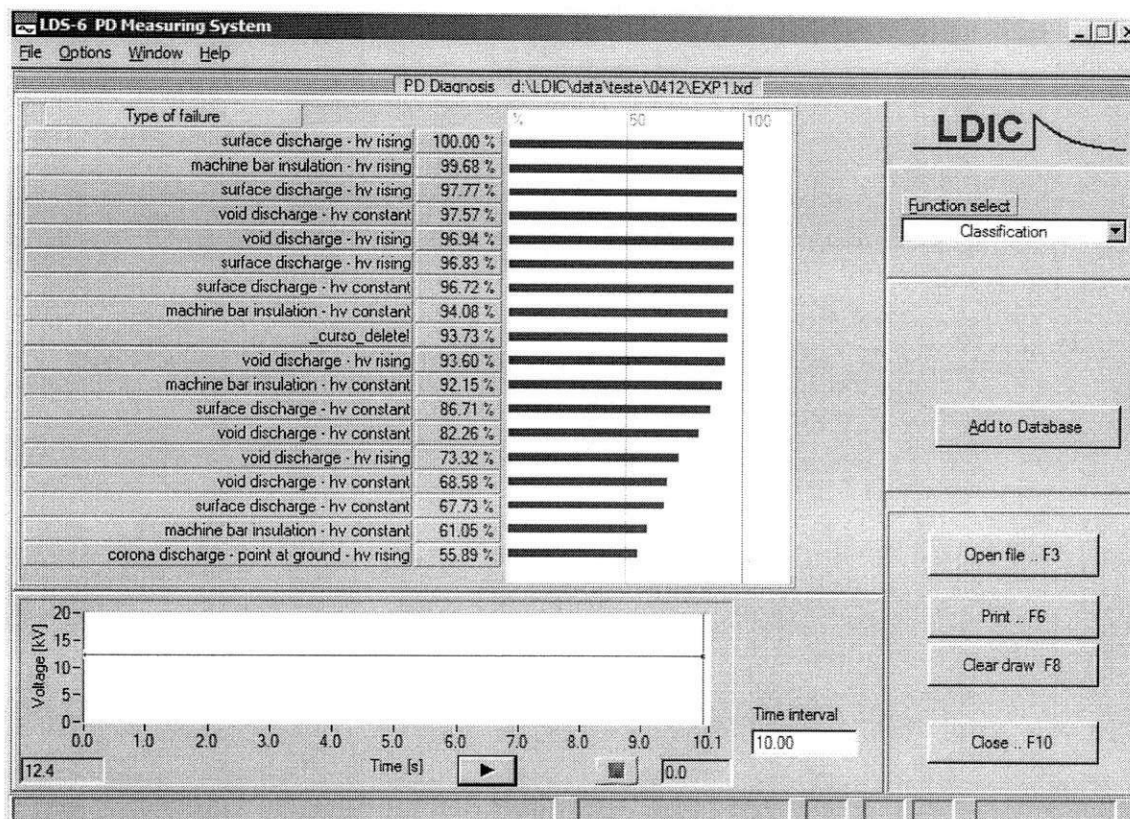


Figura 5.9 Classificação dos tipos de descargas detectadas no experimento

## 6. Conclusão

Atualmente, detectores com unidades de controle digital vêm sendo desenvolvidos para captar DP com o objetivo de monitorar e diagnosticar linhas de transmissão, transformadores de potencial e equipamentos de potência em geral.

Dessa forma, é possível concluir que processamento digital de sinais e suas técnicas de eliminação de ruídos externos e ruídos inerentes ao processo de medição de descargas parciais apresentam resultados satisfatórios.

Este trabalho apresentou uma revisão sobre DP e, principalmente, experimentos práticos com o detector da Lemke com unidade de controle digital. Foram feitos experimentos em um transformador de potencial e distribuição da classe de 15 kV, comprovando a existência de descargas parciais (*void discharge*), assim como descargas superficiais e corona. A probabilidade de acontecerem descargas parciais neste transformador, segundo o diagnóstico dado pela Figura 5.9 é de 97,57%.

Logo, comprovada a eficiência do detector e aprendido o seu manuseio juntamente com o software para interface gráfica dos resultados, montou-se um guia de experimento, disposto no anexo deste trabalho.

## 7. Referências Bibliográficas

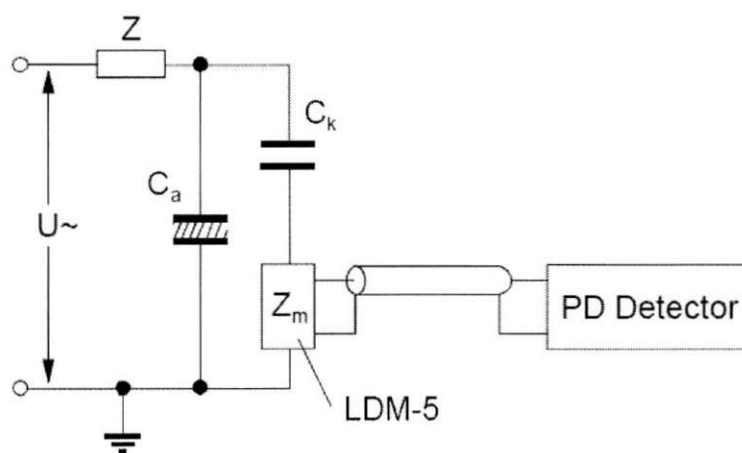
- [1] COSTA, E. G.; NEVES, W. L. A.; **Guia de experimento: Descargas Parciais**. Universidade Federal de Campina Grande. Dezembro, 1996.
- [2] NERI, M. G. G.; GOUVEIA, F. A. O.; COSTA, E. G.; **Utilização de Redes Neurais na Identificação de Descargas Parciais**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, pp. 1-5, 2006.
- [3] IEC 60270; **High-voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements**. IEC. 2000.
- [4] Shim, J.J. Soraghan, and W.H. Siew. **Digital Signal Processing Applied to the Detection of Partial Discharge: An Overview**. IEEE Electrical Insulation – Magazine, May/June 2000.
- [5] Shim, J.J. Soraghan, and W.H. Siew. **Application of Digital Signal Processing to the Detection of Partial Discharges Part 2: Optimized A/D Conversion**. IEEE Electrical Insulation – Magazine, July/August 2000.
- [6] Shim, J.J. Soraghan, and W.H. Siew. **Detection of PD Utilizing Digital Signal Processing Methods Part 3: Open-Loop Noise Reduction**. IEEE Electrical Insulation – Magazine, January/February 2001.
- [7] LEMKE DIAGNOSTICS GmbH. **User Manual: DIGITAL PARTIAL DISCHARGE MEASURING SYSTEM LDS-6**. Germany.

## Anexos

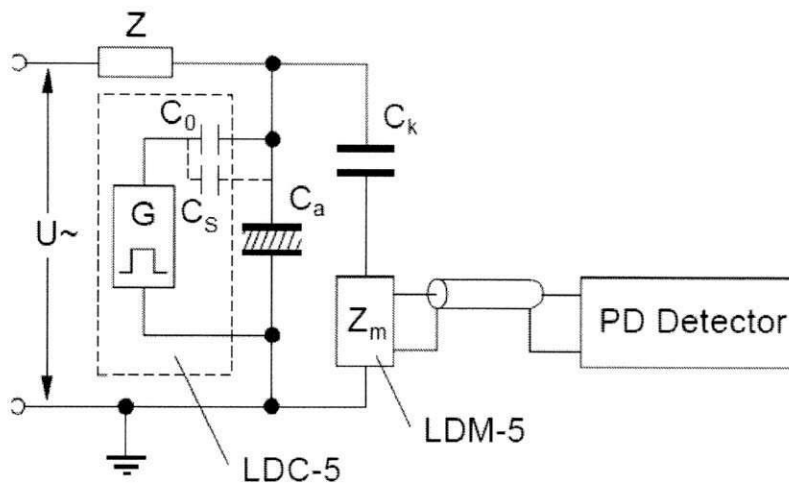
### EXPERIMENTO – Medição de Descargas em Transformadores de Potência

#### Parte Experimental

1. Faça uma revisão, na apostila ou nos livros, sobre descargas parciais (detecção e medição).
2. Anote as condições atmosféricas do laboratório (não se esquecer de apagar as luzes na hora dos ensaios).
3. Monte o circuito medição de descargas parciais usando o detector da Lemke, como ilustra a Figura abaixo:



4. Determine os níveis de ruído ambiental com a fonte de tensão desligada.
5. Determine os níveis de ruído ambiente com fonte energizada ( $U \cong Z$ . tensão de ensaio), sem objeto de teste.
6. Coloque o objeto de teste e faça a calibração (LDC-5), conforme a figura abaixo:



7. Retire o calibrador (LDC-5) e inicie os ensaios para detecção das descargas, colocando de 15 a 20% a mais que a tensão nominal do transformador.
8. Salve os resultados obtidos utilizando o software disponível.
9. Identifique e indique nas curvas (senóide e elipse) as descargas de corona positiva e negativa.
10. Meça as descargas parciais.
11. Obtenha o diagnostico dos ensaios conforme mostrado no tópico 5.3, listando os tipos de descargas detectadas.
12. Faça um relatório anotando os passos descritos anteriormente.