

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ISMAEL NORONHA**

**SISTEMA DE AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO, POR UMIDADE,  
DE ÓLEO ISOLANTE DE TRANSFORMADOR USANDO TÉCNICAS  
DE ULTRASSOM**

**ITAJUBÁ**

**2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ISMAEL NORONHA**

**SISTEMA DE AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO, POR UMIDADE,  
DE ÓLEO ISOLANTE DE TRANSFORMADOR USANDO TÉCNICAS  
DE ULTRASSOM**

Tese submetida ao programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção de título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.

Orientador: Luiz Eduardo Borges da Silva.

Co-Orientador: Giscard Francimeire Cintra Veloso.

**ITAJUBÁ**

**2012**

*Dedico este trabalho à minha esposa e  
companheira, Maria Aparecida e aos meus filhos,  
Igor e Arthur , pelo amor, ajuda e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Deus, por estar sempre presente me protegendo e iluminando meu caminho.

Ao professor Luiz Eduardo Borges da Silva, orientador presente, que acreditou e resgatou grandes valores acadêmicos e pessoais.

Ao professor Germano Lambert Tôrres por apoiar e confiar no meu trabalho.

Ao professor Giscard Francimeire Cintra Veloso, que forneceu grande suporte tecnológico, ferramentas matemáticas e computacionais que viabilizaram a conclusão deste trabalho, acima de tudo com excepcional competência e vontade de ajudar.

Ao Igor Leonardo de Sales e Noronha pelo grande apoio nas atividades de montar a documentação e as partes da bancada de ensaios.

Aos professores Marcos Aurélio de Souza e Luiz Fernando Barca, do NUSEC (Núcleo de Separadores Compactos- IEM/UNIFEI/PETROBRAS), pelo apoio imprescindível em disponibilizar o laboratório de ensaios físico-químicos de óleos isolantes.

Aos profissionais Tiago Bueno, Mário Luiz Veloso e equipe do Laboratório de ensaios de óleo de transformador da ALSTON\ Divisão de Transformadores de Medidas, de Itajubá, que sempre nos atendeu gentilmente nos fornecendo informações técnicas normalizadas, o precioso óleo isolante e o papel para realização dos ensaios.

# SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SIGLAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
CAPÍTULO 1.....	19
INTRODUÇÃO .....	19
CAPÍTULO 2.....	21
ÓLEO MINERAL ISOLANTE .....	21
2.1-PROPRIEDADES FÍSICAS.....	21
2.2-SOLUBILIDADE DA ÁGUA NO ÓLEO .....	22
2.3-ABSORÇÃO DA ÁGUA DO AR ÚMIDO PELO ÓLEO MINERAL DE TRANSFORMADOR .....	24
2.4-SOLUBILIDADE DA ÁGUA NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE.....	25
2.5-PROPRIEDADES ELÉTRICAS .....	25
2.5.1-RIGIDEZ DIELÉTRICAS .....	25
2.5.2-FATOR DE POTÊNCIA.....	27
2.6-COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES QUÍMICAS .....	27
2.6.1-COMPONENTES BÁSICOS DO ÓLEO MINERAL ISOLANTE .....	28
2.6.2-NÃO -HIDROCARBONETOS OU HETEROCOMPOSTOS .....	30
2.6.3-ÓLEOS DE BASE PARAFÍNICA E DE BASE NAFTÊNICA.....	30
2.6.4-COMPOSIÇÃO DOS ÓLEOS PARAFÍNICOS E NAFTÊNICOS .....	31
2.6.5-MISTURA DE ÓLEOS ISOLANTES .....	32
2.7-IMPORTÂNCIA DOS COMPOSTOS AROMÁTICOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO ÓLEO DE TRANSFORMADOR .....	32
2.8.1-EXAME VISUAL E COR (MÉTODO ASTM D1524).....	34
2.8.2-DENSIDADE ASTM D1298 .....	35
2.8.3-RIGIDEZ DIELÉTRICA (TENSÃO DE RUPTURA) .....	36
2.8.3.1-MÉTODO DO ELETRODO DE DISCO ASTM D877- TENSÕES ATÉ 230 kV.....	36
2.8.3.2- MÉTODO UTILIZANDO ELETRODOS VDE -ASTM D1816 TENSÕES ACIMA DE 230 kV .....	36
2.9-ENVELHECIMENTO DO ISOLANTE LÍQUIDO E SÓLIDO.....	37

2.9.1-BORRA SOLÚVEL E SEDIMENTOS EM ÓLEOS ENVELHECIDOS EM SERVIÇO .....	37
2.9.1.1-MÉTODO PADRÃO DE ENSAIO DE SEDIMENTO E BORRA SOLÚVEL DE ÓLEOS ISOLANTES ENVELHECIDOS EM SERVIÇO- ASTM D1698.....	37
2.9.2-OXIDAÇÃO DO ÓLEO ISOLANTE E CORROSÃO INTERNA DOS CONDUTORES DO TRANSFORMADOR.....	37
2.9.3-DEGRADAÇÃO DA CELULOSE.....	40
2.9.3.1- HIDRÓLISE.....	41
2.9.3.2-OXIDAÇÃO.....	42
2.9.3.3-PIRÓLISE.....	42
2.9.4- TENSÃO INTERFACIAL (TIF) - ASTM D971 e ASTM D2285 .....	43
2.9.4.1- MÉTODO DO ANEL - ASTM D971 .....	43
2.9.5- UMIDADE NO ÓLEO - TEOR DE ÁGUA PPM (PARTE POR MILHÃO)...	45
CAPÍTULO 3.....	47
TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS.....	47
3.1- ULTRASSOM .....	47
3.1.1- A GERAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA.....	47
3.1.1.1- ONDAS LONGITUDINAIS .....	47
3.1.1.2- ONDAS TRANSVERSAIS.....	48
3.1.2- EQUAÇÃO GERAL DE ONDAS ULTRASSÔNICAS .....	48
3.1.3- PROPRIEDADES DA ONDA ULTRASSÔNICA.....	49
3.1.3.1- VELOCIDADE DA ONDA .....	49
3.1.3.2- FREQUÊNCIA DA ONDA .....	49
3.1.3.3- COMPRIMENTO DA ONDA .....	49
3.1.4- PRESSÃO ACÚSTICA DO ULTRASSOM.....	50
3.1.5- INTENSIDADE ULTRASSÔNICA .....	51
3.1.6- IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ULTRASSÔNICA.....	51
3.1.7- REFLEXÃO ACÚSTICA EM INTERFACE .....	52
3.1.7.1- REFLEXÃO DA ONDA ACÚSTICA AO ATRAVESSAR A INTERFACE DE DOIS MEIOS DIFERENTES .....	53
3.1.7.2- COEFICIENTES DE REFLEXÃO-R E COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO-T DE PRESSÃO ACÚSTICA NA INTERFACE .....	54
3.1.7.3-ATENUAÇÃO DA ONDA ACÚSTICA.....	54
3.1.7.4-DISPERSÃO DA ONDA .....	54
3.1.7.5-ABSORÇÃO DA ONDA .....	55
3.2-TRANSDUTORES DE ULTRASSOM .....	55
3.2.1-TIPOS DE TRANSDUTORES DE ACORDO COM O NÚMERO DE CRISTAIS.....	57
3.2.2-MODO DE OPERAÇÃO DOS TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS.....	59
3.2.3-LIMITE DE EXCITAÇÃO DO TRANSDUTOR COM ONDA QUADRADA-MODO PULSADO.....	59
3.3-LÍQUIDO DE ACOPLAMENTO .....	60
3.4-CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DOS CRISTAIS TRANSDUTORES DO ULTRASSOM.....	60

CAPÍTULO 4.....	61
RECURSOS MATEMÁTICOS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS.....	61
4.1- TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA .....	61
4.1.1- DECOMPOSIÇÃO DE SINAIS .....	61
4.1.1.1- DECOMPOSIÇÃO DE SINAIS COM A TRANSFORMADA DE WAVELET DISCRETA.....	62
4.1.1.2- COMO FUNCIONA A TRANSFORMADA .....	63
4.1.1.3- CÁLCULO DOS COEFICIENTES .....	64
-CORRELAÇÃO .....	64
-CÁLCULO DOS COEFICIENTES DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA.....	66
4.1.1.4- ALGORITMO PARA A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA...68	
4.1.1.5- APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET DISCRETA NA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE SINAIS ACÚSTICOS .....	71
4.2- ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) .....	73
4.2.1- CONCEITOS BÁSICOS.....	73
4.2.1.1- AUTOVETORES .....	73
4.2.1.2- AUTOVALORES.....	74
4.2.1.3-CONJUNTO DE DADOS.....	75
4.2.1.4-DESVIO PADRÃO .....	75
4.2.1.5-VARIÂNCIA.....	76
4.2.1.6-COVARIÂNCIA .....	76
4.2.1.7- MATRIZ DE COVARIÂNCIA .....	77
4.2.2- DESCRIÇÃO DA TÉCNICA PCA.....	77
4.2.3-INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS ATRAVÉS DO PCA .....	78
CAPÍTULO 5.....	80
BANCADA DE ENSAIO A FLUXO CONTÍNUO PARA CONTAMINAÇÃO OU SECAGEM DE ÓLEO ISOLANTE .....	80
5.1- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS .....	86
5.2- EXPERIMENTOS DE CONTAMINAÇÃO DO ÓLEO ISOLANTE.....	89
5.3- PROCEDIMENTOS DE ENCHIMENTO E PREPARO DA BANCADA DE ENSAIOS DE CONTAMINAÇÃO OU SECAGEM DE ÓLEO NYNAS( 4000A). .....	90
5.3.1- SECAGEM DO ÓLEO.....	90
5.3.2-UMIDIFICAÇÃO DO ÓLEO .....	91
CAPÍTULO 6.....	92
PROCESSAMENTO DO SINAL ACÚSTICO PARA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS.....	92
6.1- PRÉ-PROCESSAMENTO .....	92
6.2- DECOMPOSIÇÃO NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA POR TWD .....	94
6.3- SELEÇÃO DO PARÂMETRO .....	95
CAPÍTULO 7.....	97

RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	97
7.1- PREPARO DA BANCADA DE ENSAIOS.....	97
7.2- CONSIDERAÇÕES SOBRE O ÓLEO ENSAIADO E REGIME DOS ENSAIOS.....	97
7.3- EXPERIMENTO DE CONTAMINAÇÃO DO ÓLEO PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE TENDÊNCIA DE UMIDIFICAÇÃO.....	97
7.4- EXPERIMENTO DE SECAGEM DO ÓLEO ISOLANTE PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE TENDÊNCIA DE DESUMIDIFICAÇÃO.....	98
CAPÍTULO 8.....	100
CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	100
CAPÍTULO 9.....	101
PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
APÊNDICE.....	107
PUBLICAÇÕES E EVENTOS.....	107



## RESUMO

A avaliação da tendência de contaminação do óleo de transformador por umidade, através de técnicas de ultrassom, pode diagnosticar não apenas seu regime de operação, mas também fornecer dados importantes sobre o estado de seu sistema de isolamento. A técnica de Karl Fischer, entre outras, é uma das mais confiáveis para se medir o teor de água do óleo isolante. A técnica ultrassônica, pode detectar a umidade do óleo, de modo invasivo, através de amostras, ou não invasivo, obtida diretamente na parede da aleta de refrigeração, através de sinais acústicos que, ao viajar no líquido isolante, tem suas características acústicas alteradas pela presença de água. A resposta dinâmica do sistema de isolamento líquido muda com as variações físico-química do óleo, modificando as características de resposta em frequência e forma da onda acústica, que percorre o óleo, trazendo informações que devidamente tratadas, revelam a contaminação do óleo por umidade. Uma bancada experimental hidro-pneumática foi montada no Laboratório de Análise Preditiva (LAP), operando em fluxo contínuo para processamento do óleo isolante, em regime semelhante aos transformadores de potência. Uma bomba de cavidade progressiva circula o óleo dentro de uma cubeta instrumentada por ultrassom. O processo de secagem ou umidificação do óleo é obtido por filtros de água e umidificadores, desenvolvidos no laboratório. As curvas de tendência de contaminação do óleo com umidade são obtidas dos sinais elétricos do transdutor acústico, tratados usando recursos matemáticos de Transformada Wavelet Discreta (TWD) e Técnica de Análise de Componentes Principais (PCA), com acompanhamento simultâneo de medidas do teor de umidade por Karl Fischer, como método de controle, garantindo sustentabilidade e robustez nos resultados obtidos neste trabalho de tese.

**PALAVRAS-CHAVE:** óleo isolante; umidade; transformador; sistema de isolamento; ultrassom; medidor de Karl Fischer;

## **ABSTRACT**

The evaluation of trend contamination of transformer oil for moisture, using ultrasound techniques, not only can diagnose their system of operation, but also provide important data about the state of your system insulation. The Karl Fischer method, among others, is one of the most reliable for measuring the water content of the insulating oil. The ultrasonic technique, can detect moisture in the oil, so invasive, using samples, or noninvasive, obtained directly on the wall of the cooling fin through the acoustic signal, which travel in the insulating liquid, its acoustic characteristics have changed by the presence of water. The dynamic response of liquid insulation system will change with changes in physical-chemical, oil modifying characteristics of frequency response and acoustic waveform that travels in the oil, providing information that properly updated, that will reveal the oil contamination by moisture. A hydraulic-pneumatic experimental arrangement has constructed in the Predictive Analysis laboratory (LAP), operating by continuous flux to processing of insulating oil, in the similar regime of the power transformers. A progressive cavity pump circulates oil in the ultrasound instrumented cup. The process of drying or humidification oil is obtained by waters filters our humidifiers, developed in laboratory. The contamination trend curves of oil with moisture are obtained from electric signal of acoustic transducer and treated using mathematical resources of Discrete Wavelet Transform (TWD) and technical of Principal Components Analysis (PCA), with simultaneous monitoring measures of moisture content by Karl Fischer, as control method, ensuring sustainability and robustness in results obtained in this work thesis.

**KEYWORDS:** insulation oil; moisture; power transformer; insulation system; ultrasound; Karl Fischer's meter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Solubilidade da água no óleo .....	23
Figura 2. 2- Solubilidade da água no óleo isolante conforme o teor dos aromáticos .....	24
Figura 2. 3- Absorção da água do ar úmido pelo óleo mineral do transformador. ....	25
Figura 2. 4- Influência da água sobre a rigidez dielétrica.....	26
Figura 2. 5- Influências das impurezas sólidas do óleo isolante sobre a rigidez dielétrica. .	27
Figura 2. 6- Representação química básica dos hidrocarbonetos. ....	29
Figura 2. 7- Composição genérica do óleo de transformador.....	33
Figura 2. 8- Densímetro de óleo isolante .....	35
Figura 2. 9- Processo de oxidação dos óleos. ....	39
Figura 2. 10- Molécula de celulose.....	40
Figura 2. 11- Variação da resistência mecânica do papel em função do teor de água e do tempo de envelhecimento. ....	41
Figura 2. 12- Produtos de degradação do papel.....	42
Figura 2. 13- Relação da umidade do papel e óleo em função da temperatura (diagrama de Nielsen).....	43
Figura 2. 14- Tensiômetro mecânico. ....	44
Figura 2. 15- Diagrama do princípio da titulação de Karl Fischer. ....	45
Figura 2. 16- Gráfico para determinação da rigidez dielétrica do óleo isolante em função do teor de água- comparação entre os métodos ASMT D877 e D1816. ....	46
Figura 3. 1- Onda Longitudinal. ....	48
Figura 3. 2- Reflexão da onda em interface.....	53
Figura 3. 3- Transdutor ultrassônico monocristal S 9208- AF84- Physical Acoustic Corporation.....	57
Figura 3. 4- Características do transdutor ultrassônico S908 da Physical Acoustic.....	58
Figura 3. 5- Onda mecânica de saída de um transdutor ultrassônico com excitação em pulso de tensão de 2,2 MHz. ....	59
Figura 3. 6- Equivalente elétrico de um material piezoelétrico submetido ao sinal alternado. ....	60
Figura 4. 1- Variando o parâmetro escala (j) da Wavelet Daubechies 2. ....	64
Figura 4. 2- Variando o padrão de deslocamento de tempo da Wavelet Daubechies 2.....	64

Figura 4. 3- Cálculo da correlação cruzada. ....	65
Figura 4. 4- ilustração do cálculo do coeficiente da transformada da Wavelet Discreta. ....	66
Figura 4. 5- Transitório e Wavelet em escalas diferentes. ....	67
Figura 4. 6- Transitório e Wavelet na mesma escala. ....	67
Figura 4. 7- Variação da escala, porém a norma unitária é mantida. ....	69
Figura 4. 8- Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta para 3 níveis de decomposição. .....	70
Figura 4. 9- Análise no domínio da frequência. ....	71
Figura 4. 10- Exemplo de sinal acústico. ....	72
Figura 4. 11- Decomposição do sinal acústico da figura 10 em 3 níveis com a Transformada Wavelet Discreta. ....	73
Figura 4. 12- Primeiro componente principal e seus respectivos scores. ....	79
Figura 4. 13- Terceiro componente principal e seus respectivos scores. ....	79
Figura 5. 1- Diagrama em blocos da bancada de ensaio a fluxo contínuo de óleo isolante. ....	80
Figura 5. 2- Diagrama hidro-pneumático da bancada de ensaios de umidificação ou secagem de óleo. ....	82
Figura 5. 3- Bancada de ensaios de umidificação ou secagem de óleo de transformador. ....	84
Figura 5. 4- Reservatório de condicionamento de óleo e cubeta instrumentada por ultrassom para aquisição do sinal de umidade. ....	85
Figura 5. 5- Cubeta instrumentada por ultrassom para aquisição do sinal de umidade do óleo isolante. ....	86
Figura 5. 6- Medidor de Teor de Umidade Coulométrico de Karl Fischer modelo C20. ....	87
Figura 5. 7- Sistemas de aquisição de dados da National Instruments. ....	88
Figura 5. 8- Diagrama em blocos do sistema de umidificação ou secagem do óleo isolante. .....	89
Figura 6. 1- Sinal acústico obtido nos ensaios. ....	92
Figura 6. 2- Pulso extraído do sinal acústico. ....	93
Figura 6. 3- Pulso normalizado. ....	93
Figura 6. 4- Ilustração da forma de cálculo dos parâmetros. ....	94
Figura 6. 5- Resultado do PCA do primeiro conjunto da tabela 6.1. ....	96
Figura 7. 1- Curva de tendência de contaminação por umidade do experimento realizado com óleo isolante novo de 21/06/12 a 29/06/12 (T= 25°C). ....	98

Figura 7. 2- Curva de tendência de desumidificação do óleo isolante de 03 a 05/07/12,  
acompanhado com medidas de Karl Fischer. ....99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Viscosidade de óleos isolantes. ....	22
Tabela 2. 2- Tipos de óleo isolante de acordo com composição química. ....	31
Tabela 2. 3- Fatores de diferenciação dos óleos no Brasil.....	32
Tabela 2. 4- Tipos de isolantes sólidos celulósicos e materiais básicos usados na fabricação. .....	40
Tabela 3. 1- Valores de comprimento de onda em função da frequência para os materiais aço, água e óleo.....	50
Tabela 3. 2- Impedância acústica do som e densidade dos materiais. ....	52
Tabela 3. 3- Alguns materiais piezoelétricos e suas características. ....	56
Tabela 3. 4- Características adicionais do transdutor ultrassônico S9208 (tabela original de fábrica).....	58
Tabela 5. 1- Composição química básica do óleo isolante NYTRO 4000A de fabricação NYNAS.....	91
Tabela 6. 1- Teores de umidade das Amostras de Óleo utilizadas para seleção de parâmetros.....	95
Tabela 6. 2- Parâmetros selecionados como indicadores de teor de umidade.....	96

## LISTA DE SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação brasileira de normas técnicas;
<b>ASMT</b>	American Society for testing Material;
<b>BNC</b>	Bayonet Nut Coupling (conector padrão de encaixe rápido para cabos de transmissão de sinais);
<b>COBE</b>	Comitê brasileiro de Eletricidade, Eletrônica e Iluminação Pública;
<b>CNP</b>	Conselho Nacional de Petróleo;
<b>DGA</b>	Dissolved Gas Analysis (Análise de gases dissolvidos no óleo isolante);
<b>DP</b>	Degree of Polymerization (grau de polimerização do papel Kraft);
<b>EPRI</b>	Electric Power Research Institute;
<b>FAL</b>	Furfuraldeído (compostos furânicos dissolvidos no óleo isolante);
<b>IEC</b>	International Electrotechnic Commission;
<b>IESTI</b>	Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação (UNIFEI);
<b>KF</b>	Karl Fischer (método coulométrico de medida do teor de umidade do óleo isolante);
<b>LAP</b>	Laboratório de Análise Preditiva (IEST/UNIFEI);
<b>MML</b>	Matlab Matrix Laboratoty;
<b>NBR</b>	Norma brasileira Regulamentadora;
<b>PC</b>	Personal Computer;
<b>PCA</b>	Análise de Componentes Principais;
<b>PCB</b>	Bifenil Policlorado;
<b>PPM</b>	Parte por milhão;
<b>PVDF</b>	Polyvinylidene fluoride (plástico de enegenharia com propriedades piezoelétricas).
<b>TDS</b>	Tectronics digital scope (ociloscópio digital);
<b>TIF</b>	Tensão interfacial;

<b>TWD</b>	Transformada Wavelet Discreta;
<b>UNIFEI</b>	Universidade Federal de Itajubá;
<b>VDE</b>	Verband Deutcher Elektro-Techniker (Associação de Normas Alemãs de Eletricidade);



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\partial^2$	Derivada parcial de segunda ordem;
$\Delta_{xt}$	Microdeformação no cristal transmissor de ultrassom;
A	Amplitude do movimento das partículas ao ultrassom;
C	Carbono;
c	Velocidade acústica;
$C_2H_2$	Acetileno;
$C_2H_4$	Etileno;
$C_2H_6$	Etano;
$C_3H_4N_2$	Imidazol;
$C_5H_5N_5$	Piridina;
$CH_2OH$	Metanol;
$CH_3$	Metilo;
$CH_4$	Metano (álcool metílico)
CO	Monóxido de carbono;
$CO_2$	Dióxido de Carbono;
d	Densidade;
d	Distância percorrida pela onda ultrassônica;
$d_{33}$	Coefficiente piezoelétrico na direção 3 (longitudinal "Z") na 3ª superfície do cristal piezoelétrico;
dB	Decibel;
f	Frequência da onda ultrassônica;
$g_{33}$	Constante de pressão piezoelétrica na direção 3 (Z) e 3ª superfície do cristal transdutor receptor;
$H^+$	Íon hidrogênio;

$H_2$	Hidrogênio;
$H_2O$	Água;
$h_{33}$	Constante de deformação piezoelétrica na direção 3 (Z) da 3ª superfície do cristal transdutor receptor .
$I$	Intensidade da onda acústica;
$I_2$	Iodo;
$KOH$	Hidróxido de potássio;
$l$	Espessura do cristal ultrassônico;
$l_n$	Logaritmo neperiano;
$N_2$	Nitrogênio;
$O^-$	Íon oxigênio;
$OH$	Álcool (hidroxila);
$p$	Pressão ultrassônica;
$P_{at}$	Pressão atmosférica;
$P_{N_{H_2O}}$	Pressão de vapor de água;
$P_{vac}$	Pressão de vácuo;
$R$	Coefficiente de reflexão acústica;
$R\bullet$	Radical livre;
$ROO\bullet$	Radical livre a partir de hidrocarboneto;
$ROOH$	Hidroperóxido;
$SO_2$	Dióxido de enxofre;
$T$	Coefficiente de transmissão acústica;
$t$	Tempo;
$U_r$	Tensão em circuito aberto nos terminais do cristal transdutor receptor;

$U_t$	Tensão aplicada no cristal transdutor transmissor;
$Y$	Classe térmica do óleo isolante a 90°C (IEC 600085);
$Z$	Direção de propagação das ondas de ultrassom longitudinais;
$z$	Impedância acústica;
$\alpha$	Coefficiente de atenuação do meio de propagação acústica;
$\beta$	Coefficiente térmico do óleo isolante;
$\lambda$	Comprimento de onda ultrassônico;
$\theta_i$	Ângulo de incidência da onda ultrassônica;
$\theta_r$	Ângulo de reflexão da onda ultrassônica;
$\theta_t$	Ângulo de transmissão da onda ultrassônica;
$\rho_0$	Densidade acústica do meio;
$\omega$	Frequência angular;

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O transformador de potência é o equipamento de maior importância em usinas e subestações, se destacando dos demais pelo seu grande porte e elevado custo. A ocorrência de uma falha nesse tipo de equipamento resulta em grandes transtornos operacionais, sendo que nem sempre a instalação dispõe de unidade de reserva, pois são de alto custo devido a fabricação específica para determinadas instalações. Os prazos envolvidos nos serviços de reparos, fabricação, transporte e instalação são da ordem de meses. Portanto, é necessária a adoção de critérios rigorosos na operação e manutenção para se atingir a máxima confiabilidade da máquina em serviço, sendo necessárias mudanças radicais nos conceitos e na filosofia de manutenção para preservar sua vida útil e investir em estudos e opções tecnológicas para que a durabilidade seja ampliada. O sistema de isolamento é uma das partes mais importante do equipamento. Ele é constituído basicamente pelo óleo, que isola e refrigera, do papel Kraft isolante, celeron, buchas e demais materiais isolantes sólidos. Com todos os desenvolvimentos tecnológicos em materiais isolantes, o óleo associado ao papel ainda constitui o sistema de isolamento mais utilizado devido a sua eficácia em desempenhar com eficiência a função de isolar e refrigerar com óleos minerais, vegetais novos, regenerados, misturados, sempre oferecendo opção de baixo custo, mantendo a longa vida da tecnologia de isolamento e refrigeração.

Devido ao alto poder de penetração, o óleo isolante visita todas as partes internas do transformador, durante a sua circulação, por convecção natural ou forçada através de bomba, trazendo na sua composição informações importantes, que permitem o diagnóstico do equipamento através de ensaios físico-químicos. A água, oxigênio e o calor são os maiores inimigos da isolamento do transformador de potência. Na presença de catalizadores dentro do tanque, como a água, o ferro, cobre, ocorre deterioração da isolamento líquida e sólida, dando origem a água e outros produtos que estão contidos dentro do óleo. A deterioração do papel Kraft dá origem a água e a glicose, tornando a isolamento vulnerável, dando origem às descargas parciais, ionização e condução, aumentando o calor e contaminando mais o óleo isolante com a água.

Considerando-se que :

- 1- O coulômetro de Karl Fischer continua sendo o equipamento mais eficiente para medição do teor de água em ppm (parte por milhão) do óleo isolante;
- 2- Exigem-se profissionais especializados e instalações laboratoriais específicas com tratamento dos descartes para proteção do meio ambiente;
- 3- As amostras no procedimento de coleta (ABNT NBR7070), podem sofrer contaminação por umidade e outros agentes; no laboratório de medidas de teor de água (ABNT NBR10710), as amostras podem ser contaminadas com umidade na abertura dos frascos;
- 4- Podem também causar contaminação do meio ambiente (água e solo);
- 5- Os reagentes utilizados no procedimento de Karl Fischer são de alto custo, estimado em 10% do valor do coulômetro para cada litro do reagente (base C20 toledo) e tem validade; após preparados, sua vida útil é curta, por se tratar de reações químicas;

O objetivo para desenvolvimento deste trabalho será a implementação da técnica de ultrassom, proposta como tema da tese, que consiste de um método de identificação de umidade presente no óleo isolante utiliza um par de transdutores operando, um como transmissor, e outro como receptor, sendo o sinal processado para a classificação qualitativa das amostras, de acordo com o teor de água, permitindo o traçado da curva de tendência de umidificação do óleo isolante.

No segundo capítulo, é apresentado o óleo isolante do transformador de potência, que constitui a parte isolante líquida do transformador, e a parte de isolamento sólida, constituída por papel Kraft. É abordada a composição do óleo mineral isolante, tipos de óleo, características físico-químicas, ensaios de rotina, referências de normas e recomendações de testes e fatores de processos de envelhecimento dos óleos.

No terceiro capítulo, são apresentadas as técnicas de ultrassom, em que são abordadas as características importantes da onda ultrassônica, seu comportamento em função de diferentes meios, propriedades, modos de geração, os sensores e transdutores, características eletro-acústicas importantes. Foi utilizada a bancada ultrassônica experimental, com link, um sistema de transmissor/receptor alinhados axialmente, para detecção de umidade do óleo isolante, tema principal do trabalho.

No quarto capítulo, são mostrados os recursos de apoio matemáticos, basicamente a Transformada Wavelet Discreta, para a extração de parâmetros dos sinais acústicos e a técnica de Análise dos Componentes Principais (PCA), para a identificação de padrões contidos num grande volume de informações obtidas das inúmeras amostras, para possível interpretação e avaliação do teor de umidade do óleo.

No quinto capítulo é apresentado a bancada de ensaio de óleo isolante que opera em processo contínuo de circulação do óleo, controle térmico, desumidificador e umidificador para secagem ou umidificação, necessários para a aquisição de dados para estudo e plotagem da curva de tendência de contaminação do óleo.

No sexto capítulo é mostrada a sequência de processamento do sinal acústico para extração de parâmetros de detecção da umidade do óleo usando o recurso de Transformada Wavelet Discreta (TWD), que permite obter a variação da distribuição de energia na frequência e no tempo. Em seguida, usando a Análise das Componentes Principais (PCA) é encontrado o parâmetro indicador de umidade.

No sétimo capítulo são realizadas as experiências de umidificação ou secagem do óleo isolante, com preparação da bancada e experimentos para obtenção da curva de tendência.

No oitavo capítulo, são apresentadas as conclusões sobre os experimentos realizados no processo de contaminação do óleo.

No nono capítulo, são indicadas propostas para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2**

### **ÓLEO MINERAL ISOLANTE**

A parte mais importante dos transformadores de potência é o seu sistema de isolamento composto por um líquido, o óleo dielétrico, e por papel isolante à base de celulose. O óleo mineral isolante é extraído do refino do petróleo, sendo utilizado em aparelhos elétricos como transformadores, reatores, disjuntores, capacitores, religadores, entre outros, com a finalidade de isolar as partes energizadas e refrigerar o equipamento (MILASCH, 1984; CLARK, 1940).

#### **2.1-PROPRIEDADES FÍSICAS**

Segundo Milasch (1984), as propriedades físicas do óleo classificam-se de acordo com a cor, ponto de fulgor, ponto de fluidez, densidade, viscosidade, ponto de anilina e tensão superficial.

A cor característica do óleo novo é transparente amarelo-pálida, ocorrendo sua mudança na medida em que escurece e perde um pouco a transparência com a sua deterioração.

O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual se inicia a formação de vapores inflamáveis na superfície do óleo, identificadas pela formação de um lampejo, inflamando-se na presença de uma chama. Estes gases inflamáveis são perigosos, oferecendo risco de explosão para o transformador, razão pela qual é importante conhecer-se a temperatura em que se formam.

O ponto de fluidez é a temperatura mais baixa na qual o óleo, em condições perfeitamente estabelecidas escoar. A contaminação do óleo por água ou outros contaminantes, em nível de ppm (parte por milhão) e a deterioração não tem, praticamente, a influência sobre seu ponto de fluidez. Sua determinação contribui para a identificação de tipos de óleo (parafínico, naftênico) e permite concluir em que espécie de equipamentos e em que condição pode ser utilizado. O ponto de fluidez deve ser compatível com a temperatura ambiente em que for instalado o transformador, para não comprometer o escoamento do fluido. A densidade do óleo normalmente se encontra em torno de 0,85 a 0,90 g/cm<sup>3</sup>.

A viscosidade do óleo isolante é muito importante para refrigeração do equipamento. O aumento da temperatura reduz a viscosidade, aumentando a facilidade de penetração e circulação do óleo através dos enrolamentos do transformador, assim contribuindo para melhor refrigeração do equipamento. A viscosidade representa a resistência que o óleo oferece ao escoamento contínuo sem turbulência, inércia ou outras forças. A tabela 2.1 mostra dois tipos de óleo isolantes de transformador com respectivas propriedades.

Tabela 2. 1- Viscosidade de óleos isolantes.

Óleo isolante IEC 60296	Óleo parafínico alta viscosidade	Óleo naftênico baixa viscosidade
Viscosidade a 70 °C (mm <sup>2</sup> /s) (cSt)	4,2	3,4

Fonte: IEC 60296, 2003.

Portanto, nunca é vantajoso o uso do óleo isolante de alta viscosidade, pois pioram as propriedades de refrigeração e a deterioração acelerada de celulose, com o aumento da temperatura de trabalho. Os óleos naftênicos são preferidos para aplicação em transformadores. A norma IEC 60296 estipula a classe de viscosidade dos óleos isolantes no máximo de 12 mm<sup>2</sup>/s a 40°C e a viscosidade usual é entre 9 e 10 mm<sup>2</sup>/s a 40° C (NYNAS NAPHYTENICS, 2006).

O ponto de anilina é a temperatura, em que há a separação de anilina de uma mistura de anilina e óleo. O ponto de anilina está de certa forma relacionado com a propriedade de dissolver materiais com os quais entra em contato e com seu conteúdo aromático.

A tensão superficial compreende a superfície de separação entre o óleo e a água formando uma força de atração entre moléculas dos líquidos que é chamada de tensão interfacial, sendo medida em dina/cm. Uma diminuição de tensão interfacial indica, com bastante antecedência em relação a outros métodos, o início de deterioração do óleo.

## 2.2-SOLUBILIDADE DA ÁGUA NO ÓLEO

A água pode estar presente no óleo sob a forma dissolvida, não dissolvida (em suspensão) ou livre (depositada). Quanto maior a temperatura, maior é a quantidade de água dissolvida no óleo. Se a temperatura abaixa, a água, em solução no óleo, sai e fica livre. A molécula de água é polar, assim, a água livre possui grande mobilidade, sendo atraída para a zona de "stress" elétrico do transformador podendo causar descarga disruptiva (CLARK, 1940).

Segundo Milasch (1984), um óleo altamente refinado tem uma quantidade de água de 120 ppm a 50 °C. Se a temperatura baixar para 30°C, a quantidade de água que fica em solução é de 60 ppm. As excedentes 60 ppm passarão para a forma de água não dissolvida, que pode ficar em suspensão no óleo, sob a forma de névoa. Por outro lado, a solubilidade da água no óleo é aumentada na medida em que o óleo for se deteriorando, isto é, sofrer oxidação, havendo antes de sua dissolução, sua emulsificação (figura 2.1 e 2.2).

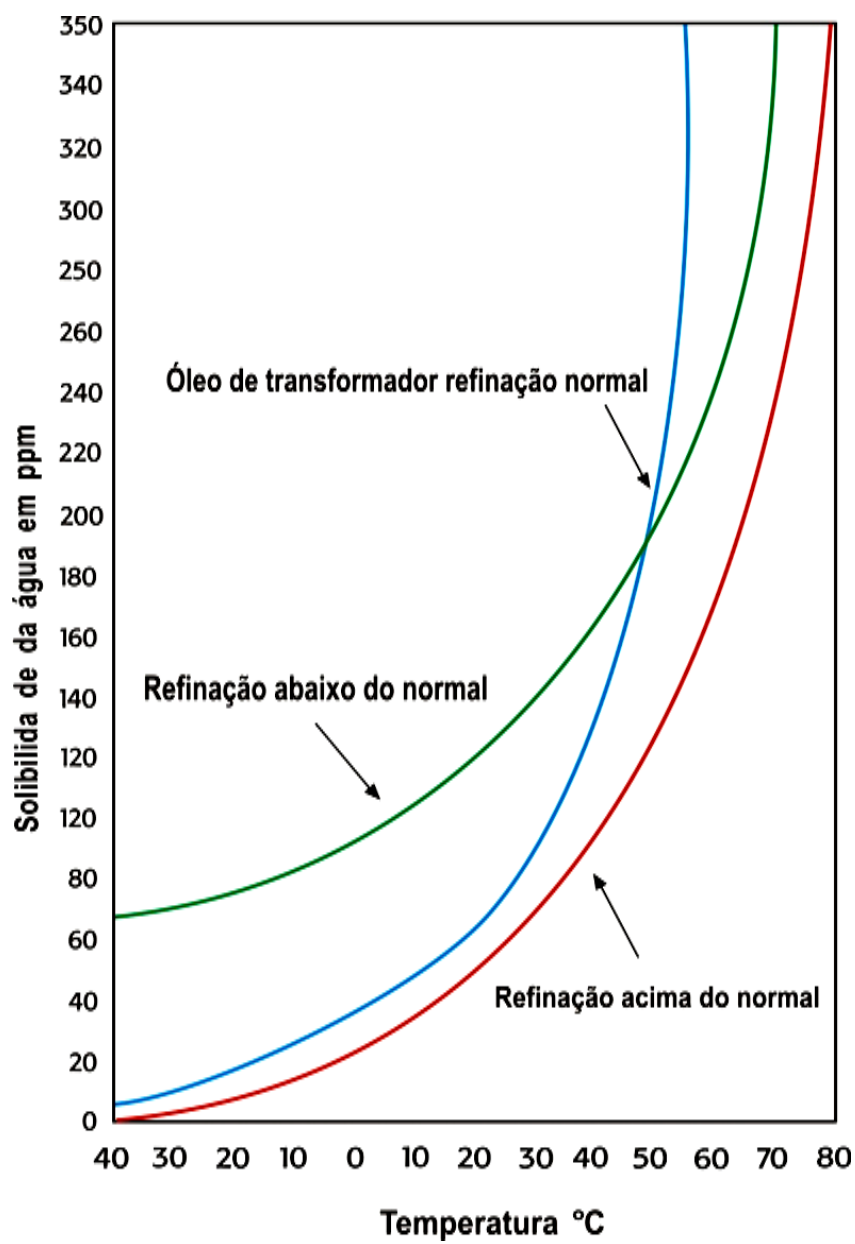


Figura 2. 1- Solubilidade da água no óleo

Fonte: modificado de CLARK, 1940.



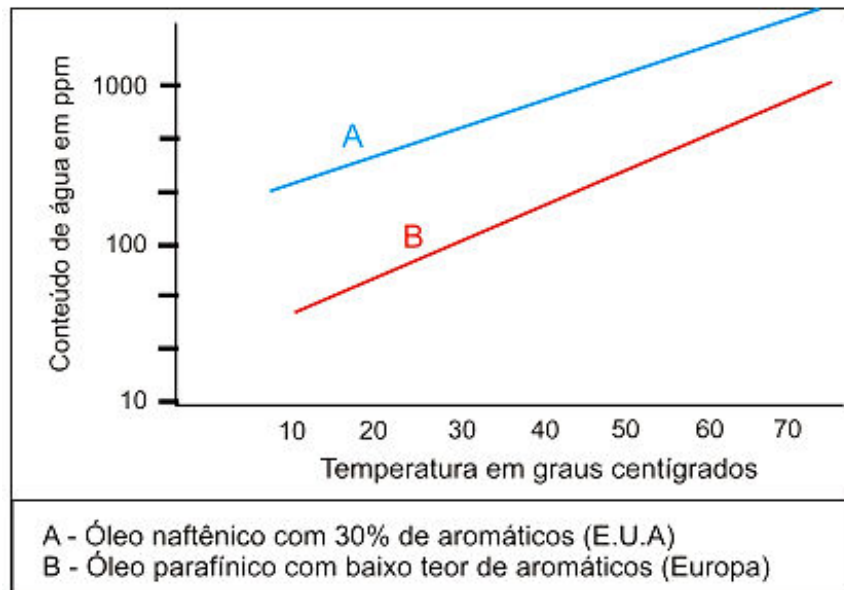


Figura 2. 2- Solubilidade da água no óleo isolante conforme o teor dos aromáticos  
 Fonte: modificado de SILLARS, 1973.

### 2.3-ABSORÇÃO DA ÁGUA DO AR ÚMIDO PELO ÓLEO MINERAL DE TRANSFORMADOR

Segundo Clark (1940), o ensaio prático de umidificação de óleo mineral consiste de um reservatório cheio de óleo, exposto ao ambiente com umidade relativa variável que permite a contaminação do óleo com água. As grandezas envolvidas no ensaio são:

- Volume do óleo em 7.500 cm<sup>3</sup>;
- Superfície de área exposta em 375 cm<sup>2</sup>;
- Camada de líquido em 20 cm;
- Temperatura de exposição em 25 °C;

A figura 2.3 explica a absorção da água do ar úmido pelo óleo mineral do transformador:

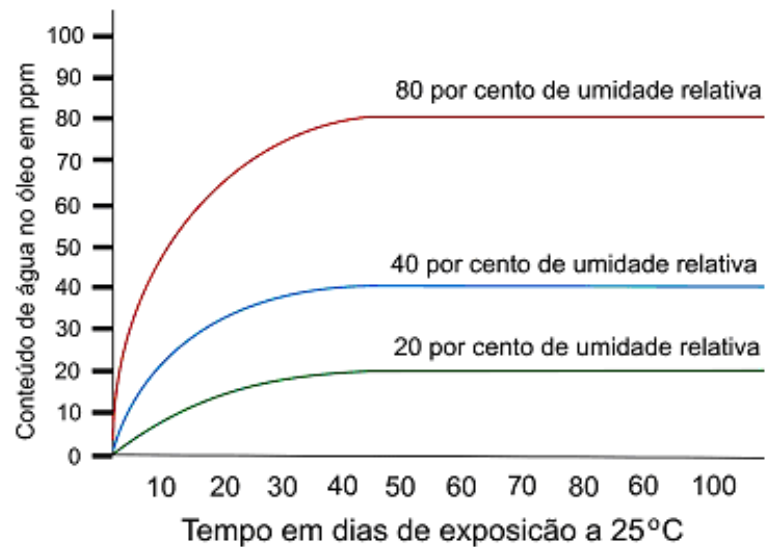


Figura 2. 3- Absorção da água do ar úmido pelo óleo mineral do transformador.

Fonte: modificado de CLARK, 1940.

## 2.4-SOLUBILIDADE DA ÁGUA NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE

O ar atmosférico pode se dissolver no óleo mineral isolante na proporção de 10% aproximadamente, em volume a 25°C e 101kPa de pressão. Um aumento de temperatura do óleo ou de pressão do ar aumenta a quantidade de mistura gasosa que o óleo pode manter em solução (SILLARS, 1973).

Os gases do ar dissolvem-se no óleo nas seguintes percentagens, aproximadas: nitrogênio-71%; oxigênio-28%; e outros gases-1% (MILASH, 1984).

## 2.5-PROPRIEDADES ELÉTRICAS

### 2.5.1-RIGIDEZ DIELÉTRICAS

Rigidez dielétrica é uma tensão alternada na qual ocorre a descarga disruptiva na camada de óleo situada entre dois eletrodos e em condições perfeitamente definidas (MILASCH, 1984).

Segundo ABNT NBR7070 (1981), a rigidez dielétrica consiste na propriedade de um dielétrico de se opor a uma descarga disruptiva medida pelo gradiente de potencial sob a qual se produz essa descarga.

O método mais comum é a colocação do óleo entre eletrodos em forma de disco para realização da descarga (ASTM D877, 2002).

O método ASTM D1816 VDE é mais sensível. Utiliza um par de eletrodos semi-esféricos e é recomendado para ensaio do óleo em aparelhos com tensões de 230kV ou maiores.

Segundo Milasch (1984), este método dá melhores resultados que o dos eletrodos de disco e, por isso, está se tornando o preferido. A rigidez dielétrica do óleo é pouco afetada pela água nele dissolvida.

Assim, por exemplo, um óleo que tenha uma quantidade de água dissolvida de 120ppm a 75°C, tem a sua rigidez dielétrica diminuída 26,5% (figura 2.4).

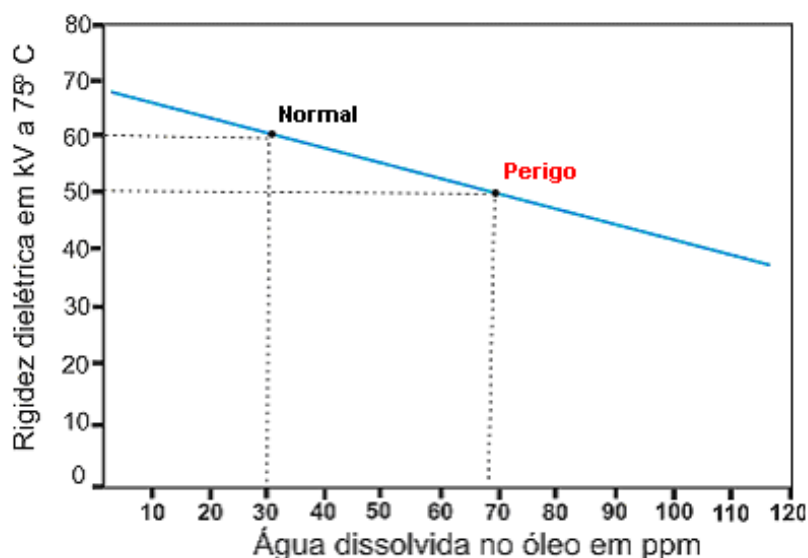


Figura 2. 4- Influência da água sobre a rigidez dielétrica.

Fonte: modificado de CLARK, 1940.

Por outro lado, a água livre em suspensão no óleo diminui acentuadamente sua rigidez dielétrica. No óleo deteriorado, a água livre tem maior possibilidade de ficar em suspensão que no óleo novo. Como a solubilidade da água no óleo cresce com a temperatura, quando a temperatura do óleo baixar, uma parte da água dissolvida passa para o estado livre e sua rigidez dielétrica terá um valor mais baixo. Outro fator que contribui para a diminuição de rigidez dielétrica do óleo são as partículas sólidas em suspensão (fibras celulósicas, carvão, poeira entre outros) (BURNS, 1953).

A diminuição da rigidez dielétrica é tanto maior quanto maior for a quantidade de partículas sólidas em suspensão (figura 2.5). Fibras celulósicas em suspensão no óleo com a água podem reduzir o valor da rigidez dielétrica até 90%, enquanto no óleo sem água essa redução é de 20% (CLARK, 1940).

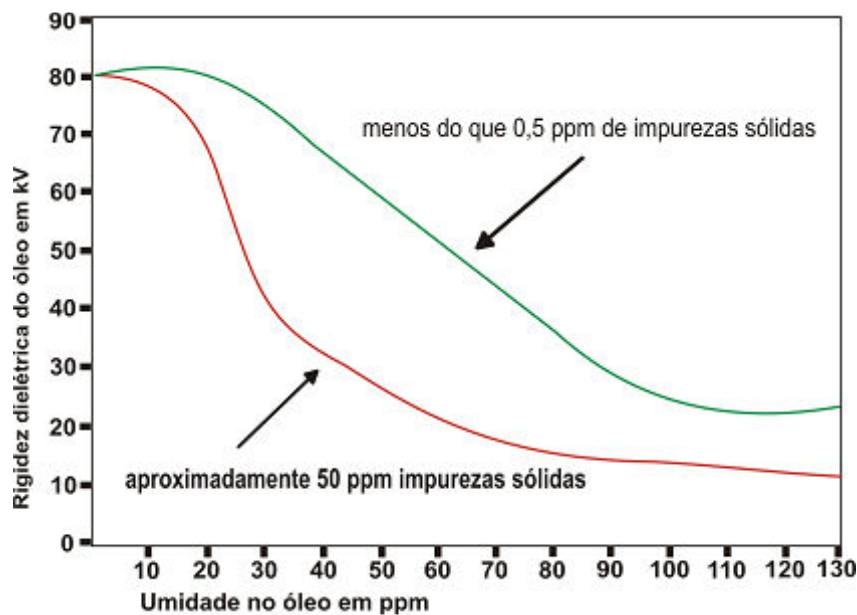


Figura 2. 5- Influências das impurezas sólidas do óleo isolante sobre a rigidez dielétrica.

Fonte: modificado de MILASCH, 1984.

Conclui-se, portanto, que o óleo deve ser manipulado com os cuidados necessários para evitar sua contaminação com a água e partículas sólidas (pano, estopa, papel, poeira, metais, entre outros).

### 2.5.2-FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência do óleo mineral é igual ao cosseno do ângulo de fase ou seno do ângulo das perdas do mesmo. O fator de potência aumenta de valor na medida em que a deterioração do óleo progride. Ele nos dá idéia da intensidade da corrente que flui pelo óleo e que é uma medida de sua contaminação e de sua deterioração. O fator de potência do óleo aumenta com a temperatura e com a quantidade de substâncias polares provenientes de deterioração do óleo (MILASCH, 1984).

### 2.6-COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES QUÍMICAS

O óleo mineral isolante utilizado em aparelhos elétricos (transformadores, disjuntores, religadores, entre outros) é extraído do petróleo. Sua composição e característica dependem da natureza do petróleo do qual foi extraído e do processo empregado em sua preparação. O petróleo cru pode ser de base parafínica, cujo produto final da destilação é a cera parafínica ou de base naftênica, cujos produtos finais de

destilação são de natureza asfáltica. Sabe-se que só 3% do petróleo disponível são de base naftênica. O óleo isolante originado do petróleo de base parafínica é chamado de óleo parafínico e o originado do petróleo naftênico denominado óleo naftênico (LIPSTEIN e SHAKNOVICH, 1970).

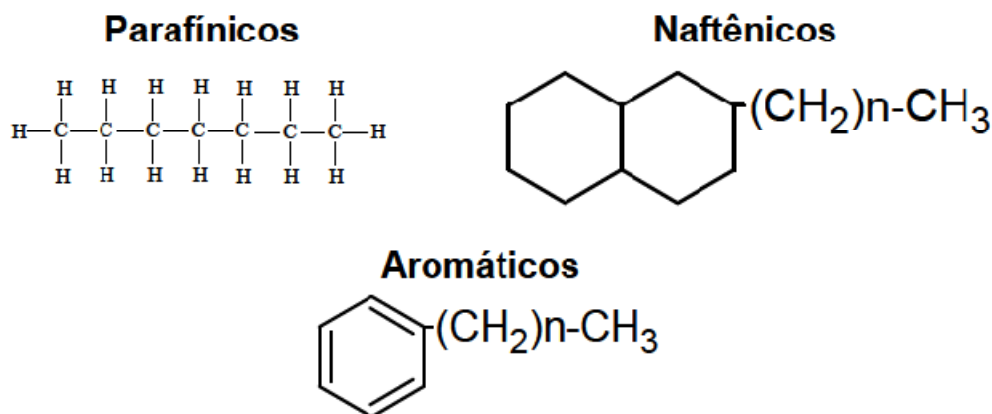
Até o ano de 1920, o óleo isolante parafínico tinha amplo uso, porém, seu ponto de fluidez não era suficientemente baixo para que pudesse ser utilizado em aparelhos elétricos instalados ao tempo, em regiões cujo inverno é rigoroso. Ele foi então, substituído pelo óleo naftênico, porque seu ponto de fluidez (-40° C) permitiu sua utilização em aparelhos submetidos a temperaturas muito baixas (CLARK, 1962).

As fontes de petróleo naftênico estão se tornando cada vez mais escassas e, por isso, a utilização do óleo parafínico se torna cada vez mais imperiosa. Tal fato motivou a realização de pesquisas para se obter um óleo parafínico com características adequadas para ser utilizados em aparelhos elétricos. O óleo mineral é constituído de uma mistura de hidrocarbonetos em sua maioria, e de não hidrocarbonetos, mas também chamados de heterocompostos, em pequena proporção. Estima-se em cerca de 2900 o número de compostos existentes no óleo mineral isolante, dos quais cerca de 90% ainda não foram identificados. Sua identificação seria muito dispendiosa e laboriosa. Como se conhecem o comportamento e as características que deve ter para que possa desempenhar sua função em suas diversas aplicações e, também, como agem os produtos de sua deterioração, uma análise dessa natureza não se torna necessária (LIPSTEIN e SHAKNOVICH, 1970).

### **2.6.1-COMPONENTES BÁSICOS DO ÓLEO MINERAL ISOLANTE**

Segundo Lipstein e Shaknovich (1970), a composição química do óleo mineral isolante, obtido a partir do petróleo bruto, tem sua predominância em hidrocarbonetos, compostos nitrogenados, sulfurados e oxigenados.

De acordo com o petróleo do qual foi extraído e do processo de refino, são misturas complexas de hidrocarbonetos saturados lineares, denominados parafínicos, hidrocarbonetos cíclicos saturados denominados naftênicos, hidrocarbonetos aromáticos e outros compostos em menores proporções tais como: compostos de nitrogênio, enxofre e oxigênio. Alguns compostos naturais do óleo isolante agem como inibidores da oxidação e a quantidade destes compostos depende do grau de refino. A figura 2.6 mostra a representação básica da composição do óleo isolante de transformadores.



**Legenda:**

**n: número de átomos de carbono;**

Figura 2. 6- Representação química básica dos hidrocarbonetos.

Fonte: modificado de JELZ, STUART e ROSS, 1958.

Os hidrocarbonetos saturados parafínicos e naftênicos garantem ao óleo uma composição parafínica quando a proporção de hidrocarbonetos parafínicos for bem maior que a de hidrocarbonetos naftênicos. O inverso dá ao óleo uma composição naftênica. Os hidrocarbonetos parafínicos do óleo isolante tem como fórmula geral  $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n -\text{CH}_3$  ( n varia de 2 a 27).

Com hidrocarbonetos naftênicos, o óleo apresenta suas moléculas com cinco a seis anéis naftênicos e cadeias laterais parafínicas e asfálticas.

Os hidrocarbonetos aromáticos encontrados no óleo são insaturados, mononucleares e polinucleares, podendo estes últimos serem dinucleares, trinucleares e tetranucleares.

Compostos de nitrogênio são compostos de cadeias fechadas. Suas moléculas possuem um átomo de nitrogênio (criseno, perilenos e pirenos).

Os compostos de enxofre possuem um átomo de enxofre na molécula (sulfidos e tiofenos).

Compostos de oxigênio são fenólicos e heterocíclicos com um átomo de oxigênio na molécula. Os hidrocarbonetos saturados, quando oxidados, formam ácidos corrosivos e contribuem pouco para mudar a cor do óleo e formar sedimento, sendo por isso, quando convenientemente inibidos, muito importante sua existência no óleo isolante. Os hidrocarbonetos saturados tem portanto boa resposta aos inibidores. Os aromáticos dinucleares, de uma mistura com hidrocarbonetos saturados não inibidos, possuem certa ação inibidora que fica muito prejudicada em presença dos aromáticos mononucleares.

Por si só, os hidrocarbonetos trinucleares, quando uma mistura com saturados não inibidos, tem uma propriedade natural inibidora. Os inibidores fenólicos condensados não agem em presença dos aromáticos trinucleares puros, mas, como sua porcentagem nos óleos é pequena, a função do inibidor é muito pouco prejudicada. Estes hidrocarbonetos tem uma tendência para formar sedimento. Os aromáticos polinucleares, com quatro ou

mais anéis aromáticos na molécula, tem sido encontrados em porcentagens menores que 1% nos óleos, mas seus efeitos sobre a estabilidade a oxidação são muito pronunciados. Possuem boas condições inibidoras e contribuem para alterar a cor e a formação de sedimentação no óleo (JELZ, STUART e ROSS, 1958). O inibidor antioxidante, neutraliza a oxidação do óleo e forma uma película protetora no cobre dos enrolamentos. O inibidor Irgamet 39, fabricado pela CIBA GEIGY, é um dos mais usados. O óleo utilizado nesta pesquisa (Nynas 4000A) já é passivado de origem.

### **2.6.2-NÃO -HIDROCARBONETOS OU HETEROCOMPOSTOS**

Segundo Jelz, Stuart e Ross (1958), os compostos de nitrogênio encontrados no óleo são muito instáveis, podem contribuir muito para a formação de sedimento e alterar a cor, além de ter uma fraca resposta aos inibidores. São considerados os compostos mais indesejáveis do óleo. Um óleo bem refinado contém cerca de 0,001% de nitrogênio e seu efeito é desprezível.

Compostos de enxofre são compostos de cadeia fechada com um átomo de enxofre, que possuem em sua molécula, cadeias ramificadas abertas. A opinião geral é de que o enxofre livre e os compostos de enxofre do óleo podem corroer metais. Entretanto, os compostos de enxofre encontrados no óleo não mostram essa tendência. Uma das características exigidas para o óleo é que não contenha enxofre e compostos de enxofre corrosivos

Ensaio convencionais de oxidação do óleo, tem demonstrado que esses compostos contribuem para manter sua estabilidade, razão pela qual os compostos de enxofre devem ser mantidos no óleo. Os compostos aromáticos de enxofre termicamente estáveis são inibidores naturais do óleo.

Compostos de oxigênio do óleo são, provavelmente, ésteres cíclicos. Suas propriedades oxidantes do óleo são pouco conhecidas e é provável que tenham pouca eficiência nos fenômenos de sua oxidação (JELZ, STUART e ROSS, 1958).

### **2.6.3-ÓLEOS DE BASE PARAFÍNICA E DE BASE NAFTÊNICA**

O Electric Power Reserch Institute- (EPRI) dos Estados Unidos da América, conclui em face dos estudos realizados até 1980, que: os óleos parafínicos parecem ser uma alternativa adequada para substituir os óleos naftênicos nas temperaturas usuais ambiente e de operação (MYERS et al , 2004)

Segundo Myers, Kelly e Parrish (2004), as diferenças são:

1- Precipitação de partículas de carvão: nos óleos parafínicos, a precipitação das partículas de carvão é lenta, enquanto que nos óleos naftênicos é alta.

2- Comportamento em temperaturas baixas: o óleo parafínico pode formar cera parafínica a 0° C, a não ser que seja muito bem decerado. Já o óleo naftênico comporta-se muito bem a -40° C.

3- Formação de ácidos: há muitas indicações de que os ácidos formados nos óleos parafínicos são mais fortes que os que se formam nos óleos naftênicos.

4- Liberação dos gases: o óleo parafínicos libera gás hidrogênio, o que é indesejável. Os óleos naftênicos absorvem o gás hidrogênio.

5- Ponto de anilina e recuperação: os óleos parafínicos tem um ponto de anilina mais elevado (de 79°C a 84° C) que os naftênicos ( de 59° C a 82° C) e por isso, sua recuperação é mais difícil.

6- Rompimento e vacúolos: durante o resfriamento do óleo parafínico, pode haver a formação de vacúolos ou rompimento de corrente de fluxo do óleo devido a sua contração. Como consequência, a rigidez dielétrica de todo sistema de isolamento fica reduzida, podendo haver a formação de descargas parciais. A adição de um modificador de fluxo no óleo, sua deceração, mistura com outros tipos de óleo ou a combinação desses fatores pode reduzir esses inconvenientes.

7- Viscosidade do óleo: com o abaixamento da temperatura, a viscosidade do óleo aumenta. A colocação de um modificador de fluxo no óleo parafínico melhora seu escoamento.

Especialistas no assunto reconhecem que a melhor maneira de testar os óleos isolantes é colocá-los em serviço e acompanhar seu comportamento.

#### 2.6.4-COMPOSIÇÃO DOS ÓLEOS PARAFÍNICOS E NAFTÊNICOS

Por definição, um óleo isolante é chamado de parafínico quando provém de petróleo parafínico e de naftênico quando provém de petróleo naftênico. Por uma simples análise é difícil concluir se um óleo é do tipo naftênico ou parafínico (COBEI, 1982).

As seguintes relações de composição são admitidas numa tentativa de identificação do tipo de óleo isolante (tabela 2.2).

Tabela 2. 2- Tipos de óleo isolante de acordo com composição química.

Tipo de óleo isolante	Compostos aromáticos (Ca-%)	Compostos naftênicos( Cn-%)	Compostos parafínicos( Cp-%)
Naftênico – tipo A	11	47	42
Parafínico – tipo B	8	29	63

Fonte: modificado de COBEI, 1982.



O óleo fabricado no Brasil é essencialmente parafínico. São os seguintes os fatores de diferenciação dos óleos preparados no Brasil, pela Petrobrás (tabela 2.3):

Tabela 2. 3- Fatores de diferenciação dos óleos no Brasil.

Fatores	Óleo tipo B (parafínico)	Óleo tipo A (naftênico)
Densidade a 20° C	0,855 (max)	0,880 (max)
Fluidez (°C)	-15	< -40
Ponto de anilina (°C)	+88	+72
Índice de refração a 20° C	1,4750	1,4880

Fonte: COBEI, 1982.

### 2.6.5-MISTURA DE ÓLEOS ISOLANTES

Quando são misturados óleos isolantes de características diferentes, a mistura resultante tem valores característicos médios dos valores de cada um dos componentes. Vale dizer que quando são misturados óleos de más características com óleos de boas características, os primeiros ganham e os segundos perdem em qualidade. A mistura tem sempre melhores características que o pior dos componentes. Portanto, sempre que possível, deve-se evitar misturar óleos deteriorados com óleos novos (MILASCH, 1984).

### 2.7-IMPORTÂNCIA DOS COMPOSTOS AROMÁTICOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO ÓLEO DE TRANSFORMADOR

Os compostos aromáticos atuam como solvente do óleo isolante, melhorando a equalização da mistura do composto parafínico, naftênico entre outros, reduzindo a viscosidade do óleo, facilitando o escoamento e refrigeração. Além de serem inibidores da oxidação, absorvem com facilidade os gases presentes.

Os compostos poliaromáticos (PACs), são naturais do óleo (passivadores de origem), aumentam sua composição quando a temperatura entra na faixa de ebulição. Na presença de campo elétrico intenso, as moléculas aromáticas apresentam efeito de "breakdown", podendo ocorrer descargas parciais, afastando o óleo do ponto energizado. Várias moléculas aromáticas são cancerígenas.

A composição genérica do óleo de transformador é mostrada na figura 2.7 com as respectivas porcentagens de composição.

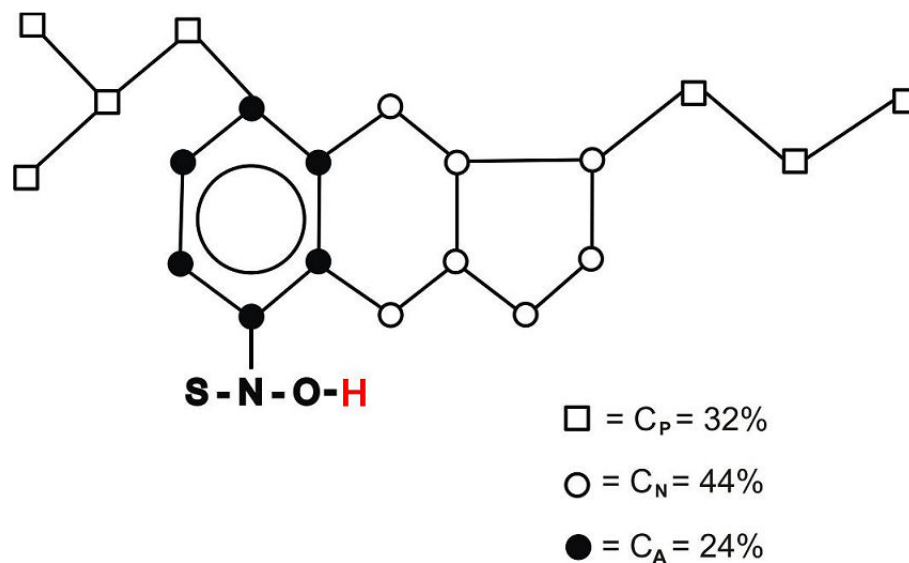


Figura 2. 7- Composição genérica do óleo de transformador.

Fonte: modificado de NYNAS NAPHYTENICS, 2006.

Na figura 2.7 a cadeia carbônica parafínica é do tipo linear saturada, a naftênica é cíclica saturada e a aromática é cíclica insaturada, permitindo a ligação de vários componentes no óleo, tais como enxofre nitrogênio, oxigênio entre outros.

As moléculas aromáticas do óleo isolante, devido a sua insaturação, são as portas de acesso da umidade, gases e outros agentes contaminantes do óleo. Com o aumento da temperatura do óleo, a tensão interfacial (TIF) óleo- água diminui, ocorrendo o rompimento da interface, e a água é absorvida pelo óleo. Isso pode ocorrer também para os gases.

Se a temperatura do óleo diminuir, a água absorvida perde energia e sai do óleo, retornando ao estado de água livre, pois a tensão interfacial aumenta e a interface bifásica se estabelece. Os tensoativos também reduzem o TIF do óleo isolante, permitindo a absorção da água pelo óleo e agem como conciliadores entre compostos sem afinidade, por alteração do TIF, com objetivo de formar solução.

## 2.8-ENSAIOS RECOMENDADOS PARA ÓLEO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES

Segundo Lewand (2002), a água e o calor são os dois maiores inimigos da isolação do transformador. O tanque do transformador pode ser comparado a uma retorta na qual são colocados os reagentes, isolação sólida de base celulósica e isolação líquido-óleo mineral isolante. A deterioração das isolações sólidas dá origem a água e outros produtos, como consequência há seu enfraquecimento mecânico e redução rigidez dielétrica. As condições podem ficar propícias para a formação de descargas parciais que levam à ionização e condução. O processo pode continuar e haver a formação de corona, e finalmente haver a

falha na isolação. Como em geral nas reações químicas, o processo de deterioração é acelerado pelo calor.

Segundo Clark (1940), a vida útil do transformador depende das condições de sua operação e de sua manutenção. Se a manutenção e a operação do transformador forem adequadamente conduzidas, sua vida útil pode se estender até cinquenta anos. Um transformador que opere constantemente sobreaquecido terá sua vida útil muito reduzida. Torna-se, portanto necessário acompanhar a evolução da deterioração da isolação do transformador, que inicia quando o transformador é cheio com óleo na fábrica. Nossos sentidos, visão, olfato e audição permitem verificar as condições do exterior do transformador. Com o auxílio de testes e ensaios periódicos, pode-se avaliar as condições de deterioração da isolação, detectar falhas incipientes e orientar a adoção de medidas para evitar seu envelhecimento prematuro e a progressão da falha incipiente, que pode resultar na destruição do transformador.

São recomendados, para acompanhamento das condições da isolação do transformador a serem realizados no óleo isolante, os ensaios de exame visual e cor, densidade, rigidez dielétrica, método de eletrodo de disco e método utilizando eletrodos VDE com tensões acima de 230KV.

### **2.8.1-EXAME VISUAL E COR (MÉTODO ASTM D1524)**

De acordo com a ASTM D1524 (2010), este método, para ser realizado em campo, tem por finalidade verificar a cor do óleo e a existência de partículas sólidas e gotículas de água em suspensão. Pode ser aplicado em óleos em uso em transformadores, disjuntores e outros aparelhos elétricos. A classificação da cor é feita comparando-se a cor do óleo com as cores de uma escala padrão numérica de 0 a 8. A comparação é feita com auxílio de um comparador de cores. As cores padrão são representadas por placas de vidro dispostas num disco rotativo. A amostra de óleo a ser ensaiada é colocada em um tubo inserido no comparador. O disco de cores é então girado até que as cores do óleo e da escala coincidam. O número da cor do disco é o da cor do óleo. Se a cor do óleo for intermediária de duas cores do disco, o resultado é também intermediário e estimado por interpolação. A observação não deve prolongar-se por mais de 10 a 15 segundos. O operador deve descansar sua vista entre os intervalos de preferência sobre uma superfície de cor cinza. A observação das partículas em suspensão é feita pelo método da luz refletida (efeito Tyndall).

Um feixe de luz é lançado sobre a amostra do óleo em observação num ambiente escuro. Se existirem partículas em suspensão, elas refletem a luz, tornando-se visíveis. Um óleo em boas condições visuais se apresenta claro, límpido e transparente. As partículas metálicas, de isolação, carvão, e outras são bem visíveis. O óleo pode-se apresentar bem turvo. Neste caso, se a rigidez dielétrica for boa, com uma tensão interfacial baixa e uma acidez elevada, indicam que o aspecto turvo pode ser devido a produtos de oxidação do óleo em suspensão.

O sedimento deve ser analisado para determinar sua natureza (borra, partículas metálicas ou orgânicas entre outras). Do relatório devem constar o número da cor, o aspecto da amostra (claro, turvo, sedimento) e a temperatura na amostragem do óleo e na ocasião do ensaio.

O método ASTM D1500 serve para todos os tipos de óleos derivados do petróleo (óleos lubrificantes, combustíveis, diesel entre outros) e não é específico para óleo mineral de equipamentos elétricos. O método ASTM D1524 é próprio para o teste em campo de óleos isolantes elétricos

## 2.8.2-DENSIDADE ASTM D1298

A densidade do óleo isolante pode ser determinada pelo método de densitômetro, isto é, o método ASTM D1298. A densidade relativa do óleo, que é a relação entre a massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água pura na temperatura de 15° C, é determinada com um densímetro de vidro que tenha uma graduação de 0,600 a 1,100 e divisões de 0,050. A temperatura do óleo é medida com um termômetro, escala de -5° C a +215° C divisões de 0,2° C. O óleo é cuidadosamente colocado numa proveta, evitando-se a formação de bolhas de ar. O densímetro e o termômetro devem ser cuidadosamente mergulhados no óleo. A temperatura do meio ambiente não deve variar mais que 2° C durante a medição. O líquido é suavemente agitado com o termômetro, evitando-se umidecer a haste do densímetro acima do ponto de imersão. Quando a temperatura for estável, e o densímetro estiver flutuando livremente afastado das paredes laterais da proveta, ele deve ser lido, com o termômetro apresentando até uma fração de 0,25° C (figura 2.8).

Se a diferença entre a temperatura anterior e posterior ao ensaio for maior que 0,5° C, o ensaio deve ser repetido até que essa diferença seja no máximo igual a este valor. De acordo com CNP-16, Resolução nº 16/79, a densidade do óleo tipo B a 20° C, deve ser no máximo igual a 0,8600 e com CNP-16 e Resolução 6/72, a densidade do óleo tipo A deve ser igual a 0,90. Valores diferentes dos citados podem indicar contaminação do óleo por líquidos estranhos (ASTM D1298, 1999).

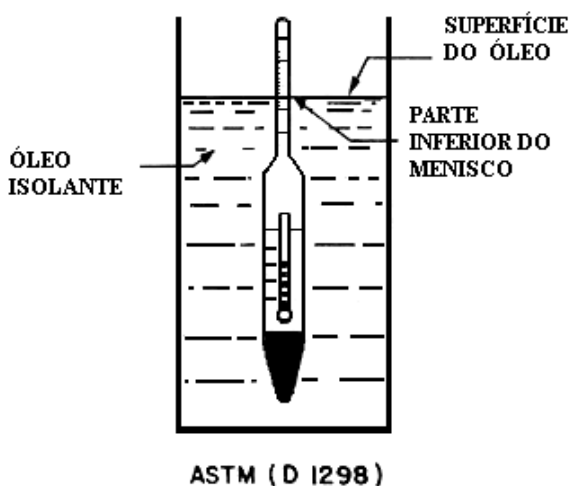


Figura 2. 8- Densímetro de óleo isolante.

Fonte: modificado de MILASCH, 1984.

### **2.8.3-RIGIDEZ DIELÉTRICA (TENSÃO DE RUPTURA)**

A tensão dielétrica de ruptura de um líquido isolante tem importância como medida da habilidade do líquido em suportar o gradiente médio de tensão elétrica sem falhar. É indicada para evidenciar a presença de agentes contaminantes como a água, sujeira, fibras celulósicas úmidas ou partículas condutoras de líquido, podendo um ou mais estarem presentes em concentração significativa quando as tensões de ruptura forem baixas. Entretanto, uma tensão de ruptura alta não significa necessariamente a ausência de todos os contaminantes. Ela pode meramente indicar que a concentração dos contaminantes presentes no líquido entre os eletrodos não é suficientemente grande para afetar de modo significativo a tensão média de ruptura do líquido ensaiado por este método (MILASCH, 1984).

#### **2.8.3.1-MÉTODO DO ELETRODO DE DISCO ASTM D877- TENSÕES ATÉ 230 kV**

Este método é recomendado para determinar a rigidez dielétrica de óleos derivados do petróleo, hidrocarbonetos e outros, comumente empregados como isolantes e refrigerantes de cabos de energia, transformadores, disjuntores e aparelhos similares. É também recomendado para ensaios de aceitação de líquidos isolantes não processados, recebidos de vendedores em vagões-tanque, caminhões-tanque e tambores. Pode ser utilizado nos ensaios de rotina de aparelhos dos sistemas elétricos de potência com tensões nominais de 230kV ou menores (ASTM D877, 2002).

O método não é recomendado para ensaios de óleos filtrados, desgaseificados e desidratados antes e durante o enchimento de aparelhos de sistemas elétricos de potência com tensões nominais maiores que 230kV, ou para ensaiar o óleo desses aparelhos após enchimento. O método ASTM D1816 é mais adequado para ensaiar o óleo isolante de aparelhos com tensões nominais maiores que 230kV sendo por isso, recomendado (MILASCH, 1984).

#### **2.8.3.2- MÉTODO UTILIZANDO ELETRODOS VDE -ASTM D1816 TENSÕES ACIMA DE 230 kV**

É utilizado para determinação de rigidez dielétrica de óleos isolantes provenientes do petróleo. O método se aplica a óleos isolantes utilizados comumente em transformadores, disjuntores e aparelhos similares como meio de isolamento e refrigeração. Este método é mais sensível aos efeitos dielétricos da umidade em solução que o método ASTM D877, especialmente quando estão presentes no óleo e fibras celulósicas. Foi verificado ser muito importante nas investigações de laboratório de rigidez dielétrica do óleo de sistemas de isolamento (MILASCH, 1984).

Este método é recomendado para ensaiar óleos filtrados, desgaseificados e desidratados antes e durante o enchimento de aparelhos e sistemas de potência com tensão nominal acima de 230kV e para ensaiar amostras de óleo desses aparelhos após seu enchimento. Tem se encontrado crescente aplicação para ensaiar óleos de transformadores em serviço. Este método não é recomendado e não deve ser usado para testes de aceitação

de óleos recebidos de vendedores em vagões-tanque, caminhões-tanque ou tambores (ASTM D1816, 2004).

## **2.9-ENVELHECIMENTO DO ISOLANTE LÍQUIDO E SÓLIDO.**

### **2.9.1-BORRA SOLÚVEL E SEDIMENTOS EM ÓLEOS ENVELHECIDOS EM SERVIÇO**

As substâncias sólidas da deterioração de óleo isolante chamadas de borra, se dissolvem no óleo até sua saturação para depois se depositar sobre enrolamentos, núcleo e demais partes internas do transformador, além de ficar em suspensão no óleo. Podem também permanecer em suspensão no óleo partículas sólidas de natureza inorgânica, como exemplo, a ferrugem.

#### **2.9.1.1-MÉTODO PADRÃO DE ENSAIO DE SEDIMENTO E BORRA SOLÚVEL DE ÓLEOS ISOLANTES ENVELHECIDOS EM SERVIÇO- ASTM D1698**

Uma porção da amostra é centrifugada para separar o sedimento (substância não solúvel) do óleo. A parte do óleo livre de sedimento é separada para a determinação de borra solúvel. O sedimento é retirado do tubo e colocado no cadinho de Gooch especialmente preparado. Após secá-lo e pesá-lo, para saber o total do sedimento é calcinado a 500° C no cadinho e repesado. A perda de peso corresponde à parte orgânica e o restante, a parte inorgânica do sedimento. A borra solúvel é determinada na parte decantada do óleo, diluindo-a com n-pentano, para haver precipitação da borra insolúvel no n-pentano, filtrando-se em seguida no Cadinho de Gooch previamente secado e pesado. O cadinho, após ser submetido à secagem, é novamente pesado. A diferença de pesos dará a quantidade de borra solúvel no volume da amostra de óleo.

O sedimento inorgânico indica geralmente algum tipo de contaminação e o sedimento orgânico pode indicar tanto a deterioração como a contaminação do óleo.

Borra solúvel indica deterioração de óleo, presença de contaminantes, ou ambos. É um aviso de que a formação do sedimento pode ser eminente. A determinação de sedimento e borra solúvel em óleos isolantes usados ajuda a decidir se o óleo deve continuar em uso como está ou se deve ser substituído, purificado ou recuperado (ASTM D1698, 2003).

### **2.9.2-OXIDAÇÃO DO ÓLEO ISOLANTE E CORROSÃO INTERNA DOS CONDUTORES DO TRANSFORMADOR**

A oxidação do óleo é influenciada diretamente pelo oxigênio e temperatura de operação do transformador. A corrosão depende da química do óleo e dos materiais condutores elétricos, principalmente o cobre.

Todo óleo isolante contém pequena quantidade de partículas de ar (0,05 a 0,25% de oxigênio por volume mobilizado), que participa ativamente na oxidação. O aquecimento do transformador acelera essa deterioração, por exemplo, um aumento de 10 °C no óleo

isolante, dobra a taxa de degradação onde, para cada temperatura, ocorrem reações químicas diferentes no processo. A oxidação é a forma mais comum de degradação dos óleos isolantes e o conhecimento dos resíduos formados neste processo indicam as providências a serem adotadas para eliminar estes compostos. A reação química de oxidação inicia quando o oxigênio entra em contato com os hidrocarbonetos instáveis. O oxigênio pode estar livre no ar, dissolvido no óleo ou ser um produto da degradação da celulose do isolante sólido (McMURRY, 2005).

A reação química de oxidação é catalizada pelo cobre condutor das bobinas, o ferro do núcleo e principalmente a água, que é um dos subprodutos de oxidação da celulose e do óleo. A água, precisamente a umidade, pode estar presente no óleo de três formas:

- Dissolvida;
- Não dissolvida (em suspensão);
- Livre (depositada);

O processo de oxidação é acelerado principalmente pelo aumento da temperatura do óleo, além de outros fatores importantes no transformador, tais como: tensão elétrica, vibrações, afundamentos de tensão, choques mecânicos entre outros (MILASCH, 1984).

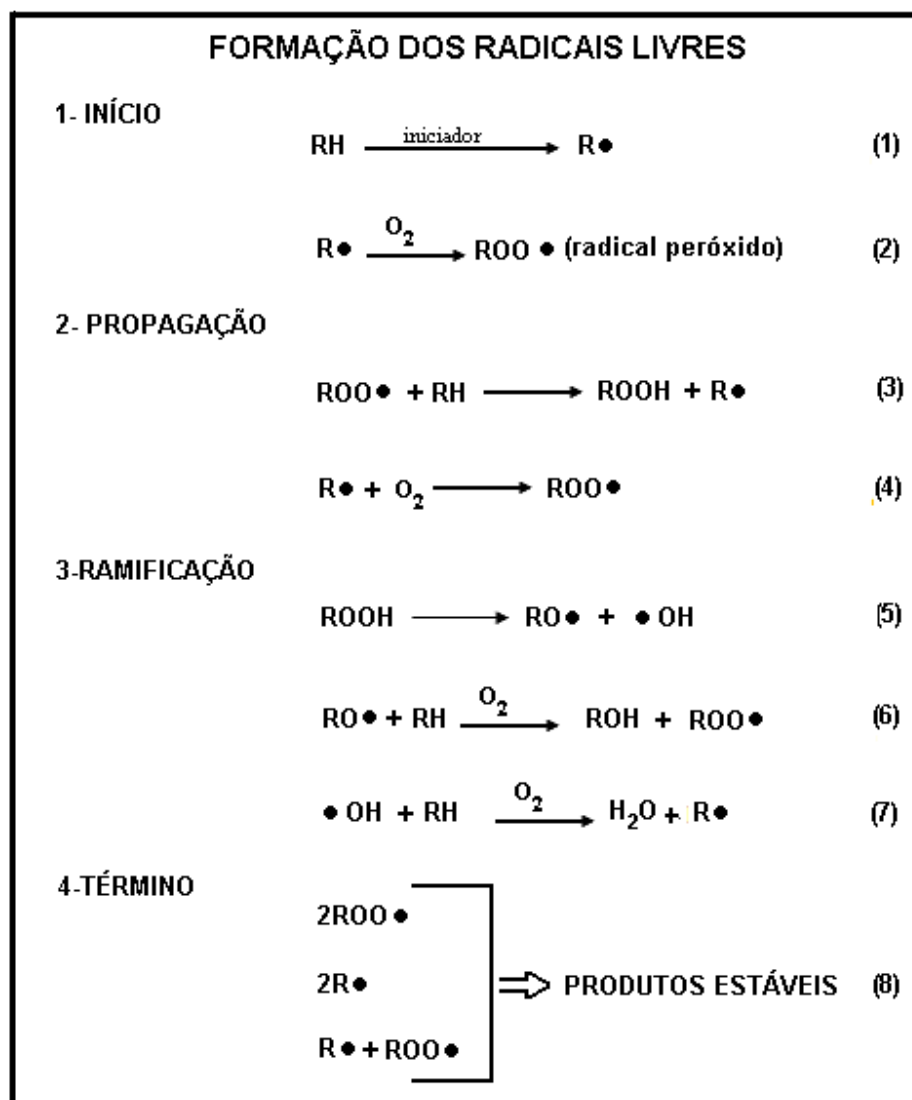
Segundo McMurry (2005) e Korcek e Jensen (1957), (figura 2.9- início 1 e 2) mostram as etapas de oxidação de todos os óleos, inclusive os isolantes. Se os inibidores naturais (compostos sulfurados, alquibenzenos entre outros) não estabilizarem os radicais formados, as reações se propagam rapidamente.

No estágio de propagação, o inibidor já é totalmente consumido, resultando numa quantidade suficiente de radicais que reagem com hidrocarbonetos ou oxigênio para formar **ROOH** e o radical peróxido **ROO•**. (figura 2.9- propagação 3 e 4).

O hidroperóxido, por ser instável, se dissocia em dois radicais muito reativos (figura 2.9- propagação 5). Estes radicais livres reagem com hidrocarbonetos gerando uma grande variedade de compostos de oxidação e outros radicais livres que reagem com novas moléculas de hidrocarboneto, liberando novos radicais em reação em cadeia (figura 2.9- ramificação 6 e 7).

Esta fase é chamada de etapa de ramificação, sendo características típicas de reação em altas temperaturas (>100°C). Alguns hidrocarbonetos se decompõem, produzindo álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos, ésteres e água (McMURRY, 2005).

Estes produtos da oxidação levam a um aumento da viscosidade do óleo, formação de lamas, borras, gases e compostos insolúveis, escurecendo o óleo e uma perda da rigidez dielétrica do isolante. Ácidos, lamas, borras e produtos intermediários do processo de degradação do óleo, também causam deterioração do papel (LAMPE, SPICAR e CARRANDER, 1978).



**LEGENDA**

**RH:** hidrocarbonetos;

**R• :** radical livre de hidrocarboneto;

**ROO•:** radical livre a partir de hidroperóxido;

**ROOH:** hidroperóxido;

Figura 2. 9- Processo de oxidação dos óleos.

Fonte: McMURRY, 2005.



O fim da oxidação ocorre quando há uma combinação de radicais formando compostos estáveis. O óleo mais viscoso reduz a difusão do oxigênio e termina a oxidação com os compostos estáveis (figura 2.9- término 8).

A figura 2.9 é o consenso entre os pesquisadores do processo de oxidação de hidrocarbonetos, que é considerada complexa diante do grande número de produtos iniciando novas reações.

Os produtos insolúveis da oxidação tendem a se depositar sobre o isolamento sólido, núcleo e paredes do tanque, obstruindo as passagens de óleo, superaquecendo o transformador.

### 2.9.3-DEGRADAÇÃO DA CELULOSE

Dentre os vários materiais isolantes sólidos utilizados em equipamentos de alta tensão, a celulose é o principal.

O papel isolante é um composto orgânico cuja molécula é composta por uma longa cadeia de anéis de glucose ou monômeros. A tabela 2.4 mostra os principais materiais celulósicos usados como isolantes elétricos sólidos (FABRE e PICHON, 1960).

Tabela 2. 4- Tipos de isolantes sólidos celulósicos e materiais básicos usados na fabricação.

Produto Comercial	Materiais
Papel Kraft Papel Manilha Papelão Kraft Pressboard Thermally Upgrade	Fibra de madeira Fibra de madeira e cânhamo Fibra de madeira Papelão com fibra de algodão Fibra de madeira modificada quimicamente

Fonte: MILASCH, 1984.

Cada molécula de celulose, quando nova, possui de 1000 a 1400 anéis de glucose, interligados (fig. 2.10).

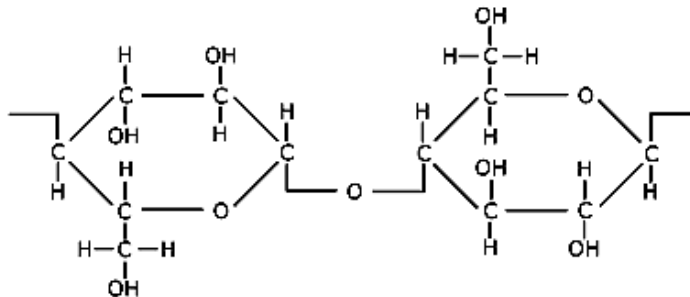


Figura 2. 10- Molécula de celulose.

Fonte: PABLO e PAHLAVANPOUR, 1997.

A medida do grau de polimerização, ou seja, a média de anéis de glucose, indica a resistência mecânica do material ao esforço de tração. Maior o comprimento da molécula, garante a melhor funcionalidade e vida útil do material.

A degradação do papel é causada pela diminuição do comprimento das cadeias de monômeros. Segundo McNutt e Kaufmann (1983), os mecanismos que podem contribuir para a degradação das cadeias de celulose são:

### 2.9.3.1- HIDRÓLISE

A hidrólise é a quebra de cadeia de monômeros de celulose. A água causa a ruptura da cadeia de monômeros ao afetar o átomo de oxigênio que faz a ponte entre os anéis. São formados dois grupos de  $\text{OH}^-$  cada qual anexado a um monômero. Como resultado, ocorre a redução do grau de polimerização e enfraquecimento da fibra de celulose.

Esse processo **libera água**, pois a ligação entre as moléculas de celulose consiste de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{O}^-$ , e essa ruptura forma o  $\text{H}_2\text{O}$  molecular. A água formada aumenta o teor de umidade do papel. O papel está impregnado de óleo e o mesmo somente pode absorver uma fração de água contida nele. Assim, o teor de água no óleo é muito menor que no papel e contribui com oxidação do óleo. O processo depende de temperatura, portanto, o óleo quente pode absorver mais umidade que o óleo frio.

A troca de umidade entre o papel e o óleo é um processo extremamente lento. Na presença do oxigênio, a aceleração da degradação chega a 10 vezes, dependendo das condições de operação do transformador.

A resistência mecânica do papel isolante é indicada para medir seu tempo de envelhecimento. A figura 2.11 mostra a variação da resistência mecânica do papel em função do teor de água e do tempo de envelhecimento.

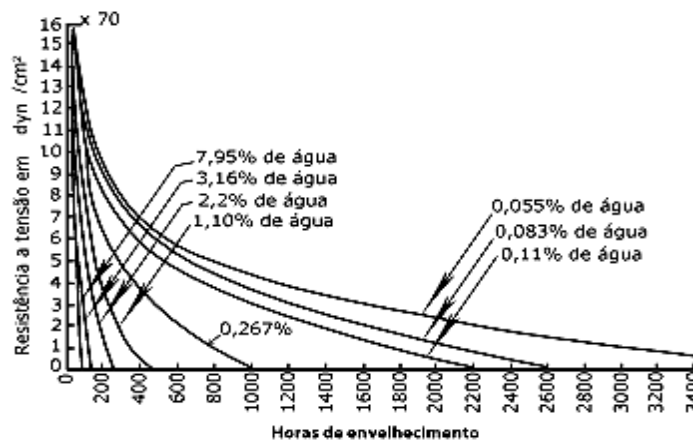


Figura 2. 11- Variação da resistência mecânica do papel em função do teor de água e do tempo de envelhecimento.

Fonte: MILASCH, 1984.

### 2.9.3.2-OXIDAÇÃO

O oxigênio ataca o átomo de carbono da molécula de celulose, formando ácidos e aldeídos, enfraquecendo a união entre os anéis. Ocorre liberação de água, causando hidrólise, libera monóxido de carbono e outros produtos.

Se o sistema de preservação de óleo do transformador falha, permitindo contato com a atmosfera, ocorrerá com certeza uma aceleração do processo de envelhecimento da celulose. A figura 2.12 mostra os produtos da degradação do papel isolante.

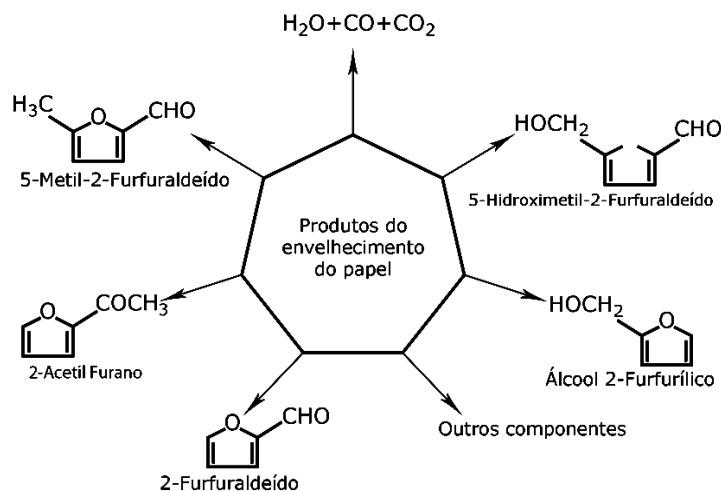


Figura 2. 12- Produtos de degradação do papel.

Fonte: PABLO e PAHLAVANPOUR, 1997.

### 2.9.3.3-PIRÓLISE

A temperatura moderada de operação do transformador causa quebra dos monômeros de cadeia de celulose, formando um resíduo sólido da reação e **liberando vapor de água** e gases como: monóxido de carbono, dióxido de carbono entre outros. O grau de polimerização é reduzido, diminuindo e resistência mecânica da celulose.

No transformador sempre existe um ponto quente (hot-point), onde ocorre maior degradação do papel isolante. Temperaturas extremas carbonizam as fibras celulose queimando o transformador. A umidade excessiva no papel isolante produz bolhas no papel em temperaturas altas e corre o risco de condensação de água, formando água livre, no caso de queda da temperatura. A água livre vai passar para o óleo, que tem dificuldade de absorver, devido à redução da temperatura (KARSAI, KERENYI e KISS, 1987). A figura 2.13 mostra a relação da umidade no papel e no óleo em função da temperatura.

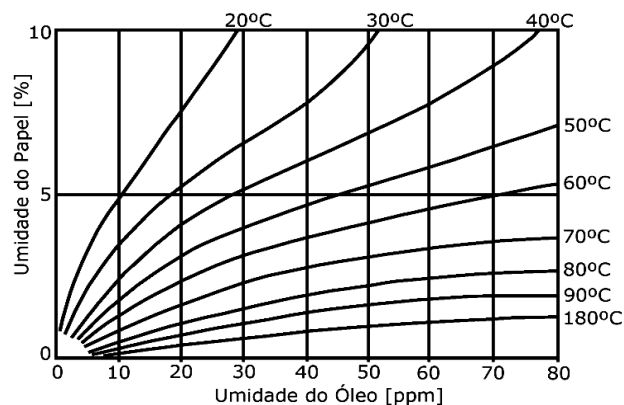


Figura 2. 13- Relação da umidade do papel e óleo em função da temperatura (diagrama de Nielsen).

Fonte: TETTEX INSTRUMENTS, 2010.

#### 2.9.4- TENSÃO INTERFACIAL (TIF) - ASTM D971 e ASTM D2285

A tensão interfacial é a tensão interface óleo-água e é medida em dina/cm (milinewton/metro). Os óleos novos e isentos de substâncias hidrofílicas, isto é, que tem uma afinidade tanto com as moléculas do óleo como com as da água, tem uma TIF elevada (40 dina/cm). Os produtos de deterioração do óleo e os contaminantes polares solúveis provenientes da decomposição de isolamento sólida e dos corpos com os quais o óleo entra em contato, provocam o abaixamento da TIF do óleo. A determinação da tensão interfacial é muito importante na detecção na fase inicial de deterioração da isolamento. Um óleo em boas condições tem uma tensão interfacial de cerca de 40dina/cm a 25°C. À medida que o óleo se deteriora, a TIF diminui. O ensaio é muito útil porque todas as substâncias estranhas com probabilidade de serem encontradas tem uma tendência de baixar a tensão interfacial entre o óleo e a água. É um ensaio adequado para triagem do óleo, embora não permita diferenciar os diversos contaminantes (MILASCH, 1984).

##### 2.9.4.1- MÉTODO DO ANEL - ASTM D971

Segundo a norma ASTM D971 (1999) mede-se com um tensiômetro a força em dina/cm necessária para arrancar um anel plano de platina da interface água-óleo. A força assim obtida é convertida em unidades de tensão interfacial, multiplicando-se seu valor por um fator determinado empiricamente e dependente da força aplicada, das densidades do óleo e da água, e das dimensões do anel.

O tensiômetro é formado por um arame de torção tensionado, tendo uma de suas extremidades presa a um ponteiro que se desloca sobre um disco graduado em dina/cm e pode ser movimentado manualmente. (figura 2.14).

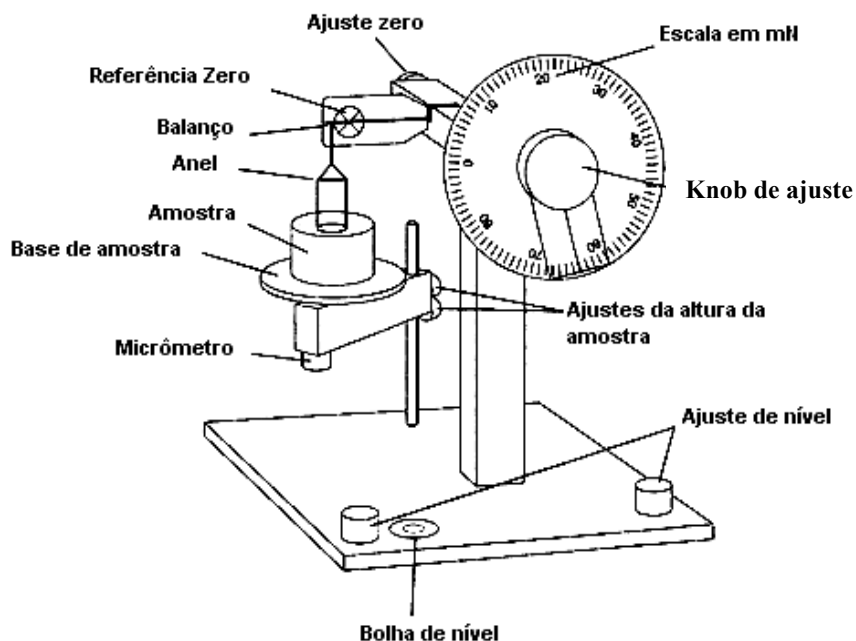


Figura 2. 14- Tensiômetro mecânico.

Fonte: Modificado de ASTM, 2010.

O anel de platina fica suspenso de um braço preso ao arame de torção. Um recipiente com água destilada é colocado sobre um suporte, que pode ser movimentado verticalmente por intermédio de um parafuso. Com o disco na posição zero, o suporte é movimentado para cima até que o anel mergulhe na água cerca de 6 mm, no centro do recipiente. A temperatura deve ser de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , ou seja, entre  $24^{\circ}\text{C}$  e  $26^{\circ}\text{C}$ . O suporte é lentamente abaixado e o ponteiro vai sendo reconduzido para a posição zero na medida em que dela se afastar. No momento em que houver o desprendimento do anel da superfície da água, o ponteiro deve estar em zero. Com o valor lido na escala, é calculada a tensão superficial da água, que deve ser de 71 a 72 dinas/cm. Valores menores indicam uma dessas causas: o tensiômetro não foi ajustado corretamente; o recipiente não foi bem limpo; a água destilada não teve o grau de pureza necessário; ou falta de limpeza no anel de platina.

Corrigidos esses fatores, o ponteiro colocado na posição zero e o suporte com o recipiente contendo água destilada é elevado até o anel ficar mergulhado cerca de 5mm. O óleo filtrado é então colocado no recipiente sobre a água destilada. A temperatura deve ser de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Após 30s, as mesmas operações de abaixamento do recipiente e condução do ponteiro à posição zero são feitas até que haja o desprendimento do anel. Nesse momento, o ponteiro deve estar em zero. Com o valor lido na escala e os fatores de correção, determina-se a TIF água-óleo.

## 2.9.5- UMIDADE NO ÓLEO - TEOR DE ÁGUA PPM (PARTE POR MILHÃO)

Segundo Karsai, Kerenyi e Kiss (1987), um dos maiores inimigos da isolação do transformador é água. A determinação do teor de umidade na isolação líquida pode dar uma idéia do estado de evolução do processo de deterioração não só dela, mas também da isolação sólida. A figura 2.15 mostra o princípio de Karl Fischer para medir o teor de água no óleo isolante.

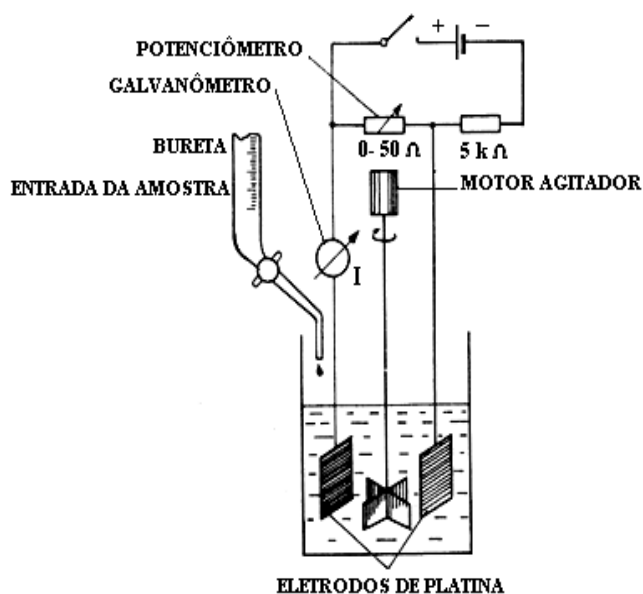
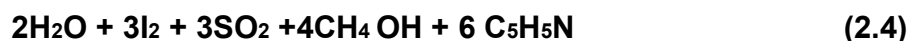


Figura 2. 15- Diagrama do princípio da titulação de Karl Fischer.

Fonte: MILASCH, 1984.

Um teor de umidade de 50 ppm no óleo do topo do transformador é considerado crítico e indica a necessidade de sua eliminação. Com um óleo neste estado, seguramente a isolação sólida do transformador, constituída de papel, estará com excesso de umidade. O teor de água contida no papel isolante é maior que o do óleo. Muitos métodos tem sido tentados para a determinação do teor de água de líquidos isolantes, porém o método até hoje reconhecido como adequado é o de Karl Fischer. O método consiste na oxidação do dióxido de enxofre pelo iodo em presença da água, da piridina e do álcool metílico, conforme a seguinte equação 2.4 e 2.5:



São necessários portanto, 3 moléculas-grama de iodo para 2 de água. A oxidação do  $\text{SO}_2$  ocorre somente em presença da água. O método de titulação mais adequado é o amperímetro com a corrente sob tensão constante.

O ponto final de titulação é reconhecido pela passagem de corrente ocasionada por ligeiro excesso de iodo e se dará quando a adição de um excesso de 0,02 ml do reagente de Fischer faz aparecer uma corrente de 15 a 20 microampêres, que deve persistir por 30s no mínimo, entre dois eletrodos de platina mergulhados na solução contendo o líquido em teste.

O método de teste ASTM D877 (2002) é útil para determinar a presença de contaminantes, como a água não dissolvida, sujeira, fibras celulósicas e partículas de pó e metálicas no óleo mineral isolante. Este método não é sensível à presença de água dissolvida no óleo até 80% da saturação, de ácidos e sedimentos (borra), proveniente de sua deterioração. Partículas de carvão produzidas por arco elétrico no interior de massa do óleo não abaixam necessariamente sua rigidez dielétrica. O óleo mineral isolante do transformador pode ter uma rigidez dielétrica boa, o que não impede que sua isolamento sólida tenha umidade em excesso. Uma rigidez dielétrica de 24kV do óleo é uma indicação de que a isolamento do transformador deve ser submetida a testes. A isolamento é considerada muito umidificada quando a rigidez dielétrica do óleo está abaixo de 22kV e , por isso, deve ser submetida à secagem.

O método de ensaio ASTM D1816 VDE (2004) pode acusar a presença de quantidades muito pequenas de água dissolvida no óleo, mas não há uma idéia do grau de umidade da isolamento sólida (fig. 2.15).

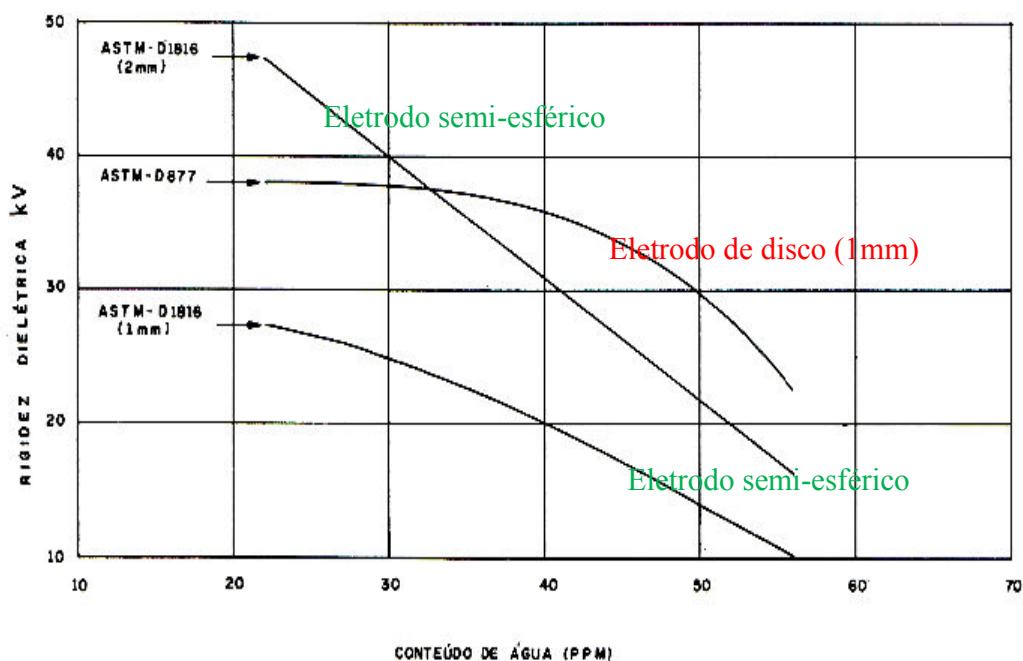


Figura 2. 16- Gráfico para determinação da rigidez dielétrica do óleo isolante em função do teor de água-comparação entre os métodos ASMT D877 e D1816.

Fonte: ASTM, 1952.

## **CAPÍTULO 3**

### **TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS**

#### **3.1- ULTRASSOM**

Em 1890, os físicos franceses Jacques e Pierrri Curie descobriram o efeito piezoelétrico, termo de origem grega que significa “pressão–eletricidade”, propriedade característica de certos materiais de gerar diferença de potencial elétrico quando deformados mecanicamente.

A faixa de operação da técnica de ultrassom utiliza ondas mecânicas acima de 20kHz, portanto superior ao espectro audível humano. A técnica de ultra-som deu início a estudos de meios líquidos, sólidos e gasosos. Foi amplamente utilizado antes e durante a Segunda Guerra Mundial, nos aparelhos SONAR e similares, trazendo grande avanço tecnológico pós-guerra tais como: aparelhos médicos para diagnóstico por som e imagem, terapias, invasivos e não invasivos. Na industria, as operações mais evidentes foram para detectar falhas em materiais de modo não intrusivo, inspeção de soldas, trincas, medição de vazão, fluxo entre outros (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1990).

##### **3.1.1- A GERAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA**

Uma tensão elétrica aplicada em um transdutor piezoelétrico gera uma onda ultrassônica. Os transdutores são construídos com cerâmica piezoelétrica que quando excitados com tensão elétrica, sofrem deformações mecânicas, gerando ondas acústicas que se propagam no meio adjacente ao transdutor. Ao atingir objetos presentes no meio, as ondas acústicas são refletidas e retornam ao transdutor que se deforma novamente, gerando um sinal de tensão nos terminais do transdutor. Estas ondas podem viajar através do material e atingir outro transdutor, que pelo mesmo efeito piezoelétrico recebe a onda acústica e a transforma em sinal de tensão elétrica.

Segundo Krautkramer e Krautkramer (1990), a onda ultrassônica é uma onda de pressão mecânica, isto é, propaga-se no meio devido à vibração mecânica das partículas desse meio. As ondas ultrassônicas se propagam de três modos: longitudinal, transversal e superficial.

##### **3.1.1.1- ONDAS LONGITUDINAIS**

As ondas de propagação longitudinal são também denominadas de compressionais, e fazem com que as partículas do meio oscilem na mesma direção de propagação da onda, conforme mostra a figura 3.1.



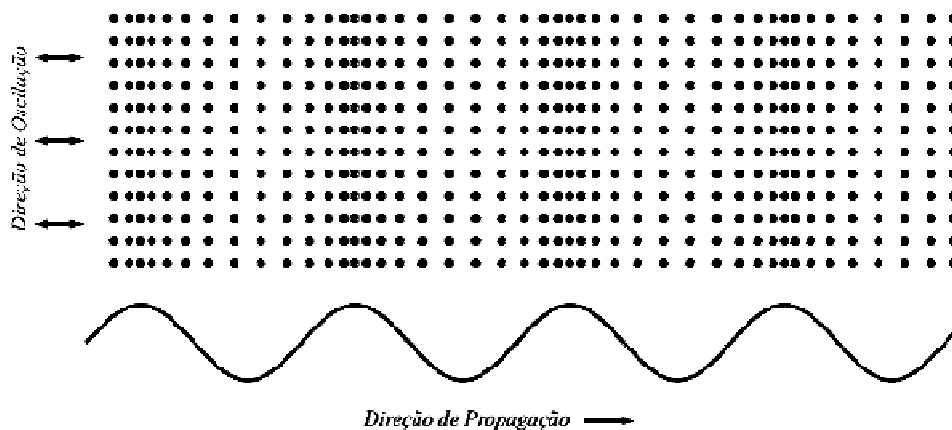


Figura 3. 1- Onda Longitudinal.

Fonte: ANDREUCCI, 2007.

Nas zonas de compressão, as partículas do meio se aproximam umas das outras e na rarefação ou depressão, as partículas ficam distantes umas das outras devido ao efeito da passagem da onda ultrassônica. As ondas longitudinais podem se propagar em meios sólidos, líquidos ou gasosos e apresentam maior velocidade que as outras.

### 3.1.1.2- ONDAS TRANSVERSAIS

As ondas transversais são denominadas de ondas de cisalhamento. Atuam no meio, de modo que as partículas oscilem na direção perpendicular à direção de propagação de uma onda longitudinal. A transmissão das ondas transversais de um meio sólido para um meio líquido ou gasoso, não ocorre (ANDREUCCI, 2007).

As ondas ultrassônicas transversais se propagam com velocidade bem menor que as longitudinais, sendo portanto desprezadas nos nossos experimentos. Segundo estudos de Greenwood e Bamberger (2002), a velocidade de propagação das ondas transversais é menor que 10%, comparada com as ondas longitudinais. A geometria do transdutor é importante no perfil da frente da onda ultrassônica.

### 3.1.2- EQUAÇÃO GERAL DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

Segundo Christensen (1988), consideram-se apenas as ondas longitudinais se propagando em uma única direção (z), para representar a equação das ondas ultrassônicas, conforme expressão 3.1:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \rho_0 K \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho_0$  é a densidade média do meio;

$K$  é a constante de compressibilidade do meio;

$t$  é o tempo;

### 3.1.3- PROPRIEDADES DA ONDA ULTRASSÔNICA

#### 3.1.3.1- VELOCIDADE DA ONDA

A velocidade da onda ultrassônica representa a rapidez que uma determinada condição de onda, por exemplo uma zona de compressão, viaja através do meio. Em geral, esta velocidade é constante para cada meio (material) e independe da frequência ou do comprimento de onda (ANDREUCCI, 2007).

#### 3.1.3.2- FREQUÊNCIA DA ONDA

A quantidade de oscilações que uma partícula do meio sofre por segundo determina a frequência da onda ultrassônica. A frequência de uma onda não varia, mesmo que ela passe de um material para o outro (ANDREUCCI, 2007). Esta afirmação somente é válida para as ondas, cujo espectro apresenta apenas uma frequência, como é o caso de ondas geradas a partir de senoides. Isto acontece porque as matérias atuam como filtro para as ondas e, dependendo do espectro de resposta do material ou do meio, algumas frequências apresentarão atenuação diferente de outras. Se a onda ultrassônica é gerada por um pulso, aparecerão várias frequências, com a presença de conteúdo harmônico na onda ultrassônica.

#### 3.1.3.3- COMPRIMENTO DA ONDA

O comprimento de onda representa a distância entre dois vales ou dois picos, por exemplo, duas zonas de compressão. A equação 3.2 apresenta a relação entre a velocidade, a frequência fundamental e o comprimento de onda do efeito ultrassônico (ANDREUCCI, 2007).

$$c = f\lambda \quad (3.2)$$

Onde:

$c$  é a velocidade do ultrassom (m/s);

$f$  é a frequência fundamental (Hz);

$\lambda$  é o comprimento de onda (m);

A tabela 3.1 mostra valores de comprimento de onda em função da frequência para os materiais preferencialmente utilizados no desenvolvimento do trabalho como o aço, água e o óleo isolante.

Tabela 3. 1- Valores de comprimento de onda em função da frequência para os materiais aço, água e óleo.

Frequência (Hz)	Comprimento de Onda (mm)			
	Aço		Água (c= 1500m/s)	Óleo isolante (c= 1390 m/s)
	Longitudinal (c= 5900m/s)	Transversal (c= 3200 m/s)		
0,5	11,800	6,400	3,000	2,780
1	5,900	3,200	1,500	1,390
2	2,950	1,600	0,750	0,695
4	1,475	0,800	0,375	0,347
6	0,983	0,533	0,250	0,231
10	0,590	0,320	0,150	0,139

Fonte: modificado de KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1990.

Além dos parâmetros apresentados, existem parâmetros importantes que caracterizam uma onda ultrassônica: a pressão, intensidade acústica e impedância acústica (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1990).

### 3.1.4- PRESSÃO ACÚSTICA DO ULTRASSOM

Segundo Christensen (1988), a pressão acústica, medida em Pascal ou N/m<sup>2</sup> é a pressão que a onda aplica sobre uma partícula quando ela é exposta a frente de onda, como mostra a equação 3.3.

$$p = Z\omega A \quad (3.3)$$

Onde:

$p$  é a pressão ultrassônica (N/m<sup>2</sup>);

$Z$  é a impedância acústica (Kg/ m<sup>2</sup> s);

$\omega$  é a frequência angular da onda (rad/s) - ( $\omega = 2\pi.f$ );

$A$  é a amplitude do movimento das partículas (Kg);

### 3.1.5- INTENSIDADE ULTRASSÔNICA

A intensidade sonora ou ultrassônica representa a potência que a onda transporta, e seu valor corresponde à potência que passa por unidade de área perpendicular a direção de propagação da onda ultrassônica em  $W/m^2$  (CHRISTENSEN, 1998). A equação 3.4 representa a intensidade da onda ultrassônica:

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (3.4)$$

Onde:

$I$  representa a intensidade acústica ( $W/m^2$ );

$p$  é a pressão ultrassônica ( $N/m^2$ );

$Z$  é a impedância acústica ( $Kg/m^2 \cdot s$ );

### 3.1.6- IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ULTRASSÔNICA

A impedância acústica de um meio de propagação representa a dificuldade ou capacidade de oposição que esse meio oferece a passagem da onda acústica e depende das propriedades mecânicas do meio de propagação (OLYMPUS, 2007). A equação 3.5 expressa a impedância acústica:

$$Z = \rho_0 c \quad (3.5)$$

Onde:

$Z$  é a impedância acústica ( $Kg/m^2 \cdot s$ );

$\rho_0$  é a densidade do meio ( $Kg/m^3$ );

$c$  é a velocidade acústica no meio ( $m/s$ );

A tabela 3.2 relaciona a impedância acústica, a densidade e a velocidade acústica para vários materiais, incluindo o óleo isolante mineral que é o meio de propagação utilizado neste trabalho e a água, que é o contaminante do meio.

Tabela 3. 2- Impedância acústica do som e densidade dos materiais.

<b>Material</b>	<b>Velocidade do som (m/s)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Impedância acústica (Kg/ m<sup>2</sup>.s)</b>
Ar	330	1,3	430
Alumínio	6300	2700	17 . 10 <sup>6</sup>
Cobre	4700	8900	42 . 10 <sup>6</sup>
Ouro	3200	19300	63 . 10 <sup>6</sup>
Aço	5900	7700	45 . 10 <sup>6</sup>
Óleo(SAE30)	1700	870	1,5 . 10 <sup>6</sup>
Água	1480	1000	1,5 . 10 <sup>6</sup>
Prata	3600	10500	38 . 10 <sup>6</sup>
Níquel	5600	8800	50 . 10 <sup>6</sup>
Tungstênio	5200	19100	104 . 10 <sup>6</sup>
Magnésio	5800	1700	10 . 10 <sup>6</sup>
Glicerina	1920	1260	2,5 . 10 <sup>6</sup>
Óleo Diesel	1250	800	1 . 10 <sup>6</sup>
Óleo mineral isolante	1390	866	1,3 . 10 <sup>6</sup>
Acrílico	2700	1180	3,2 . 10 <sup>6</sup>

Fonte: OLYMPUS, 2007.

### 3.1.7- REFLEXÃO ACÚSTICA EM INTERFACE

Segundo Christensen (1988), quando a onda acústica atravessa uma interface de propagação entre dois meios constituídos de materiais diferentes, uma parte de sua energia é transmitida e a outra parte dessa energia será refletida. Pode ocorrer mudança na direção de propagação. O estudo e análise de comportamento das ondas ultrassônicas incidindo na interface é feito considerando-se as superfícies planas e uniformes. A figura 3.2 mostra uma onda acústica mudando de meios e suas alterações ocorridas.

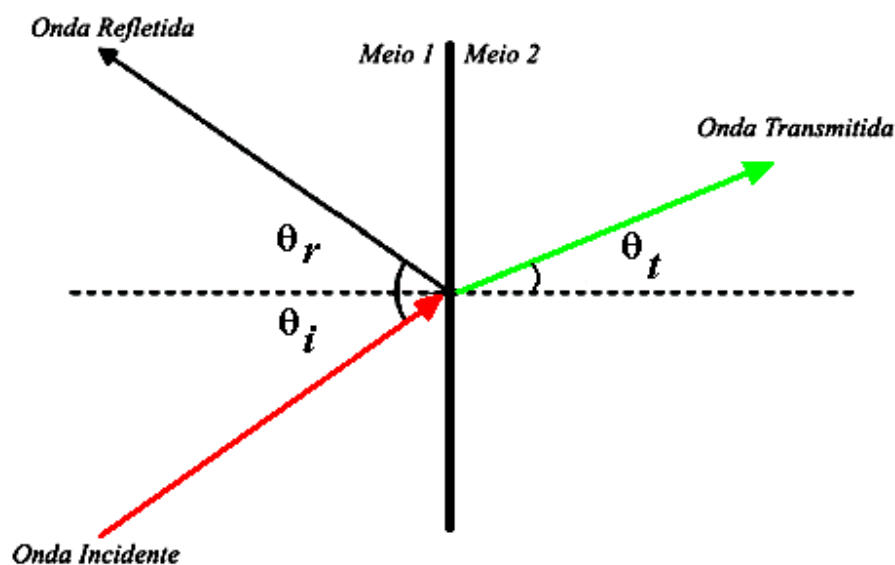


Figura 3. 2- Reflexão da onda em interface.

Fonte: CHRISTENSEN, 1988.

### 3.1.7.1- REFLEXÃO DA ONDA ACÚSTICA AO ATRAVESSAR A INTERFACE DE DOIS MEIOS DIFERENTES

A onda acústica ultrassônica “incidente” está viajando no meio 1 e subitamente ela passa a se propagar em um meio 2 cuja impedância acústica é diferente da anterior. Parte da energia é transmitida para o meio 2 e parte é refletida de volta para o meio 1. A parte da energia que passou para o meio 2 continuou a se propagar, com energia menor e ângulo de propagação, alterado e dependente do ângulo incidente. A equação 3.6 obtida da lei de Snell mostra a relação de reflexão de ondas acústicas e seus respectivos ângulos (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1990).

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3.6)$$

Onde:

$\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os comprimentos de onda ultrassônica do meio 1 e meio 2 respectivamente;

$c_1$  e  $c_2$  são as velocidades acústicas no meio 1 e meio 2 respectivamente;

$\theta_i$  é o ângulo de incidência da onda de ultrassom no meio 1;

$\theta_t$  é o ângulo de transmissão da parte da onda incidente que passou para o meio 2;

### 3.1.7.2- COEFICIENTES DE REFLEXÃO-R E COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO-T DE PRESSÃO ACÚSTICA NA INTERFACE

Considerando o caso de incidência normal da onda acústica na interface, isto é, os  $\theta_i = \theta_t = 0^\circ$  coeficientes  $R$  e  $T$  podem ser representados pelas equações 3.7 e 3.8 (CHRISTENSEN, 1988):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.7)$$

$$T = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (3.8)$$

Onde:

$Z_1$  é a impedância acústica do meio 1 ( Kg/m<sup>2</sup>.s);

$Z_2$  é a impedância acústica do meio 2 ( Kg/m<sup>2</sup>.s);

### 3.1.7.3-ATENUAÇÃO DA ONDA ACÚSTICA

A atenuação da onda ultrassônica ocorre à medida que a onda se propaga no meio. Sua energia diminui a medida que aumenta a distância percorrida. As principais causas de atenuação são: divergência da onda, dispersão (espalhamento) causada pela não homogeneidade do meio, absorção pelo meio, conversão em outras modalidades de vibrações. No caso partículas de meios líquidos, a dispersão e a absorção são parâmetros que mais influenciam na propagação das ondas ultrassônicas.

### 3.1.7.4-DISPERSÃO DA ONDA

A dispersão ou espalhamento da onda acústica ocorre quando o meio apresenta falhas como microbolhas de água, ar ou partículas em suspensão no percurso da onda acústica. Essas discontinuidades no meio causam reflexão nas interfaces encontradas no percurso. Se a incidência foi oblíqua, a onda refletida será desviada na direção da frente de propagação, espalhando energia por todo o meio. Segundo Krautkrarmer e Krautkrarmer (1990), este efeito está diretamente relacionado com a frequência fundamental da onda ultrassônica. Quanto maior for a frequência da onda, maior será a dispersão e atenuação (atenuação é a combinação de dispersão e absorção).

### 3.1.7.5-ABSORÇÃO DA ONDA

A onda ultrassônica, quando atravessa o meio, gasta parte de sua energia com as partículas do meio que oscilam para a propagação da onda. Esta perda de energia causa a atenuação da onda ultrassônica devido ao atrito entre as partículas, se opondo ao movimento harmônico das mesmas. Parte dessas energias é convertida em calor.

A amplitude máxima da pressão acústica de uma onda atenuada após percorrer uma distância  $d$  é dada pela equação 3.9:

$$p = p_0 e^{-\alpha d} \quad (3.9)$$

Onde:

$\alpha$  é o coeficiente de atenuação do meio ( $m^{-1}$ );

$p$  é a amplitude máxima da pressão acústica final ( $N/m^2$ );

$p_0$  é a amplitude da pressão acústica inicial ( $N/m^2$ );

$d$  é a distância percorrida pela onda (m);

A atenuação da onda acústica é representada e expressa em Nepers, que é um número adimensional, obtido multiplicando o coeficiente de atenuação  $\alpha$  pela distância percorrida pela onda, como mostra a equação 3.10:

$$\alpha d = \ln \frac{p_0}{p} \quad (3.10)$$

Em dB/m (decibel por metro) é expresso pela equação 3.11:

$$\alpha d = \log \frac{p_0}{p} \quad (3.11)$$

### 3.2-TRANSDUTORES DE ULTRASSOM

O transdutor de ultrassom é um dispositivo eletromecânico que converte energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, com objetivo de atuar como transmissor e/ ou receptor de ondas acústicas, através do efeito piezoelétrico. A temperatura de operação dos cristais transdutores nunca podem atingir a temperatura de Curie, pois danifica o elemento piezoelétrico, alterando suas propriedades piezoelétricas, despolarizando os cristais. A tabela 3.3 mostra os materiais mais utilizados na fabricação dos transdutores ultrassônicos e suas características importantes.



Tabela 3. 3- Alguns materiais piezoelétricos e suas características.

Material	Velocidade do som (m/s)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Impedância acústica 10 <sup>6</sup> (Kg/ m <sup>2</sup> .s)	Constante de deformação (10 <sup>9</sup> V/m)	Módulo piezoelétrico (10 <sup>-12</sup> m/V)	Temperatura de Curie °C
<i>Quartzo</i>	5740	2,65	15,2	4,9	2,3	576
<i>PVDF</i>	1500...2600	1,3...1,8	2,1...4,7		25	165...180
<i>Niobato de lítio</i>	7320	4,64	34	6,7	6	
<i>Sulfato de lítio</i>	5640	2,06	11,2	8,2	15	130

Fonte: OLYMPUS, 2007.

Segundo Krautkramer e Krautkramer, (1990), a equação 3.12 representa o efeito piezoelétrico direto: tensão x deformação.

$$\Delta x_t = d_{33} U_t \quad (3.12)$$

$\Delta x_t$  é a deformação resultante no cristal transmissor (m);

$d_{33}$  é o coeficiente piezoelétrico de cristal de cerâmica com índice de polarização na direção 3, e superfície 3 (m/V);

$U_t$  é o potencial de tensão aplicada ao transmissor (V);

A equação 3.13 para o efeito piezoelétrico reverso pode ser representada pela variação de espessura do cristal receptor:

$$U_r = h_{33} \Delta x_r \quad (3.13)$$

Onde:

$U_r$  é o potencial em circuito aberto, que corresponde à tensão apresentada nas extremidades do cristal transdutor, na ausência de carga (V);

$h_{33}$  é a constante de deformação piezoelétrica (m/V);

$\Delta x_r$  é a variação na espessura do cristal receptor (m);

A equação 3.14 expressa a tensão nos terminais do transdutor receptor em função da pressão acústica incidente na superfície do transdutor.

$$U_r = g_{33}lp_x \quad (3.14)$$

Onde:

$g_{33}$  é a constante de pressão piezoelétrica ( $V \cdot m \cdot N^{-1}$ );

$l$  é a espessura do cristal receptor (m);

$p_x$  é a pressão acústica na superfície do transdutor ( $N/m^2$ );

### 3.2.1-TIPOS DE TRANSDUTORES DE ACORDO COM O NÚMERO DE CRISTAIS

**a-Transdutor piezoelétrico monocristal (“single crystal”):** nesse tipo de transdutor, a transmissão (geração) e recepção são realizadas no mesmo cristal. A técnica é feita através de multiplexação do cristal através de chaves analógicas.

**b-Transdutor piezoelétrico multicristais (“twin-crystal” ou transmissor–receptor):** nesse tipo de transdutor são usados dois cristais, um para a transmissão e outro para a recepção do sinal. A figura 3.3 mostra o cristal utilizado nos experimentos para pesquisas com óleo isolante na análise de teor de umidade. A tabela 3.4 mostra as características adicionais do transdutor ultrassônico S9208.



Figura 3. 3- Transdutor ultrassônico monocristal S 9208- AF84- Physical Acoustic Corporation.

Fonte: PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2010a.

Tabela 3. 4- Características adicionais do transdutor ultrassônico S9208 (tabela original de fábrica).

Sensor Model	Dimension DiaxHT (mm [Inch]) (1)	Weight (gm)	Operating Temperature °C	Shock Limit (g) (2)	Case Material	Face Material	Connector Type	Connection Location	Peak Sensitivity dB ref. 1V/(m/s) [1V/ubar]	Operating Freq. Range (kHz) *	Resonant F frequency (kHz)	Directionality (dB)	Grounding	Seal Type	Comments	Recommended Accessories
S9208	25x25 [1x1]	40	-34 to 121	10	Stainless Steel (304)	Stainless Steel (304)	Microdot 10-32	SIDE	45(4) [-85]	200-1000	500 [500]	±1.5	A	SOLDER	Displacement Transducer	1232-1 Cable

Fonte: modificado de PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2010b.

A figura 3.4 mostra o certificado de calibração do transdutor S 9208 com sua curva característica de sensibilidade em dB x largura de banda, que varia de 0 a 1 MHz.

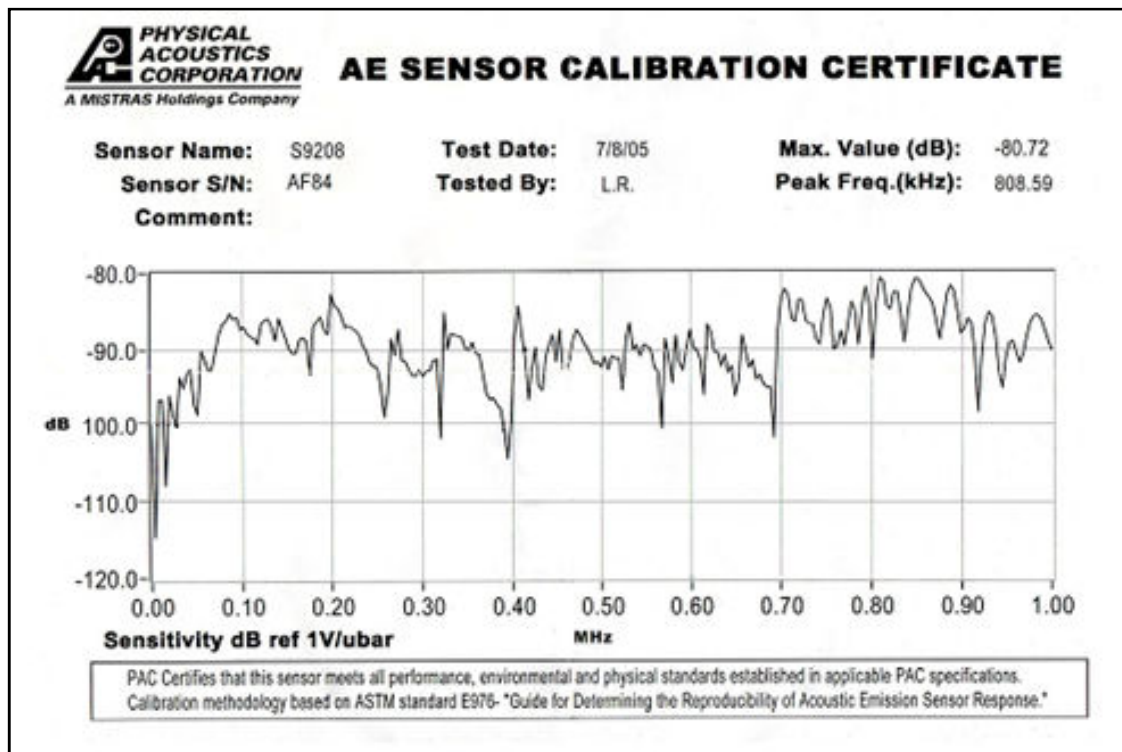


Figura 3. 4- Características do transdutor ultrassônico S908 da Physical Acoustic.

Fonte: PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2010a.

### 3.2.2-MODO DE OPERAÇÃO DOS TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

**a- Modo contínuo:** a excitação dos transdutores ultrassônicos, no modo contínuo, utiliza um sinal de tensão senoidal. A onda mecânica de saída do transdutor será também senoidal com a mesma frequência do sinal de excitação.

**b- Modo pulsado:** a entrada para a operação pulsada utiliza um pico de tensão, como exemplo, um sinal de tensão tipo pico de tensão (spike) ou pulso de onda quadrada. O sinal mecânico de saída gerado será composto por um *conjunto de senoides*, cuja frequência fundamental corresponde à frequência principal do transdutor. A figura 3.5 mostra como exemplo o sinal de ultrassom gerado, excitando o transdutor com onda quadrada de 2,2 MHz.

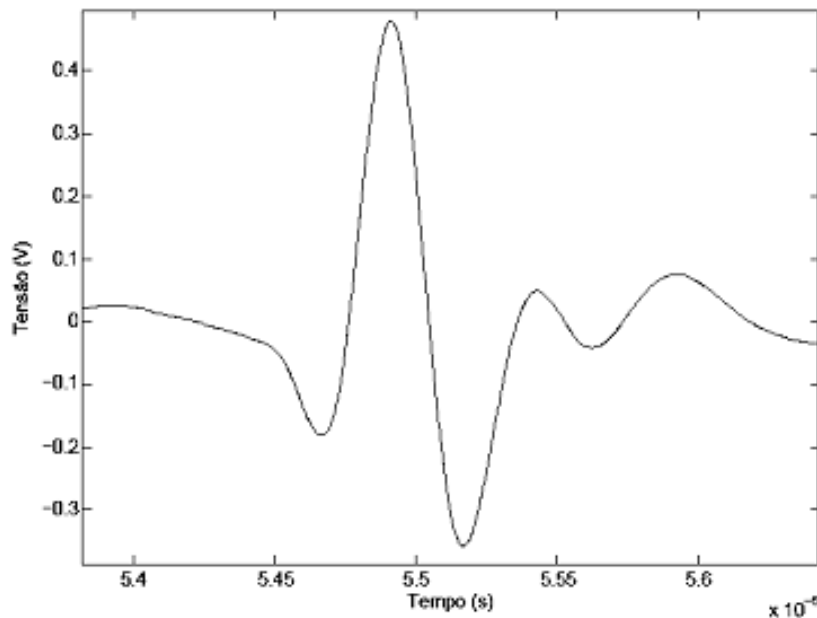


Figura 3. 5- Onda mecânica de saída de um transdutor ultrassônico com excitação em pulso de tensão de 2,2 MHz.

Fonte: OLYMPUS, 2007.

### 3.2.3-LIMITE DE EXCITAÇÃO DO TRANSDUTOR COM ONDA QUADRADA-MODO PULSADO

Os fabricantes recomendam não ultrapassar 50V por milésimo de polegada de espessura do cristal, quando operar no modo pulsado com onda quadrada. Quanto maior a frequência de operação do transdutor ultrassônico, menor será a espessura do cristal. A tensão aplicada no cristal não deve ultrapassar o valor  $50 \text{ V} / 1000$ , caso ultrapasse, será danificado.

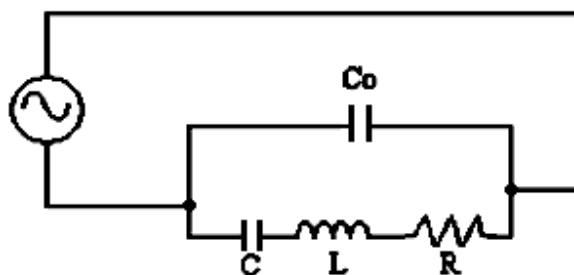
### 3.3-LÍQUIDO DE ACOPLAMENTO

Na prática, as superfícies onde os transdutores são acoplados não são perfeitamente lisas e existe sempre espaços de ar entre o transdutor e a superfície de contato. Como a impedância acústica do ar é muito baixa ( $430 \text{ Kg/ m}^2.\text{s}$ ), a reflexão na interface é quase total, atenuando o sinal. Para preencher a irregularidade de interface, recomenda-se o uso de líquidos acoplantes com alta impedância acústica (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1990):

- Glicerina:  $2,5 \cdot 10^6 \text{ Kg/ m}^2.\text{s}$ ;
- Óleo SAE 30:  $1,5 \cdot 10^6 \text{ Kg/ m}^2.\text{s}$ ;

### 3.4-CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DOS CRISTAIS TRANSDUTORES DO ULTRASSOM

Os cristais sensores/transdutores de ultrassom são representados por circuitos RLC e apresentam frequência própria de ressonância de acordo com a figura 3.6.



Legenda:

Co- capacitância dos contatos elétricos com o cristal;

R- resistência elétrica de perda do

cristal;

L-efeito indutivo;

C- capacitância do cristal;

Figura 3. 6- Equivalente elétrico de um material piezoelétrico submetido ao sinal alternado.

Fonte: ATCP do Brasil, 2004.

## CAPÍTULO 4

# RECURSOS MATEMÁTICOS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

### 4.1- TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

A Transformada Wavelet Discreta (TWD), assim como a Transformada Discreta de Fourier (DFT), é um recurso matemático para representar sinais discretos a partir de um conjunto de sinais padronizados, os sinais de expansão. No caso da DFT, este conjunto de sinais é composto por senoides e cossenoides com a variação de um parâmetro: a frequência. Já a TWD possui como conjunto de sinais de expansão, funções chamadas “Wavelets”, onde a variação acontece não apenas na frequência, mas também no tempo. Essas variações é que ditam qual o tipo de informação que será extraída do sinal que está sendo decomposto pela transformada. Assim, a DFT permite extrair informações de frequência e fase apenas, enquanto a TWD permite extrair informações de frequência e tempo simultaneamente (BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998).

#### 4.1.1- DECOMPOSIÇÃO DE SINAIS

Segundo Burrus, Gopinath e Guo (1998), a expansão de um sinal (ou função) pode ser entendida através da expressão 4.1:

$$f(t) = \sum_k a_k \psi_k(t) \quad (4.1)$$

onde  $f(t)$  é a função a ser expandida ou representada,  $a_k$  são os coeficientes de expansão e  $\psi_k$  são as funções de expansão. Por exemplo, para a DFT, a expressão 4.2 equivalente seria:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{\frac{2j\pi}{N}kn} \quad (4.2)$$

onde  $x_n$  é a função a ser expandida,  $X_k$  são os coeficientes de expansão e  $e^{\frac{2j\pi}{N}kn}$  representa as funções de expansão. Quando o parâmetro  $k$  na expressão 4.2 varia, as funções de expansão têm sua frequência variada. Assim, o sinal ou função  $x_n$  passa a ser representado por senoides e cossenoides de diferentes frequências. As amplitudes são registradas nos coeficientes de expansão  $X_k$ . Esta é a informação que realmente importa quando se utiliza a DFT em um sinal.

A obtenção dos coeficientes de expansão  $a_k$  é chamada de *decomposição do sinal*. Sua expressão genérica é dada pela expressão 4.3:

$$a_k = \frac{\langle f(t), \psi_k(t) \rangle}{\langle \psi_k(t), \psi_k(t) \rangle} \quad (4.3)$$

onde  $\langle f(t), \psi_k(t) \rangle$  representa o produto interno entre as funções ou sinais  $f(t)$  e  $\psi_k(t)$ . O produto interno entre sinais é definido como a expressão 4.4:

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int_a^b x(t)y(t)dt \quad (4.4)$$

Para sinais discretos, por exemplo,  $x[n]$  e  $y[n]$ , é definido como:

$$\langle x[n], y[n] \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n] \quad (4.5)$$

Assim, para o caso da DFT, os coeficientes  $X_k$  podem ser obtidos através da expressão 4.6:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi j}{N}kn} \quad (4.6)$$

Nesta expressão 4.6, o somatório representa o produto interno entre a função que está sendo expandida (ou transformada) e as funções de expansão (senoides e cossenoides), exatamente como na expressão (4.3). Porém, o denominador correspondente à expressão 4.3 é unitário na expressão (4.6), da DFT. Isto acontece porque os sinais de expansão são escolhidos de modo que sua norma seja unitária. Não é exatamente este o caso da DFT, mas há uma compensação para isso no coeficiente  $1/N$  que aparece na expressão 4.2. A norma de um sinal é dada pela expressão 4.7:

$$\|x(t)\| = \sqrt{\langle x(t), x(t) \rangle} \quad (4.7)$$

A expressão da norma está ligada ao produto interno. Assim, uma norma unitária significa que o produto interno deste sinal por ele mesmo também será unitário.

#### 4.1.1.1- DECOMPOSIÇÃO DE SINAIS COM A TRANSFORMADA DE WAVELET DISCRETA

Segundo Burrus, Gopinath e Guo (1998), no caso da Transformada Wavelet Discreta, há uma diferença significativa nos coeficientes de expansão. A expressão para a decomposição com a TWD é dada por:

$$a_{j,k} = \frac{\langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle}{\langle \psi_{j,k}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle} = \frac{\int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt}{\int \psi_{j,k}(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt} \quad (4.8)$$

As funções Wavelets devem possuir norma unitária, o que simplifica a expressão 4.8, resultando na expressão 4.9:

$$a_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt \quad (4.9)$$

Os coeficientes de expansão possuem dois tipos de variação. Há variação na frequência, representada pela variável  $j$  na expressão 4.9. Porém, na teoria da TWD, usa-se o conceito de *escala*, no lugar de frequência. A escala de uma função Wavelet pode ser pensada como o inverso de sua frequência. Assim, uma função Wavelet de alta frequência é dita ser uma função Wavelet de pequena escala. Além da variação da escala, há variação no tempo, representada pela variável  $k$  na expressão 4.9. Portanto, ao se aplicar a TWD em um sinal, obtém-se um conjunto bidimensional de coeficientes que se traduzem por informações de escala (frequência) e tempo, simultaneamente. Isso significa que é possível não apenas detectar a presença de uma determinada frequência em um sinal, mas também detectar *quando* esta frequência ocorreu.

#### 4.1.1.2- COMO FUNCIONA A TRANSFORMADA

A idéia fundamental da Transformada Wavelet é analisar de acordo com a escala e a superposição. As Wavelets são usadas para representar o sinal ou função através de uma correlação.

O primeiro mecanismo a ser compreendido é a forma com que são organizados os coeficientes ou, de outro ponto de vista, o modo como os parâmetros devem variar para se obter os coeficientes. Inicia-se a análise definindo uma escala. Em seguida, para esta escala, varia-se o deslocamento de tempo (BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998). Depois de deslocar no tempo tantas vezes quantas forem necessárias, passa-se para a próxima escala. Agora, para esta escala, repete-se a variação no deslocamento de tempo da mesma forma que foi feita para a escala anterior, e assim para todas as outras. A variação de escalas pode ser vista na figura 4.1. Cada gráfico é a Wavelet numa escala  $j$  diferente. Já o parâmetro deslocamento de tempo para uma dada escala tem sua variação ilustrada na figura 4.2, onde cada gráfico mostra a mesma escala de uma Wavelet com diferentes valores de  $k$ . Estes gráficos são apenas uma forma ilustrativa de mostrar como é a variação desses parâmetros. Os valores exatos de  $j$  e  $k$  dependem de como o conjunto de expansão é organizado.



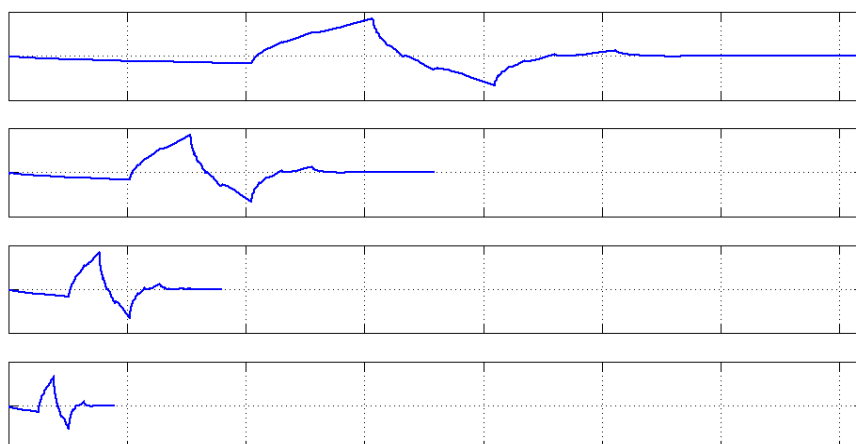


Figura 4. 1- Variando o parâmetro escala (j) da Wavelet Daubechies 2.

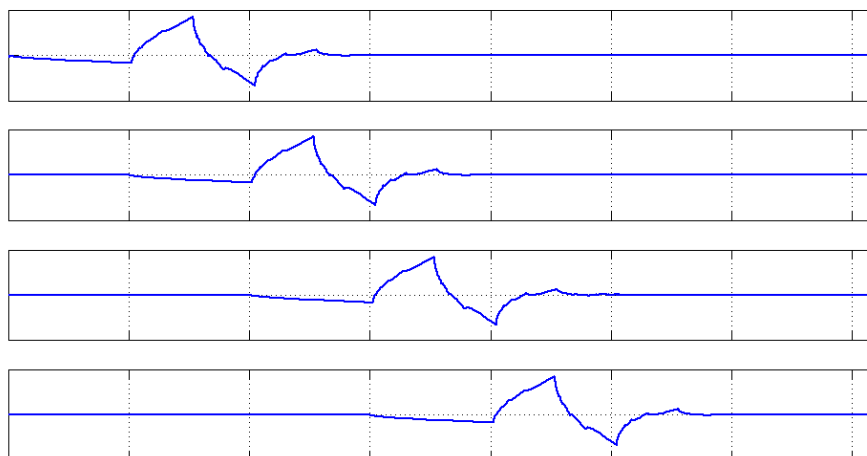


Figura 4. 2- Variando o padrão de deslocamento de tempo da Wavelet Daubechies 2.

Compreendida a forma como são variados os parâmetros da transformada, parte-se para a maneira como são calculados os coeficientes.

#### 4.1.1.3- CÁLCULO DOS COEFICIENTES

##### -CORRELAÇÃO

Antes de estudar como são calculados os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta, é importante comentar, a título de revisão ou talvez de introdução, o conceito de *correlação*. A correlação cruzada é uma operação entre dois sinais que retorna um valor

correspondente ao grau de semelhança entre eles. Em outras palavras, é uma medida de quanto as duas curvas são semelhantes uma em relação à outra.

O cálculo da correlação é bem ilustrado para o caso discreto onde deve-se multiplicar as amostras correspondentes dos sinais e, em seguida, somar estes produtos. A figura 4.3 ilustra este procedimento.

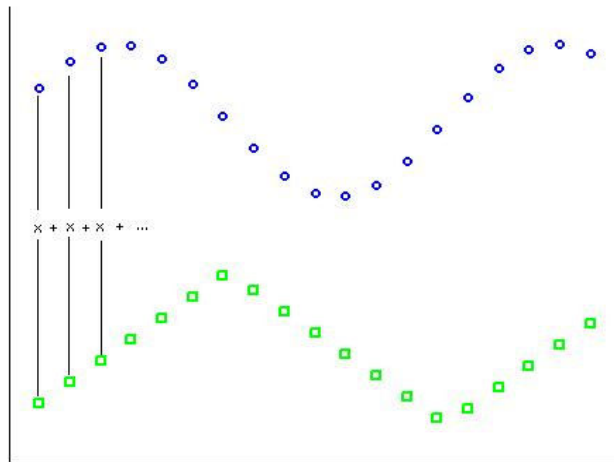


Figura 4. 3- Cálculo da correlação cruzada.

O valor numérico resultante não tem tanta importância absoluta, mas é importante como valor relativo. O sinal (positivo ou negativo) é um indicador mais significativo da semelhança entre as curvas. Se o resultado for positivo ou negativo, elas têm alguma semelhança; se o resultado tender para zero, elas têm pouca ou nenhuma semelhança.

Para o caso discreto, a correlação entre dois sinais  $x[n]$  e  $y[n]$  de tamanho  $N$  amostras é dada pela expressão 4.10 (BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998) :

$$r = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot y[n] \tag{4.10}$$

Para o caso contínuo, onde os sinais são  $x(t)$  e  $y(t)$  num intervalo  $[0, T]$ , tem-se a expressão 4.11 :

$$r = \int_0^T x(t) \cdot y(t) dt \tag{4.11}$$

Aqui, um detalhe deve ser observado: a expressão 4.11 é igual à expressão 4.4 do *produto interno* entre dois sinais para o caso em que ambos são reais e contínuos, o mesmo valendo para o caso discreto. Então o produto interno é uma medida de semelhança entre os dois sinais. Esta medida de semelhança também significa uma medida da informação em comum que os dois sinais carregam.

#### -CÁLCULO DOS COEFICIENTES DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Seja a expressão 4.12 da Transformada Wavelet Discreta de sinais contínuos:

$$a_{j,k} = \int f(t)y_{j,k}(t)dt \quad (4.12)$$

Trata-se apenas do produto interno entre o sinal  $f(t)$  e a Wavelet na escala  $j$  e no tempo  $k$ . Ou, colocando de outra forma, trata-se da correlação entre o sinal e a Wavelet. Isto é ilustrado na figura 4.4. A Wavelet numa dada escala  $j$  e deslocamento de tempo  $k$  é “comparada” com o sinal inteiro. Obviamente, apenas o trecho onde a Wavelet está definida é que será comparado, daí a capacidade de análise local. Esta comparação nada mais é do que o cálculo do produto interno ou da correlação (BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998).

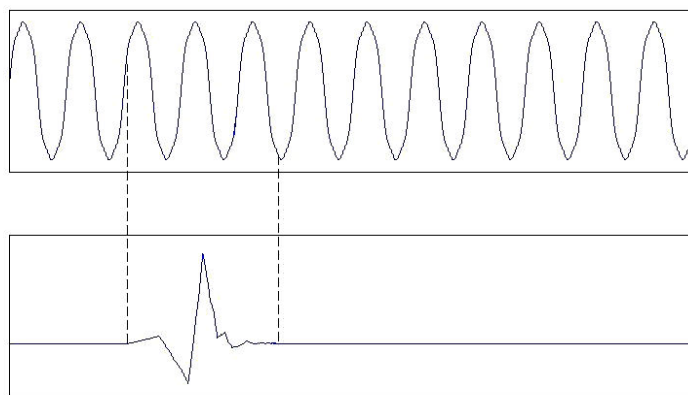


Figura 4. 4- ilustração do cálculo do coeficiente da transformada da Wavelet Discreta.

Quando a Wavelet estiver “esticada” (escala maior) de forma a se comparar, por exemplo, a um período do sinal, a correlação dará um valor relativamente alto. Quando ela estiver bastante “comprimida” (pequena escala), a correlação só dará um valor alto quando for comparada a um trecho de sinal que tenha duração próxima da duração da Wavelet e forma de onda também parecida com a da Wavelet. A figura 4.5 ilustra um caso onde há um pequeno transitório num sinal e a escala da Wavelet está bastante diferente da escala do transitório.

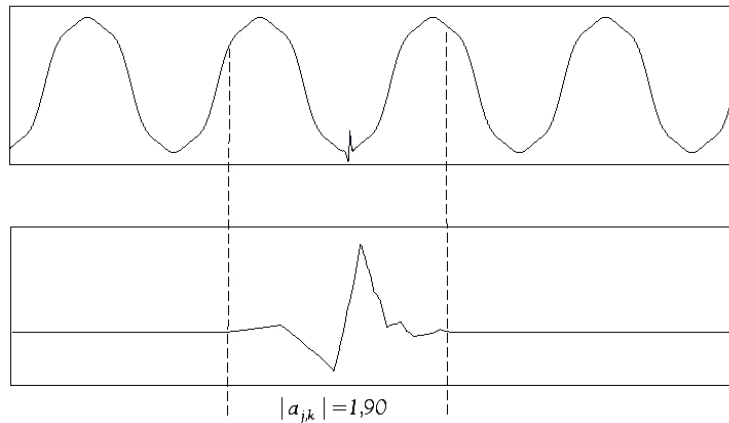


Figura 4. 5- Transitório e Wavelet em escalas diferentes.

O valor numérico foi calculado usando a expressão da correlação, sendo os sinais discretos. Mas, como foi dito, o que importa é o valor relativo. Para comparar, a figura 4.6 ilustra o caso onde a Wavelet e o transitório estão em escalas semelhantes.

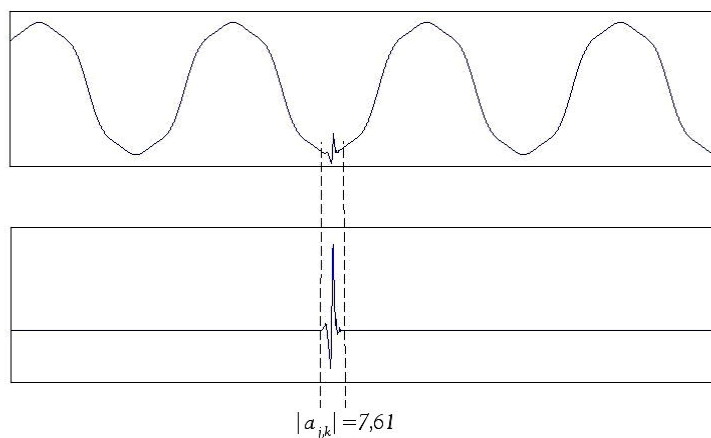


Figura 4. 6- Transitório e Wavelet na mesma escala.

Neste caso, o valor da correlação é bem maior que o valor anterior. As dimensões da Wavelet e do transitório são comparáveis, daí fato de o valor ser maior. Portanto, os coeficientes da transformada Wavelet referentes a escalas pequenas (Wavelets “comprimidas”) refletirão apenas o conteúdo do sinal relativo a rupturas ou discontinuidades, transitórios de curta duração e ruídos aleatórios. As escalas maiores (Wavelets “esticadas”) refletirão o conteúdo principal do sinal, aquilo que é visto inicialmente quando o mesmo é desenhado em um gráfico. A manipulação dos coeficientes Wavelets leva a diversas aplicações, desde a detecção de transitórios até a eliminação de ruído e a compactação de imagens (BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998).

#### 4.1.1.4- ALGORITMO PARA A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Segundo Burrus, Gopinath e Guo (1998), um algoritmo bastante eficiente para a Transformada Wavelet Discreta pode ser definido desde que se estabeleça um conjunto de funções de expansão com características especiais. Este conjunto, quando definido, leva a expressão 4.1 da TWD a se tornar a expressão 4.12:

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{j/2} y(2^j t - k) \quad (4.12)$$

A variável  $j$ , neste caso, não é exatamente a escala, embora esteja diretamente envolvida na definição da mesma. Esta variável passa a definir o nível de decomposição. A escala será dada por  $2^j$ , ou seja, terá uma variação logarítmica (ou exponencial) de base 2, ou colocando de outra forma, a escala das Wavelets será dobrada a cada nível no sentido de crescimento, e dividida pela metade no sentido de decrescimento. Quanto maior o valor de  $j$ , menor será a escala. A variação da escala permite gerar uma base (conjunto de funções de expansão) *ortonormal* (ortogonal + normal) mínima, de forma que se possa obter um algoritmo eficiente para implementar a Transformada Wavelet Discreta, e sua inversa, em computador. Pode-se definir a variação da escala de modo diferente, gerando outro tipo de base, mas da forma como está apresentada na equação 4.12, um algoritmo chamado de *bancos de filtros* pode ser implementado, o que agiliza aplicações práticas.

Um detalhe importante que influencia muito a definição da equação 4.12 é a necessidade de que a norma das funções da base (ou das funções de expansão) deve ser unitária. Isto faz com que o termo  $2^{j/2}$  apareça. Na prática, isto significa que quanto mais “comprimida” for a função de expansão, ou seja, quanto menor a escala, maior será sua amplitude, e vice-versa, o que é apresentado na figura 4.7, onde a mesma Wavelet aparece em escalas diferentes, mas com norma unitária.

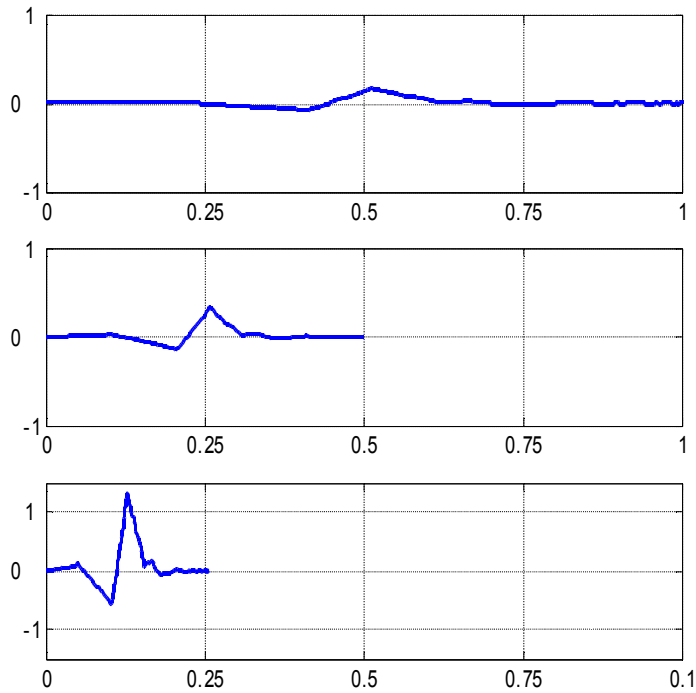


Figura 4. 7- Variação da escala, porém a norma unitária é mantida.

Outra característica importante do conjunto de expansão é o fato de ser formado por dois tipos de funções: as funções escalas e as funções Wavelets. As funções Wavelets já foram comentadas. As funções escalas permitem expandir a parte de baixas frequências do sinal a ser decomposto. Assim, a expressão 4.12 se torna a expressão 4.13:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j_0} \varphi_{j_0, k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j(k) \psi_{j, k}(t) \quad (4.13)$$

onde  $c_{j_0}$  são os coeficientes de aproximação,  $\varphi_{j_0}$  são as funções escalas,  $d_{j_0}$  são os coeficientes de detalhes e  $\psi_{j_0}$  são as funções Wavelet. Os coeficientes de aproximação se referem à parte de baixa frequência do sinal decomposto, o chamado *nível de aproximação*. Os coeficientes de detalhes dizem a respeito das partes de altas frequências do sinal decomposto e formam vários níveis, chamados de *níveis de detalhes*.

De acordo com Burrus, Gopinath e Guo (1998), as expressões para obtenção dos coeficientes de aproximação são definidas como a expressão 4.14:

$$c_j(k) = \sum_m h(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (4.14)$$

onde  $h(m)$  são coeficientes definidos a partir das funções escalas do conjunto de expansão. Os coeficientes de detalhes são obtidos com:

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (4.15)$$

onde  $h_1(m)$  são coeficientes definidos a partir das funções Wavelets do conjunto de expansão. Estes coeficientes das funções de expansão são definidos de acordo com a Wavelet escolhida para a decomposição, sendo encontrados em livros ou em pacotes de softwares como o Matlab.

O algoritmo de decomposição para 3 níveis é mostrado na figura 4.8, onde  $c_J$  é o sinal a ser decomposto. Este algoritmo representa um processo de *filtragem* por convolução, seguida de uma sub-amostragem, onde o *kernel* do filtro, ou seja, os coeficientes do filtro são os coeficientes da função escala (aproximação) e da função Wavelet (detalhes). Então, o processo de obtenção dos coeficientes de expansão da Transformada Wavelet Discreta é nada mais do que um processo de filtragem recorrente, de forma que os coeficientes de aproximação e de detalhe de um *nível j* de escala são obtidos filtrando-se os coeficientes de aproximação do *nível j+1* de escala usando como filtros os coeficientes da função escala para a aproximação e da função Wavelet para o detalhe e, em seguida, realizando-se uma sub-amostragem.

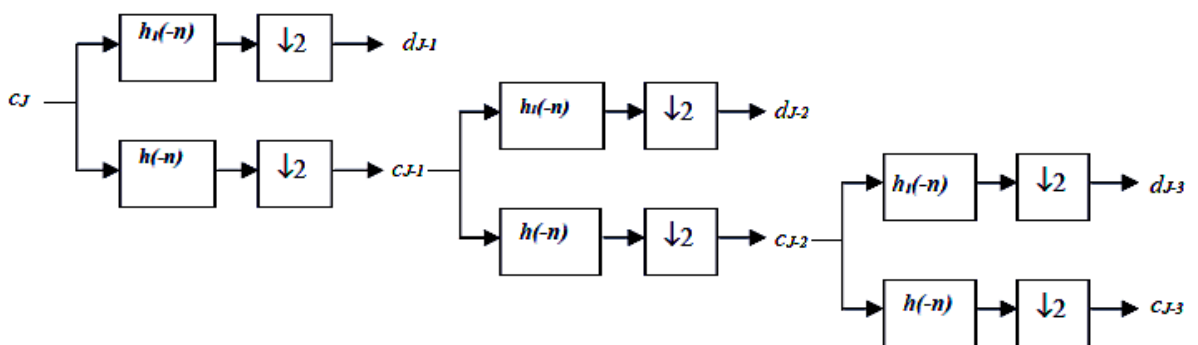


Figura 4. 8- Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta para 3 níveis de decomposição.

Fonte: modificado de BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998.

Quando um sinal é decomposto pela Transformada Wavelet Discreta, seu efeito é bem característico no domínio da frequência. A figura 4.9 ilustra como acontece a decomposição na frequência de um sinal discreto.

Após a passagem pelo primeiro estágio, os coeficientes resultantes  $c_{j-1}$  e  $d_{j-1}$  representam o particionamento da banda total do sinal em duas partes. Deve-se observar que o detalhe é composto pelas freqüências mais altas e a aproximação pelas freqüências mais baixas. Para o próximo estágio, apenas a aproximação é decomposta, resultando no seu particionamento, que gera os coeficientes  $c_{j-2}$  e  $d_{j-2}$ . Por fim, no terceiro estágio, novamente os coeficientes de aproximação de mais baixa freqüência é que são decompostos em outros coeficientes de aproximação e detalhe. O resultado, portanto, da decomposição é apenas um vetor de coeficientes de aproximação e vários vetores de coeficientes de detalhes. O que se pode concluir desta descrição é que os detalhes são componentes de freqüências gradualmente mais altas do sinal e são obtidos filtrando-se com um filtro passa-altas ( $h_1(n)$ ); a aproximação são os componentes de mais baixa freqüência, obtidos com o filtro passa-baixas ( $h(n)$ ).

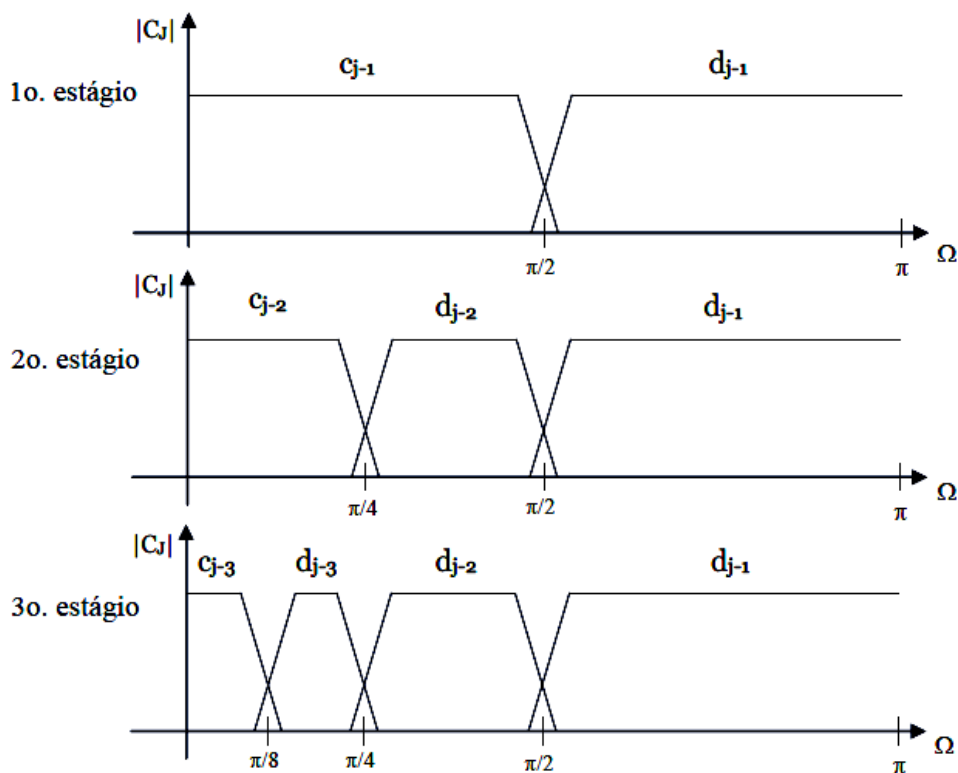


Figura 4. 9- Análise no domínio da freqüência.

Fonte: modificado de BURRUS, GOPINATH e GUO, 1998.

#### 4.1.1.5- APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET DISCRETA NA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE SINAIS ACÚSTICOS

A Transformada Wavelet Discreta é usada neste trabalho para extrair parâmetros de freqüência e tempo do sinal acústico. A figura 4.10 mostra um exemplo de sinal acústico amostrado a uma taxa de 2,5MHz.



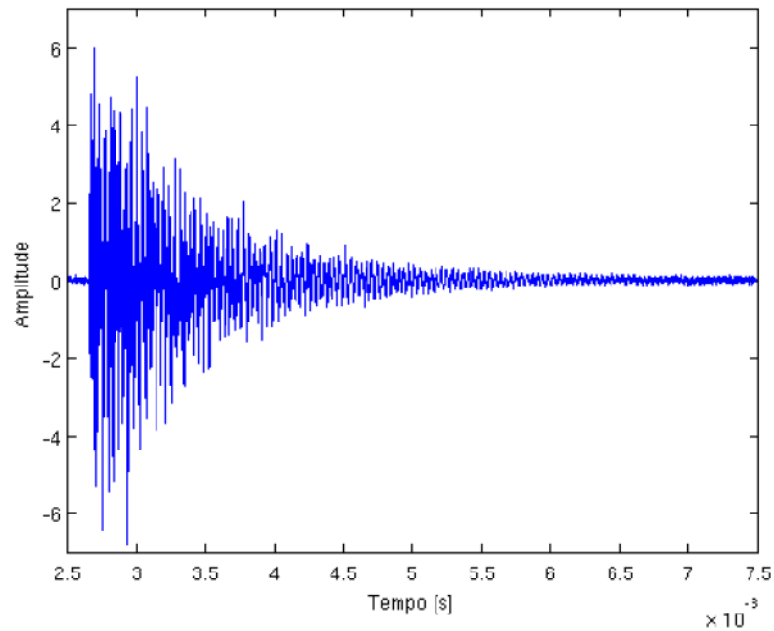


Figura 4. 10- Exemplo de sinal acústico.

A aplicação da Transformada Wavelet Discreta com 3 níveis de decomposição gera o resultado mostrada na figura 4.11. O primeiro gráfico, **d1**, é o nível de detalhe de mais alta frequência. Em seguida, vem o gráfico **d2**, um nível de detalhe intermediário. Por fim, tem-se o gráfico **a2**, a aproximação, que contém as mais baixas frequências do sinal. O último gráfico é o sinal original. Os parâmetros são extraídos dos detalhes e aproximação da seguinte forma: primeiro, eles são particionados no tempo; em seguida, para cada partição, são calculados seus valores de energia de sinal, conforme equação 4.16:

$$E = \sum_i x^2(i) \quad (4.16)$$

onde  $x(i)$  é a amostra de índice  $i$  do nível em questão.

O que se deve notar neste processo de extração de parâmetros é que cada nível de decomposição da Transformada Wavelet Discreta está relacionado a uma banda de frequência. Essa banda tem largura variável e é menor quanto maior for o nível de decomposição. Portanto, os parâmetros extraídos correspondem ao valor de energia de uma banda de frequência num determinado intervalo de tempo. As análises feitas neste trabalho podem produzir cerca de 100 parâmetros desse tipo para um único pulso acústico. Isto torna a sua interpretação muito difícil. Por este motivo, outra ferramenta matemática é usada para extrair informações úteis desses parâmetros: a Análise de Componentes Principais.

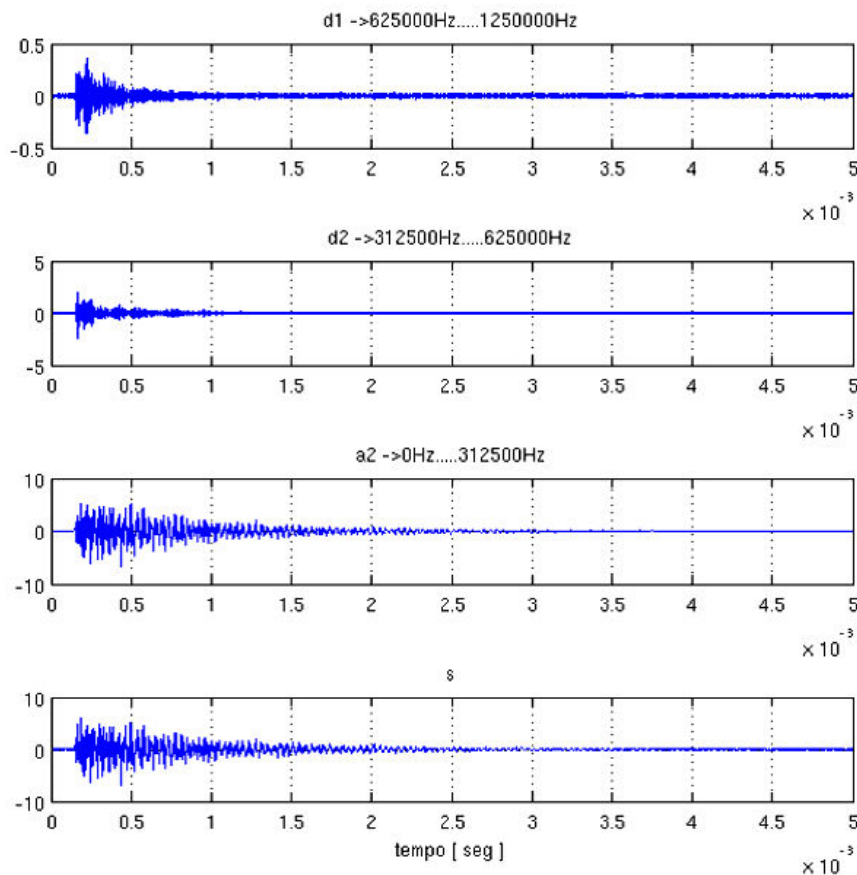


Figura 4. 11- Decomposição do sinal acústico da figura 10 em 3 níveis com a Transformada Wavelet Discreta.

## 4.2- ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A Análise de Componentes Principais é uma técnica estatística usualmente aplicada na identificação de padrões contidos em grandes conjuntos de dados. A maioria desses padrões não pode ser facilmente percebida numa análise superficial quando estão imersos num grande volume de informações. Além disso, o PCA pode não só destacar os padrões, mas também informar sobre o percentual de contribuição deles na formação dos dados originais (JOLLIFFE, 2002).

### 4.2.1- CONCEITOS BÁSICOS

#### 4.2.1.1- AUTOVETORES

Segundo Jolliffé (2002), pode-se entender um autovetor como um vetor de um caso especial da multiplicação de uma matriz quadrada por ele. Um vetor possui uma direção,

um sentido e uma magnitude definidos pela sua posição. Quando uma matriz multiplica (lado esquerdo) um vetor o resultado será outro vetor, porém, sua posição será modificada, alterando a direção, o sentido e a magnitude, resultando, portanto, numa transformação do vetor. No caso do autovetor, a transformação provocada pela multiplicação pela matriz será apenas na magnitude, pois a nova posição ainda manterá o sentido e a direção do vetor. Ou seja, será o mesmo que multiplicar o vetor por um escalar, por exemplo:

$$\begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \\ 8 \end{bmatrix} = 4 \cdot \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

É evidente, neste exemplo, que o sentido e a direção do vetor se mantiveram e apenas a magnitude foi aumentada em 4 vezes. Deve-se ter em mente que apenas alguns conjuntos de vetores podem ser autovetores e, obviamente, devem estar associados a uma matriz. O autovetor também é associado a um escalar (o autovalor) que nada mais é do que o valor que deslocou sua magnitude quando da multiplicação pela matriz de transformação. Também se deve saber que os múltiplos de um autovetor também são autovetores, todos sendo deslocados pelo mesmo autovalor associado, por exemplo:

$$\begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 6 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24 \\ 16 \end{bmatrix} = 4 \cdot \begin{bmatrix} 6 \\ 4 \end{bmatrix} = 4 \cdot 2 \cdot \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Isto implica na existência de um conjunto (ou família) de autovetores associado a um autovalor. O número de autovalores e de conjuntos de autovetores associados depende da dimensão da matriz de transformação.

Algumas propriedades de autovalores podem ser destacadas:

- somente matrizes quadradas possuem autovetores;
- para uma matriz  $n \times n$ , há  $n$  “famílias” de autovetores associados;
- escalonar um autovetor antes da multiplicação pela matriz resulta na nova posição também escalonada pelo mesmo valor (é o caso do escalonamento por 2 do exemplo anterior);
- expressa-se uma família de autovetores através de um autovetor de magnitude unitária e evita-se usar o termo família ou conjunto, mas apenas autovetor associado a um autovalor da matriz.

#### 4.2.1.2- AUTOVALORES

Um autovalor é aquele valor que desloca o autovetor quando este é multiplicado pela matriz correspondente. Os autovalores e autovetores aparecem em pares, ou seja, são associados entre si e determinados pela matriz. Assim, costuma-se dizer “os autovalores e os autovetores associados a uma matriz”. Se a dimensão da matriz é  $n \times n$ , então há, no máximo,  $n$  autovalores diferentes (pode haver autovalores repetidos) e autovetores associados.

#### 4.2.1.3-CONJUNTO DE DADOS

Há uma diferença no tratamento estatístico de conjuntos de dados amostrais e conjuntos de dados populacionais. Dados populacionais dizem respeito a todos os indivíduos de uma população. Ou seja, toda a informação está contida nestes dados, restando ao analista simplesmente extraí-las de lá. Conjuntos de dados amostrais correspondem a informações reunidas a partir de uma (normalmente pequena) parcela dos indivíduos de uma população. Apesar de não conter os dados de toda a população, se for bem escolhida a amostra, é possível fazer inferências sobre eles. Assim, os dados amostrais devem ser tratados de modo diferente dos dados populacionais, tanto no que diz respeito a interpretações de informações obtidas, quanto no próprio tratamento matemático. No caso do estudo da técnica PCA, quase sempre se tem conjuntos de dados populacionais e, na prática, deve-se tomar cuidado nos cálculos de desvio-padrão, variância e covariância, pois suas fórmulas matemáticas são diferentes para os dois tipos de conjuntos de dados.

#### 4.2.1.4-DESVIO PADRÃO

O desvio padrão, segundo Jolliffe (2002), é uma medida de quanto os dados estão espalhados entre si. Para compreendê-lo, pode-se compará-lo com a média dos dados. Esta medida (a média) é dada pela expressão 4.17:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.17)$$

A informação obtida pela média diz respeito apenas sobre um ponto médio dos dados. Ou seja, a amplitude e a forma como os dados variam entre si não é extraída desta medida. Isto significa que diferentes conjuntos de dados, uns mais espalhados do que outros podem possuir a mesma média.

O desvio padrão, portanto, oferece uma informação a respeito do espalhamento dos dados, pela equação 4.18:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4.18)$$

O dividendo  $n-1$  dentro da raiz quadrada tem essa forma para conjuntos de dados amostrais. Para dados populacionais, este dividendo seria apenas  $n$ . Esta expressão pode ser interpretada como a distância média do valor médio até um ponto. Quanto maior o desvio padrão, maior será o espalhamento dos dados.

#### 4.2.1.5-VARIÂNCIA

Segundo Jolliffe (2002), a variância é outra medida do espalhamento dos dados. Na prática, ela é simplesmente o desvio padrão elevado ao quadrado. Portanto, sua expressão é dada pela expressão 4.19:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (4.19)$$

#### 4.2.1.6-COVARIÂNCIA

Até o momento, foram abordadas três tipos de medidas (média, desvio padrão e variância) que apenas se aplicam a dados unidimensionais. Dados multidimensionais são dois ou mais tipos de informações extraídos de uma mesma amostra (ou população). Por exemplo, para a amostra de uma classe de alunos, pode-se tomar os seguintes dados: número de horas estudadas por dia e nota obtida na prova. Se a análise consiste em encontrar relações entre diferentes dimensões, as três medidas estudadas são inúteis (JOLLIFFE, 2002).

Assim, a covariância é uma medida de quanto os dados de uma dimensão variam com relação aos dados de outra dimensão. Ou seja, é uma medida de variância entre duas dimensões. A expressão matemática pode ser rapidamente deduzida da expressão da variância 4.20:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (X_i - \bar{X})}{n-1} \quad (4.20)$$

Para a variância entre duas dimensões, por exemplo,  $X$  e  $Y$ , tem-se a expressão 4.21:

$$\text{cov}(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (4.21)$$

Isto permite deduzir que a covariância de uma dimensão com ela mesma nada mais é do que a simples variância dos dados dessa dimensão. Também deduz que

$$\text{cov}(X,Y)=\text{cov}(Y,X).$$

A informação extraída com a covariância é interpretada da seguinte forma:

- o *valor* em si não é tão importante quanto seu *sinal*;
- um valor *positivo* indica que ambas as dimensões estão crescendo (ou decrescendo) juntas;
- um valor *negativo* indica que, enquanto uma dimensão cresce, a outra decresce;
- um valor *nulo* indica que as dimensões são independentes uma da outra.

#### 4.2.1.7- MATRIZ DE COVARIÂNCIA

Segundo Jolliffe (2002), a análise de dados de mais de duas dimensões utilizando-se medidas de covariância pode se tornar confusa. Assim, por questões de organização e padronização, as covariâncias calculadas para cada par de dimensões são colocadas numa matriz quadrada de modo que:

$$C^{n \times n} = [c_{ij} | c_{ij} = \text{cov}(\text{Dim}_i, \text{Dim}_j)] \quad (4.22)$$

As principais propriedades desta matriz são:

- a diagonal principal corresponde às variâncias das  $n$  dimensões;
- há simetria em torno da diagonal principal.

#### 4.2.2- DESCRIÇÃO DA TÉCNICA PCA

O primeiro passo é a organização dos dados na forma matricial. Isso deve ser feito de tal modo que cada coluna da matriz corresponda a um parâmetro e cada linha corresponda a uma observação ou experiência. Ou seja, cada sinal acústico produzirá parâmetros para uma linha desta matriz. Em muitos casos, pode ser interessante subtrair a média de todos os parâmetros na matriz.

Em seguida, é calculada a matriz de covariância a partir da matriz de dados. A partir da matriz de covariância, são obtidos os autovalores e autovetores. Os autovetores dessa matriz de covariância são chamados de componentes. Os autovalores associados informam a contribuição de cada componente na formação dos dados. Em geral, os programas

computacionais (como o Matlab) organizam os componentes em ordem decrescente de importância (contribuição na formação dos dados), deixando os componentes principais nas primeiras posições. Cada componente ou autovetor pode ser considerado um tipo de padrão presente nos dados. Uma característica muito importante desses autovetores é que eles são ortogonais entre si (JOLLIFFE, 2002).

Por fim, para encontrar os parâmetros relacionados a determinados padrões, são calculados os scores através da expressão 4.23:

$$\mathit{scores} = \left[ P * (M')^t \right] \quad (4.23)$$

onde  $P$  é a matriz de componentes principais e  $M$  é a matriz de dados. Se os componentes são vetores ortogonais representando padrões nos dados, os scores são as projeções dos dados originais naqueles vetores. Estas projeções representam quanto os parâmetros estão relacionados a um padrão específico indicado pelos autovetores (componentes).

#### 4.2.3-INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS ATRAVÉS DO PCA

A utilidade do PCA neste trabalho será a de encontrar o parâmetro ou comportamento de alguns parâmetros de sinais acústicos que indiquem a presença de um determinado contaminante em óleo de transformador. Para exemplificar isto, uma experiência simples é demonstrada. Duas amostras de óleo isolante idênticas, mas com níveis diferentes de umidade são testadas. A primeira amostra com 6,1 ppm de água e a segunda com 39,1 ppm. Em cada uma foram produzidas 30 emissões acústicas, cujos sinais foram capturados após atravessarem as amostras de óleo. Estes sinais foram processados com a Transformada Wavelet Discreta para a extração de 50 parâmetros de cada sinal.

Uma matriz de dados de dimensão 60x50 foi montada a partir dos parâmetros dos 60 sinais acústicos e processada com a técnica PCA. As trinta primeiras linhas são de parâmetros dos sinais provenientes do óleo com 6,1 ppm de umidade e as trinta seguintes, do óleo com 39,1 ppm. Neste caso, 50 padrões foram encontrados, mas apenas os três mais significativos contribuem com 97,8% da informação. Na figura 4.12, é exibido o primeiro componente principal (PC#1) e seus respectivos scores. O gráfico na parte de cima da figura 4.12 apresenta o PC#1 e tem dois padrões distintos. As barras com valores positivos e as barras com valores negativos. O scores (gráfico na parte inferior da figura 4.12 com valores positivos são relacionados ao padrão positivo, assim como os scores com valores negativos estão associados ao padrão negativo. Busca-se, aqui, por um padrão que separe as duas amostras de óleo. Neste caso, o PC#1 não tem utilidade.

Procurando entre os componentes principais, foi encontrado um que separe as amostras de óleo. A figura 4.12 apresenta, então, o terceiro componente principal (PC#3). Nele, pode-se ver claramente uma separação entre os trinta primeiros scores dos trinta seguintes. Cada um dos scores está relacionado a um dos sinais. O óleo de 6,1 ppm está relacionado ao padrão negativo, enquanto o óleo de 39,1ppm está associado ao padrão positivo. Portanto, os parâmetros do padrão positivo apresentados na figura 4.13 estão

associados a um maior teor de umidade. Eles podem ser investigados, de modo a se descobrir se alguns deles indicam, além da presença de umidade, sua quantidade, mesmo que relativamente. As figuras 4.12 e 4.13 ilustram a técnica de processamento dos sinais acústicos a ser utilizada. Outros aspectos dos experimentos ainda devem ser apresentados ao longo deste trabalho.

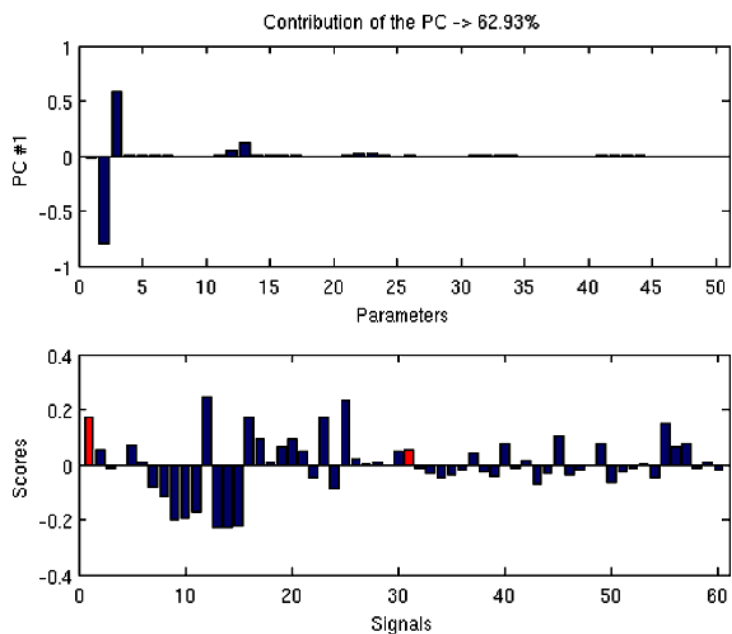


Figura 4. 12- Primeiro componente principal e seus respectivos scores.

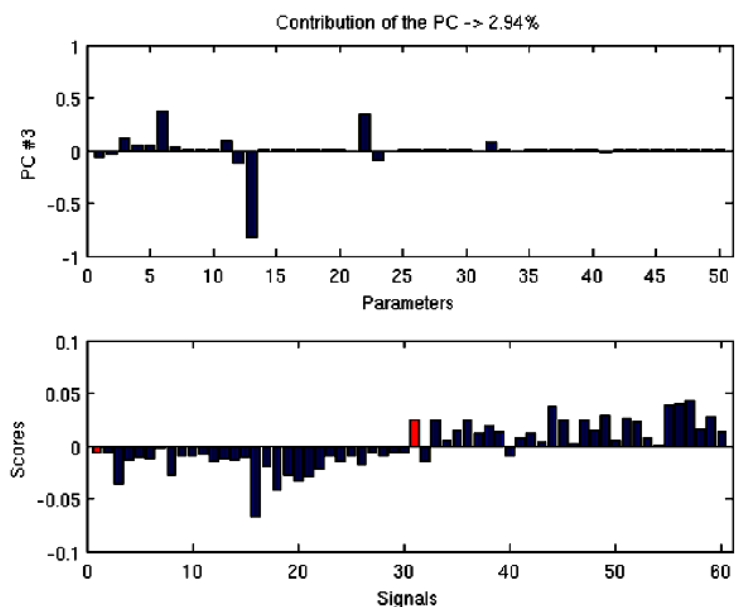


Figura 4. 13- Terceiro componente principal e seus respectivos scores.



## CAPÍTULO 5

### BANCADA DE ENSAIO A FLUXO CONTÍNUO PARA CONTAMINAÇÃO OU SECAGEM DE ÓLEO ISOLANTE

Esta bancada permite o condicionamento do óleo isolante para ser submetido ao processo de secagem ou contaminação por umidade, através de dois circuitos hidráulicos distintos.

O circuito de umidificação é dotado de entrada para umidificação externa, e para a secagem, o circuito possui filtro de umidade desenvolvido especialmente para atender as necessidades da pesquisa.

O óleo isolante trabalha confinado na bancada de ensaio, em circuito fechado, semelhante aos transformadores reais. A pressão de trabalho é a própria pressão atmosférica obtida com respiros desumidificadores, introduzidos quando necessário.

Nos processos de secagem ou contaminação, o óleo não sofre pressão nem depressão, evitando-se o fracionamento e volatilização de solvente e gases do produto. Portanto suas características físico-químicas são mantidas, exceto o teor de água. A temperatura de operação pode variar de 20°C até 85°C, através dos respectivos controladores de temperatura.

A figura 5.1 mostra o diagrama em blocos da bancada de ensaio a fluxo contínuo para contaminação ou secagem de óleo.

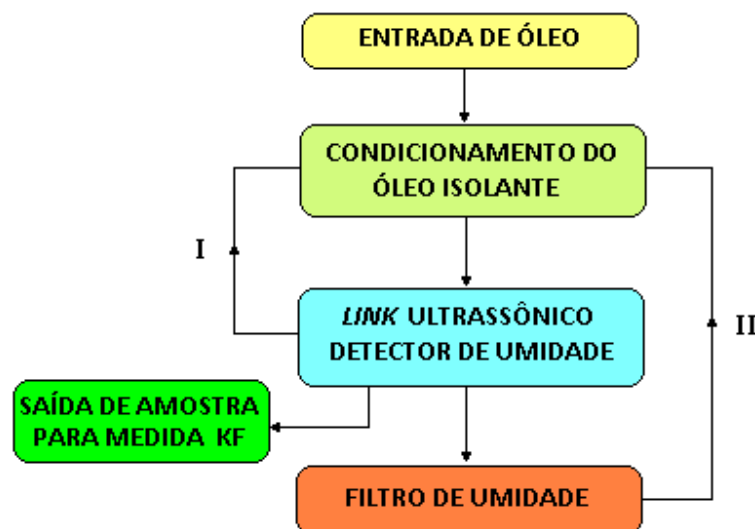
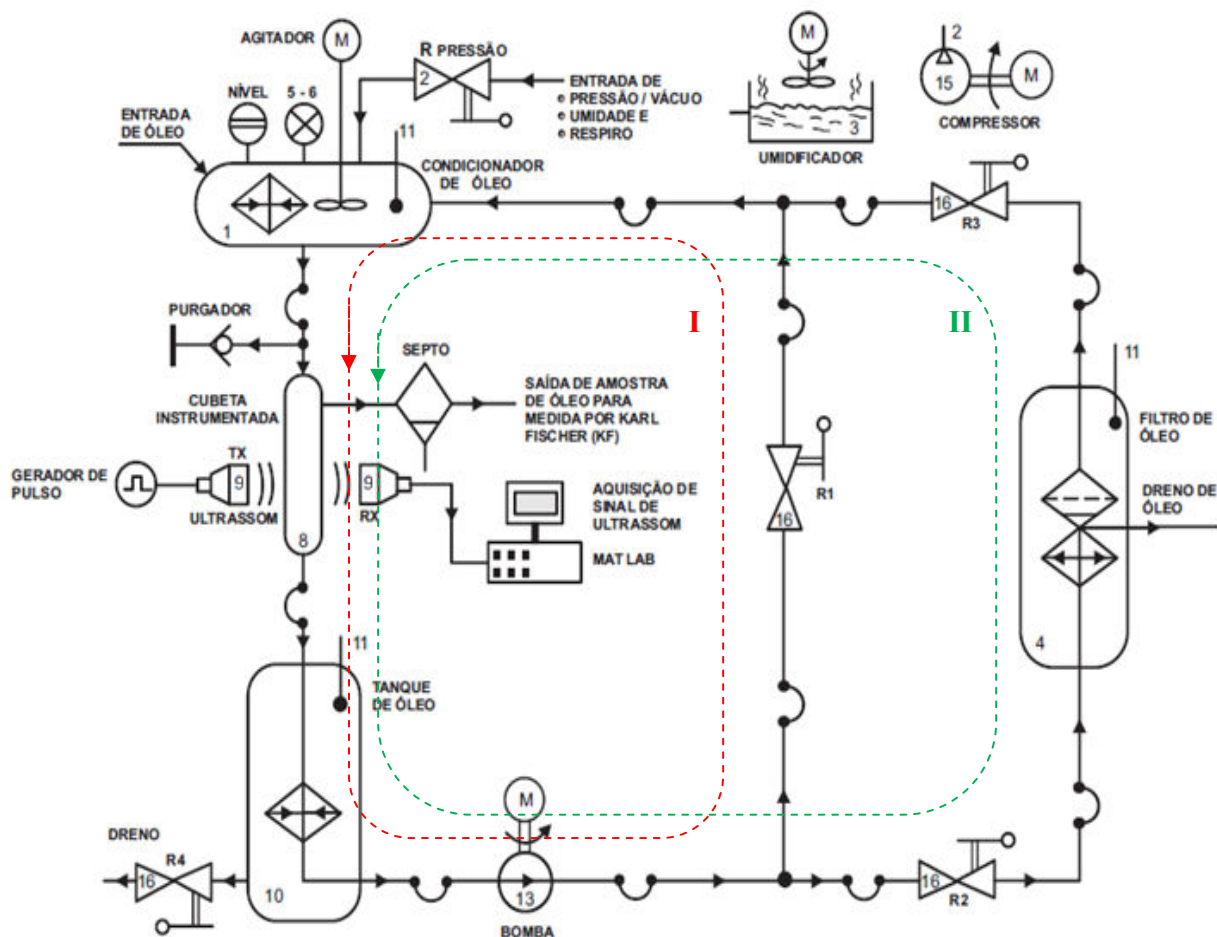


Figura 5. 1- Diagrama em blocos da bancada de ensaio a fluxo contínuo de óleo isolante.

A figura 5.2 mostra o diagrama hidráulico-pneumático da bancada de ensaio de umidificação ou secagem de óleo de transformador (I- circuito hidráulico de umidificação e II- circuito hidráulico secagem).



OPERAÇÃO	REGISTRO R1	REGISTRO R2	REGISTRO R3
UMIDIFICAÇÃO (I)	ABERTO	FECHADO	FECHADO
SECAGEM (II)	FECHADO	ABERTO	ABERTO

## LEGENDA

### I- CIRCUITO HIDRÁULICO DE UMIDIFICAÇÃO;

### II- CIRCUITO HIDRÁULICO SECAGEM;

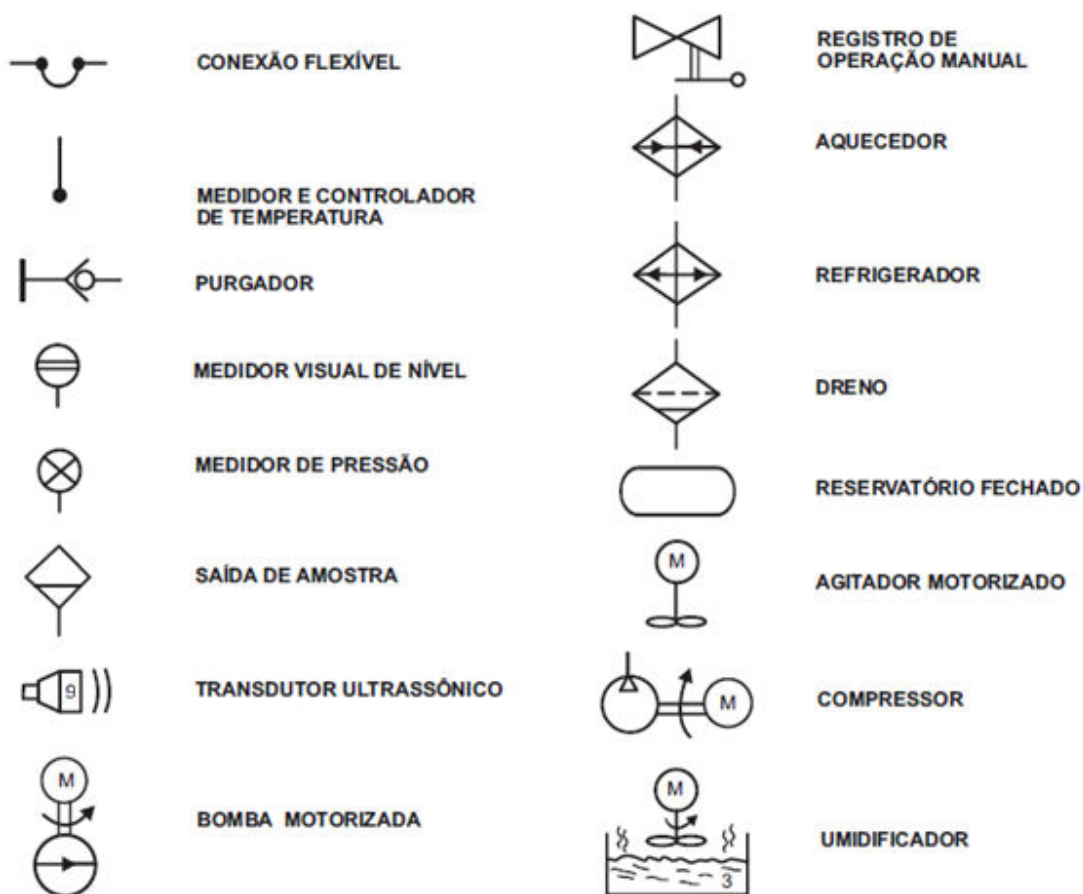
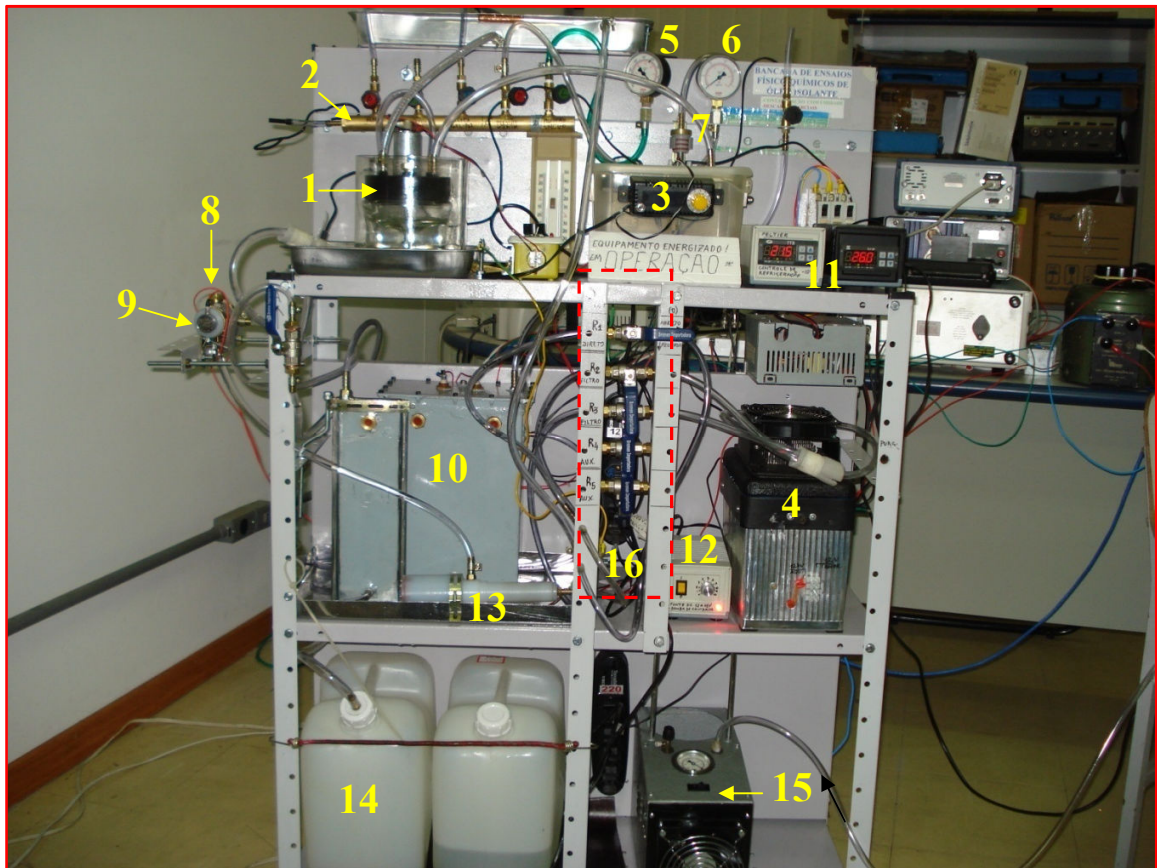


Figura 5. 2- Diagrama hidro-pneumático da bancada de ensaios de umidificação ou secagem de óleo.

A figura 5.3 mostra a foto da bancada de umidificação ou secagem do óleo isolante, com os módulos básicos (equipamento desenvolvido e implementado no Laboratório de Análise Preditiva LAP/UNIFEI).



**Legenda:**

- 1- Reservatório de condicionamento do óleo (secagem ou umidificação) equipado com agitador, aquecedor, poço de medição e controle de temperatura e conexões espigadas de 1/4" para a entrada /saída de óleo e entradas auxiliares para a umidificação e outros procedimentos;
- 2- Registros distribuidores de pressão, medição através do vacuômetro (5) e manômetro (6) e respiro (7);
- 3- Umificador com fluxo de ar com vazão aproximada de 1 ug de H<sub>2</sub>O / hora;
- 4- Filtro de umidade do óleo;
- 5- Vacuômetro tipo Bourdon, escala de 0 a -1 Kg /cm<sup>2</sup>;
- 6- Manômetro tipo Bourdon, escala de 0 a 1 Kg /cm<sup>2</sup>;
- 7- Respiro com filtro de umidade do ar usando sílica gel;
- 8- Cubeta cilíndrica(22ml) instrumentada por ultrassom para a detecção da contaminação do óleo por umidade;
- 9- Link transdutores ultrassônicos transmissor/receptor;
- 10- Tanque de óleo com condicionamento térmico;
- 11- Medidor/ controlador microprocessado da temperatura do filtro de umidade (4) do óleo;

**12- Controle de vazão da bomba de óleo (13);**

**13- Bomba de circulação óleo tipo cavidade progressiva com vazão máxima de 2 l/minuto -tensão -24 v / 0,5 A;**

**14- Reservatórios coletores de óleo para proteção do meio ambiente. Guarda o expurgo de óleos provenientes de manipulações, vazamento captados pelas bandejas coletoras suporte dos processos;**

**15- Compressor de ar tipo diafragma e palheta com vazão de 0,1 pés cúbicos por minuto, pressão máxima 1,1 Kg /cm<sup>2</sup> com saída de pressão ou vácuo;**

**16- Registros de operação (R1 a R5). Selecionam o circuito que o óleo percorre para secagem ou umidificação. São registros de operação manual, tipo esfera de alta precisão para garantir baixa perda de carga e vedação total;**

Figura 5. 3- Bancada de ensaios de umidificação ou secagem de óleo de transformador.

Nesta bancada, o filtro de umidade opera com temperaturas próximas de 4°C que, em seguida, é aquecido para retornar ao circuito na temperatura de processo. O circuito de secagem é importante para condicionar o óleo com teor de umidade inicial desejado no ensaio. A temperatura do óleo no ensaio é controlada com um controlador microprocessado, onde a sonda é instalada bem próxima da cubeta de óleo instrumentada por ultrassom (8) para a detecção de umidade. Essa cubeta tem formato cilíndrico e instrumentada com um link ultrassônico transmissor e receptor em acoplamento longitudinal.

A figura 5.4 mostra detalhes do reservatório de condicionamento de óleo (1), aquecimento e agitação. No fundo do reservatório está conectada a saída de óleo para a cubeta instrumentada por ultrassom , poço de medição e controle de temperatura.



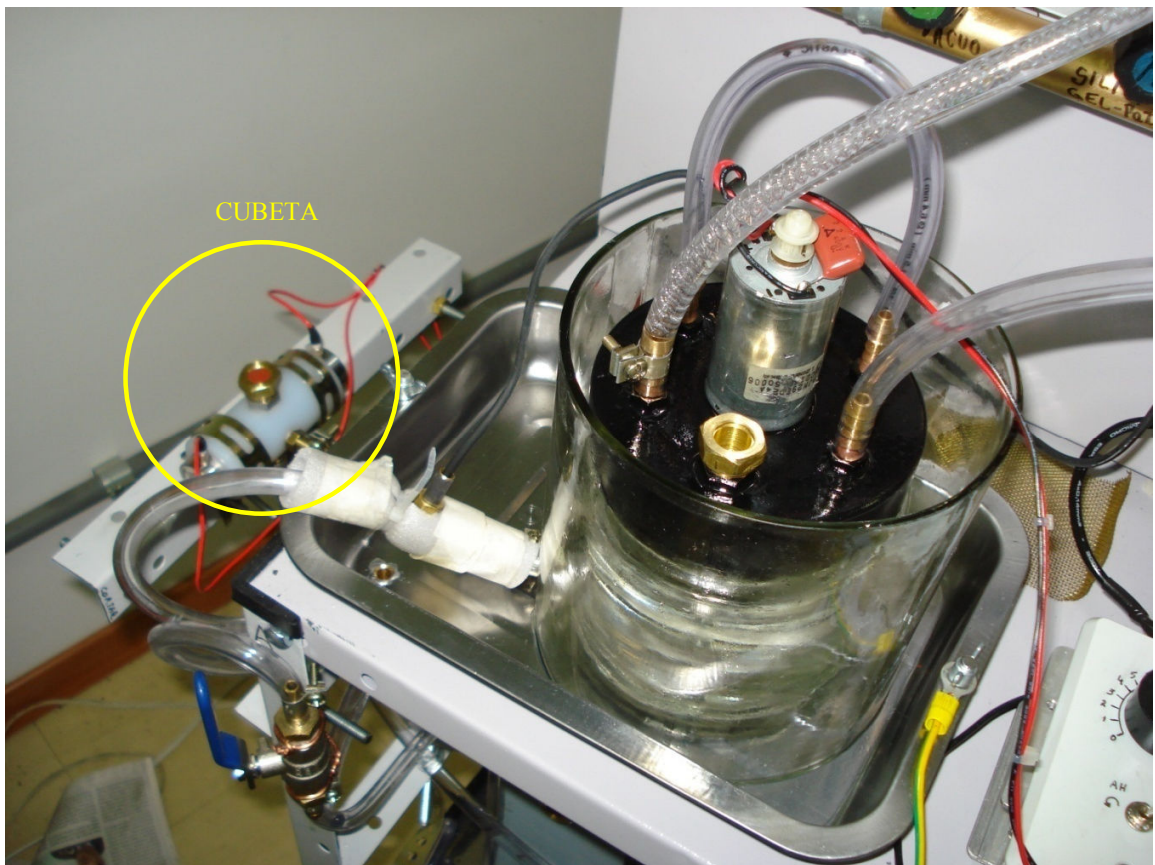


Figura 5. 4- Reservatório de condicionamento de óleo e cubeta instrumentada por ultrassom para aquisição do sinal de umidade.

A figura 5.5 mostra a cubeta instrumentada para a detecção do sinal de umidade. A esquerda está instalado o transmissor ultrassônico e a direita o receptor com respectivos conectores e cabos vermelhos de excitação e saída de sinais elétricos respectivamente. O óleo ensaiado entra na frente da cubeta e sai por baixo para manter o fluido em movimento. Acima se encontra o septo de silicone usado para a pipetagem de óleo com agulha cirúrgica e seringa descartável, para medida por Karl Fischer. Esse dispositivo de saída de amostra minimiza a contaminação com umidade do ar.

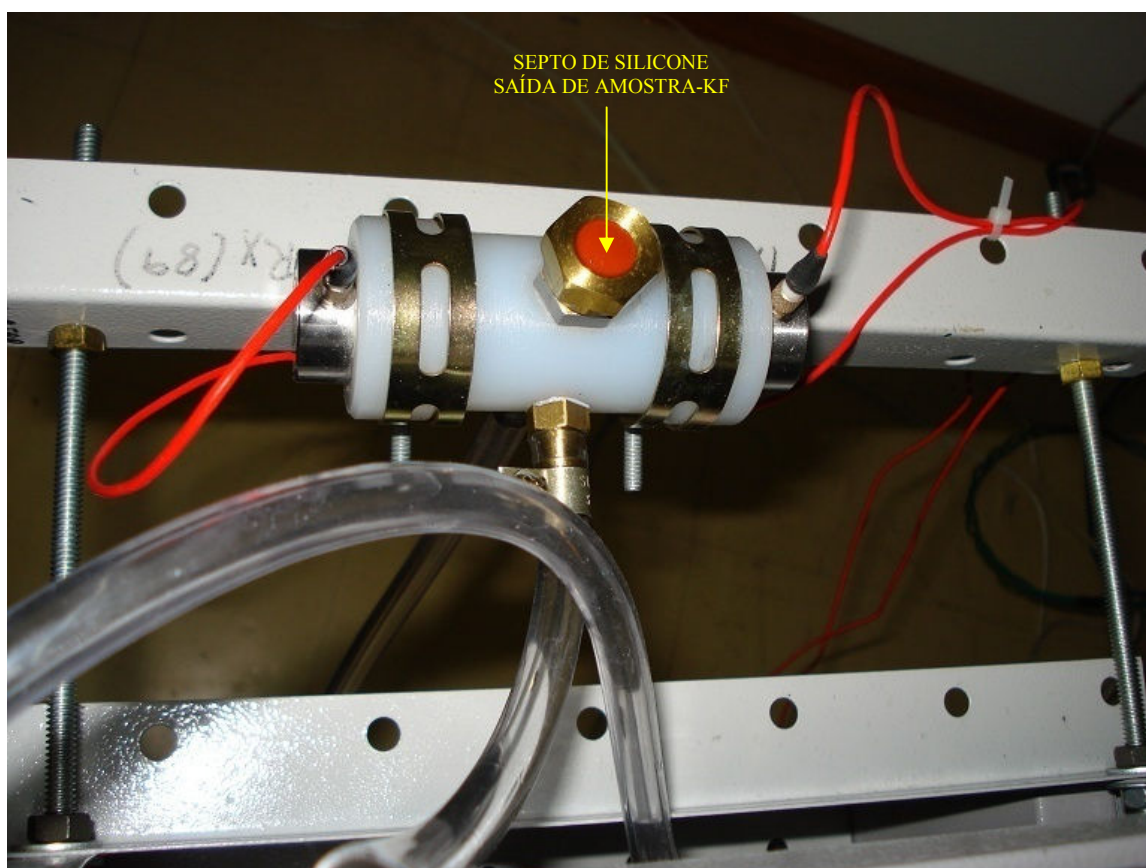


Figura 5. 5- Cubeta instrumentada por ultrassom para aquisição do sinal de umidade do óleo isolante.

## 5.1- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

**-Medidor de Teor de Umidade Coulométrico de Karl Fischer modelo C20 Mettler Toledo**

Utilizado como medidor padrão de umidade em ppm do óleo isolante nos ensaios de contaminação por umidade (figura 5.6)



Figura 5. 6- Medidor de Teor de Umidade Coulométrico de Karl Fischer modelo C20.

**-Osciloscópio digital Tektronix modelo TDS2024-200MHz 4 canais**

Usado para ajustes dos amplificadores e filtros de sinais.

**-Gerador de funções BK (Sweep Function Generator Bk Precision) modelo BK 4045  
Amplificador diferencial Tektronix (Diferencial Amplifier Tektronix) modelo 504/  
Plug in model AM502 -2 unidades**

Usado em configuração modo comum para pré-amplificar os sinais de pulso dos transdutores transmissor e receptor.

**-Módulo amplificador de potência transistorizado banda larga**

Utilizado para amplificar o sinal de entrada do transmissor ultrassônico, aumentando a relação sinal/ruído

**-Módulo de conectores Sindal /BNC (Análogo interface -National Instruments Sensor) modelo BNC 2110**

Módulo adaptador de cabos sinal par trançado para cabos coaxial em aquisição de dados.

**-Pré-amplificador diferencial para sensores acústicos (Diferencial Preamplifier Physical acoustics Corporation) modelo AM 246**



Usado como pré-amplificador dos sinais elétricos transduzidos das ondas acústicas no receptor ultrassônico. Ganhos 20/40/60dB.

**-Módulo de aquisição de dados (National Instruments) modelo NI PXI-8331 e Placa de aquisição de dados 8 canais multifunção I/O (National Instruments) modelo NI PXI 6133-2,5MHz**

Equipamento destinado para fins de aquisição e processamento, 14 bits, saída -10 a +10V com 8 canais simultâneos e independentes e 2,5 MHz de amostragem.

**-Microcomputador PC com Software Matlab Versão 6.5**

Função de tratamento de sinais de ondas ultrassônicas.

**-Controlador- medidor microprocessado de temperatura, COEL modelo T1Y28H sondas tipo NTC (-50°C a 109°C)**

**-Balança analítica para pesagem da amostra de óleo a ser medido o teor de umidade por Karl Fischer modelo Excellence Plus XP Mettler Toledo.**

A figura 5.7 mostra o sistema de aquisição de dados a partir dos sinais analógicos contendo a informação de umidade do óleo isolante.

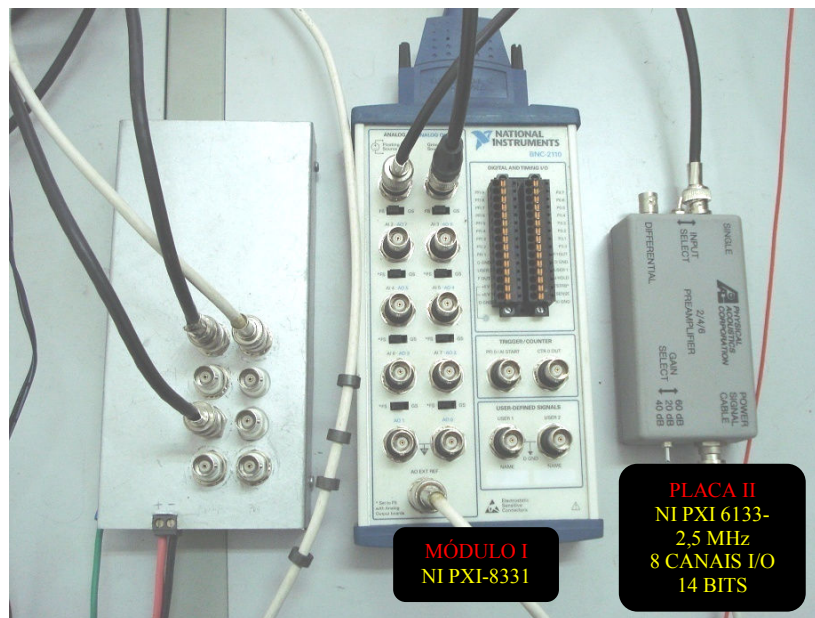


Figura 5. 7- Sistemas de aquisição de dados da National Instruments.

## 5.2- EXPERIMENTOS DE CONTAMINAÇÃO DO ÓLEO ISOLANTE

Nos experimentos para detecção de umidade, o óleo isolante passa sem turbulência na frente de um link ultrassônico, instalado em uma cubeta cilíndrica. Os transdutores ultrassônicos, transmissor e receptor, estão alinhados axialmente e ajustados a uma distância de 50 mm para os experimentos. O impulso de ultrassom, em onda quadrada de 5 Vpp e 150 Hz, gera uma onda de pressão acústica no óleo isolante e a água presente no óleo, causa uma dispersão acústica. Após transduzida no receptor, aquisitada e processada, revela o teor de umidade, contido nas várias formas, no óleo.

A figura 5.8 mostra o diagrama em blocos do sistema experimental para umidificação ou secagem do óleo.

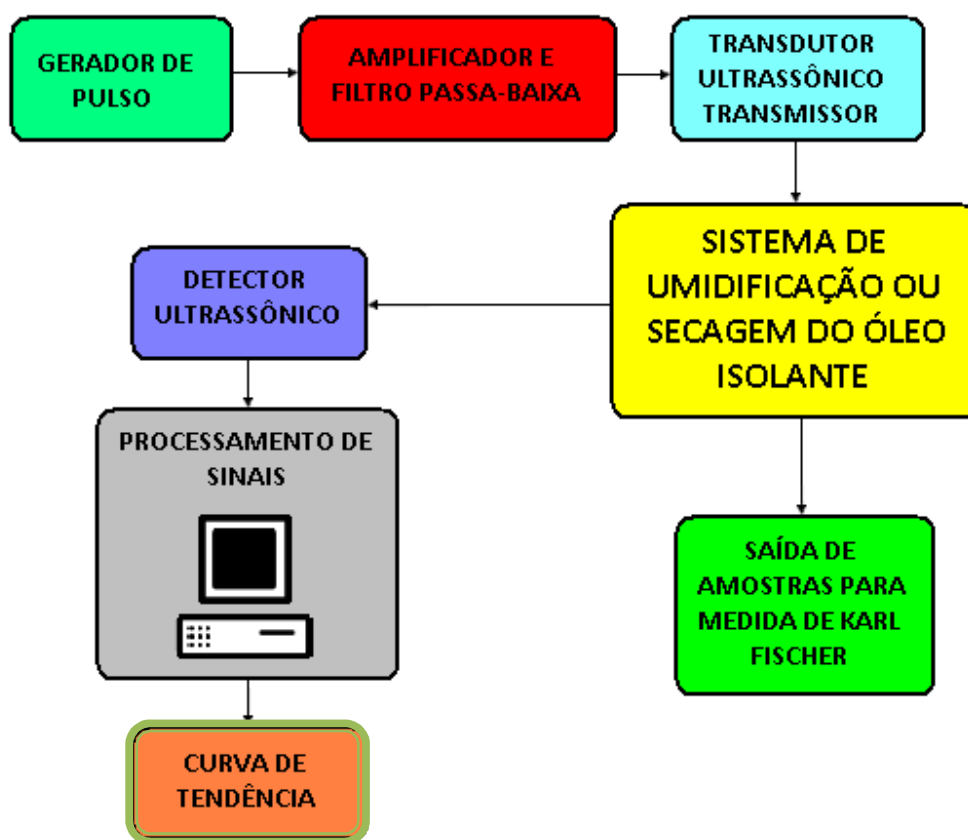


Figura 5. 8- Diagrama em blocos do sistema de umidificação ou secagem do óleo isolante.

### **5.3- PROCEDIMENTOS DE ENCHIMENTO E PREPARO DA BANCADA DE ENSAIOS DE CONTAMINAÇÃO OU SECAGEM DE ÓLEO NYNAS( 4000A).**

No início do processo, os registros manuais R1, R2 e R3 são abertos, conforme o circuito hidráulico da figura 5.1, representados pelos registros tipo (16). A bancada é enchida com óleo úmido a ser ensaiado, através do reservatório (1) de condicionamento de óleo e ligar a bomba (13), ajustando a vazão na posição do dial (6).

Através das mangueiras transparentes de conexão, acompanha-se visualmente o enchimento das partes da bancada, observando o aparecimento de bolhas de ar que são eliminadas com auxílio dos drenos e purgadores instalados. Quando o reservatório (1) estiver a  $\frac{3}{4}$  do seu nível máximo, é preciso fechar a tampa tipo encaixe rápido, conectada ao tubo de pressão (2) e ligar o compressor de ar (15), abrir o registro do manômetro, medir a pressão do manômetro (6) e ajustar o compressor de ar para  $0,3\text{Kg}/\text{cm}^2$ .

Com o auxílio dos purgadores e drenos, é necessário eliminar todas as bolhas de ar (espuma), desligar o compressor de ar (15) e completar o óleo se necessário. É melhor iniciar com operação de secagem, pois não se consegue encher a bancada com óleo seco sem que ocorra a contaminação no processo de enchimento.

Além das partes vistas na figura 5.2 e relacionadas, vários outros dispositivos e medidores são usados como auxiliares nos ensaios, tais como: válvulas e registros purgadores, sangria, expurgo de bolhas de ar, termômetros entre outros. As tubulações são de mangueira plástica de  $\frac{1}{4}$ " siliconizada e suportam  $2\text{ Kg}/\text{cm}^2$  de pressão ou vácuo. São transparentes, permitindo a inspeção visual da circulação do óleo e a formação de bolhas de ar inimigas da medição ultrassônica.

#### **5.3.1- SECAGEM DO ÓLEO**

A bancada é cheia com óleo isolante NYNAS 4000A, conforme tabela 5.1. O registro R1 (16) é fechado e os registros R2 e R3 (16) são abertos conforme indicados no circuito hidráulico da figura 5.1. O controlador de temperatura (11) é programado para: o reservatório (1) na temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e filtro de óleo (4) para  $10^\circ\text{C}$ . O agitador magnético de óleo situado na base do reservatório (1) é ligado e ajustado para a posição "3". Todos os registros de comando (2) são fechados, exceto o respiro de sílica gel (7). A bomba (13) é ligada e ajustada na posição "2" com vazão inferior a  $0,2\text{ l/hora}$ . A otimização da agitação e vazão do óleo, com temperaturas controladas garantem secagem do fluido.

Na cubeta instrumentada (9) com transdutor /receptor, são adquiridos 10 sinais, que são armazenados no Matlab. No septo, instalado na parte superior da haleta (9), as amostras são coletadas com o auxílio de seringa e agulha a  $3\text{ cm}^3$  e medidas no coulômetro de Karl Fischer os respectivos teores de umidade. No processo de secagem, o óleo é confinado no circuito hidráulico para evitar interferência de contaminação do ambiente. A temperatura do laboratório é mantida a  $25^\circ\text{C}$  e a umidade relativa do ar em 70%.

Este sistema de secagem de óleo, basicamente, utiliza um filtro de seletividade molecular, operando na pressão atmosférica com respiro em sílica gel (7), semelhante ao usado na maioria dos transformadores. Essa técnica retém a água livre ou dissolvida no óleo até a saturação. Como o óleo não é submetido a vácuo e a filtragem é feita em baixa temperatura ( $10^\circ\text{C}$ ) e mantida a  $25^\circ\text{C}$  e baixa vazão no circuito hidráulico fechado, o óleo terá sua composição preservada, não removendo os seus inibidores naturais ou sintéticos e gases dissolvidos, não interferindo no diagnóstico das análises de cromatografia gasosa.

Para a secagem de óleo usados e contaminados com fibra de celulose (borra), é necessário, antes do filtro de seletividade molecular, ser introduzido filtros micrométricos de partículas, desnecessários neste trabalho, pois usamos somente óleo novo (25ppm).

Tabela 5. 1- Composição química básica do óleo isolante NYTRO 4000A de fabricação NYNAS.

<b>Composto químico</b>	<b>Valor típico %</b>	<b>Método de ensaio</b>
<b>C a- aromáticos</b>	<b>8,1</b>	<b>ASTM D2140</b>
<b>C p- parafínico</b>	<b>59,8</b>	<b>ASTM D2140</b>
<b>C n- naftênico</b>	<b>32,2</b>	<b>ASTM D2140</b>

Fonte: ALSTOM, T & D LTDA., 2009.

### **5.3.2-UMIDIFICAÇÃO DO ÓLEO**

Após a secagem do óleo com a bancada cheia e óleo com baixo teor de umidade, é feita a aquisição do sinal com o Matlab e medida a umidade por Karl Fischer para iniciar a contaminação. O registro R1 é aberto e são fechados os registros R2 e R3, conforme a figura 5.1, referência para as demais indicações do texto. A temperatura de umidificação do óleo é programada para o valor desejado, por exemplo em 25°C, através do controlador (11). A bomba de vazão (13) é ligada, ajusta-se para 6 l/hora posição "9" e o agitador de óleo (1) é ajustado para a posição "3". A mangueira do umidificador (4) no reservatório é conectada (1) e inicia-se contaminação do óleo.

Em intervalos de tempo regulares, é feita a aquisição de dez sinais de ultrassom e armazenados no Matlab. Em seguida, é retirada, com uma seringa descartável, de 5 ml do septo (8) e medido no coulômetro de Karl Fischer, o respectivo teor de umidade. Para garantir confiabilidade nas medidas de KF, o procedimento é repetido, de acordo com a norma.

## CAPÍTULO 6

### PROCESSAMENTO DO SINAL ACÚSTICO PARA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Os parâmetros usados para detecção de umidade no óleo isolante são valores de energia (em p.u.) de partições dos pulsos acústicos delimitadas no tempo e na frequência. (VELOSO, 2011). O princípio por trás destes parâmetros é perceber a variação da distribuição da energia na frequência e no tempo conforme o teor de umidade varia. É, portanto, uma forma de detectar o efeito da dispersão acústica causada pela presença de água no óleo isolante.

#### 6.1- PRÉ-PROCESSAMENTO

Os sinais coletados são compostos de certo número de pulsos acústicos (figura 6.1). Assim, o primeiro passo no tratamento destes sinais é extrair cada um dos pulsos. Um algoritmo baseado na detecção do envelope do sinal é aplicado e o resultado são sinais como o da figura 6.2.

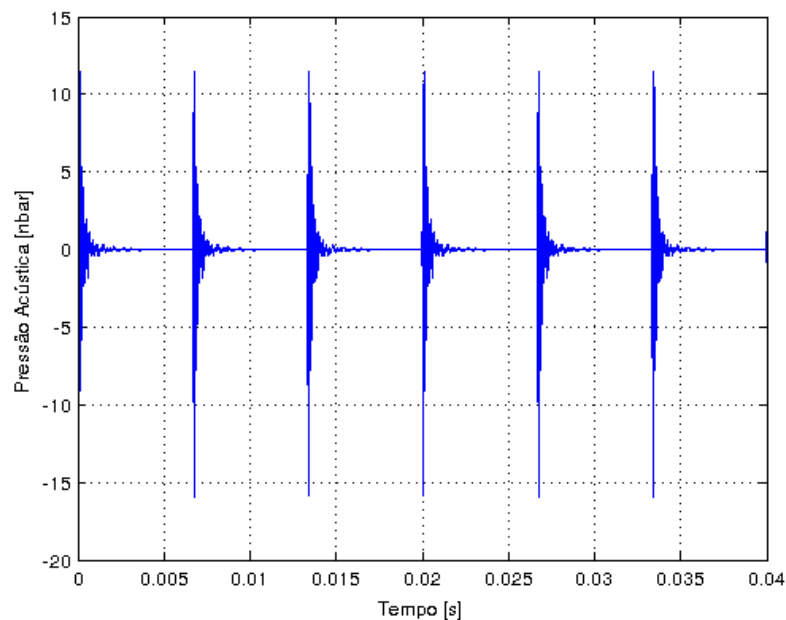


Figura 6. 1- Sinal acústico obtido nos ensaios.

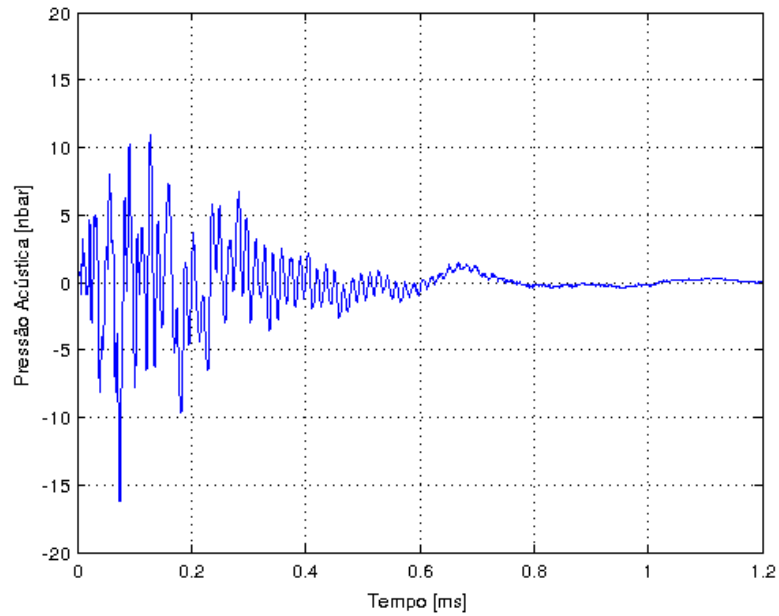


Figura 6. 2- Pulso extraído do sinal acústico.

Os pulsos extraídos são, em seguida, normalizados de modo que sua energia seja unitária. Esta operação é feita multiplicando-se cada amostra do sinal pelo inverso da raiz quadrada do seu valor de energia, o que não altera a forma de onda, como pode ser visto na figura 6.3, que é o mesmo pulso mostrado na figura 6.2, porém, normalizado.

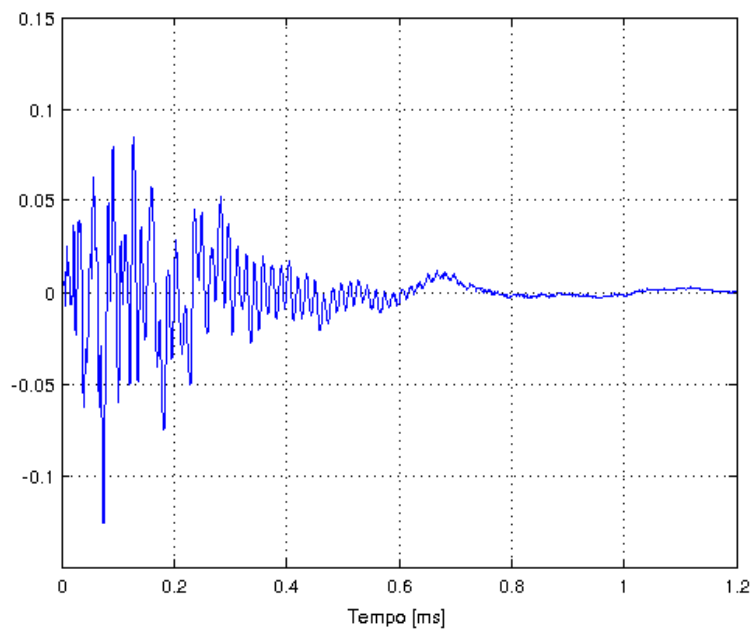


Figura 6. 3- Pulso normalizado.

## 6.2- DECOMPOSIÇÃO NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA POR TWD

Uma vez extraídos, os pulsos são decompostos com a Transformada Wavelet Discreta em nove níveis de detalhes e um de aproximação. Cada um dos dez níveis da decomposição Wavelet são divididos em dez intervalos de tempo, formando o que será chamado de partição espectro-temporal.

Os parâmetros correspondem ao valor de energia de cada partição espectro-temporal, conforme figura 6.4.

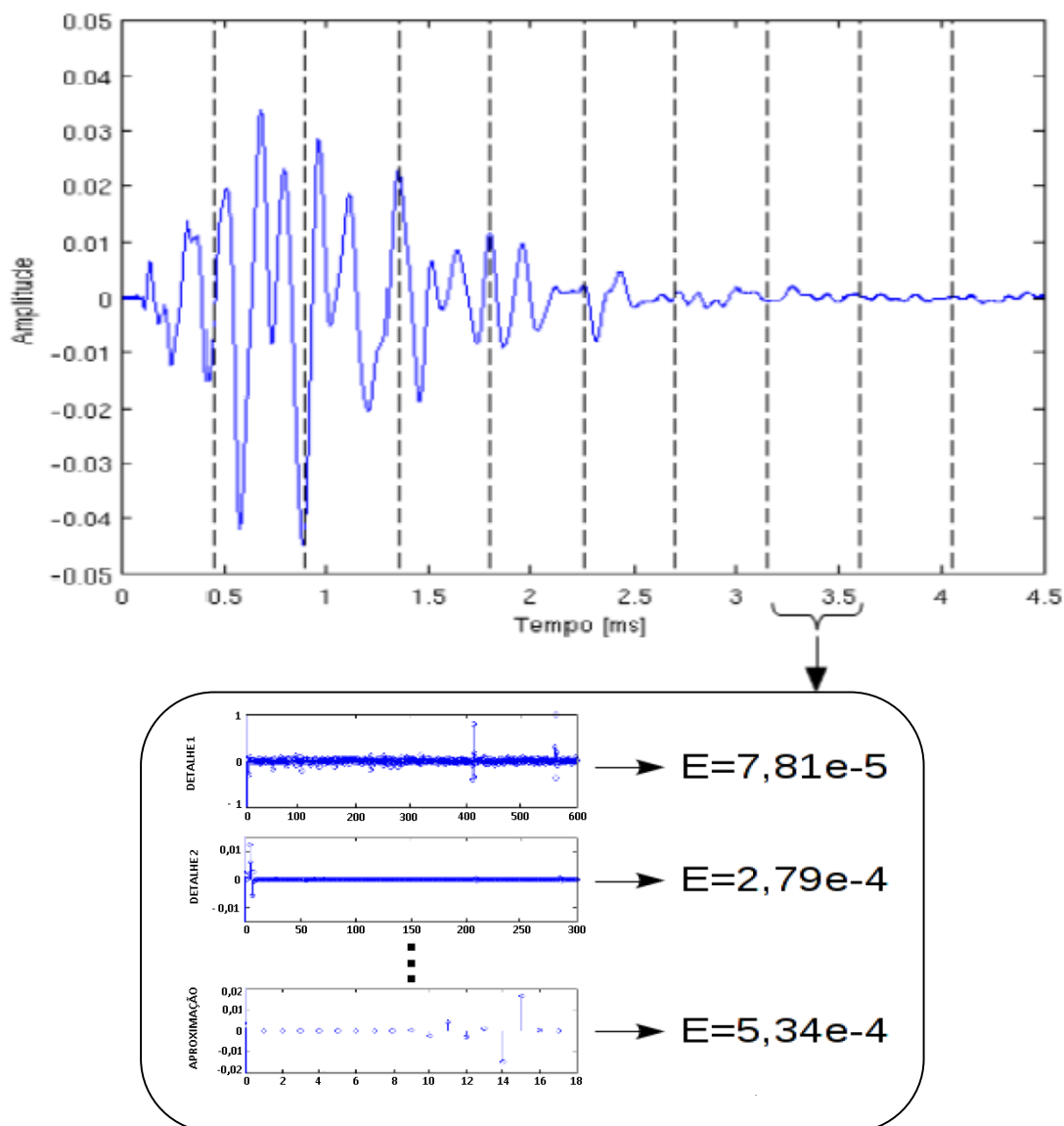


Figura 6. 4- Ilustração da forma de cálculo dos parâmetros.

Fonte: VELOSO, 2011.

### 6.3- SELEÇÃO DO PARÂMETRO

Para se encontrar um parâmetro sensível à variação de umidade, utiliza-se a Análise de Componentes Principais (PCA) da mesma maneira utilizada no capítulo 4.

Segundo Veloso (2011), em cada experimento, dois conjuntos de parâmetros são comparados, um conjunto proveniente de pulsos que percorreram uma amostra de óleo mais úmida e um conjunto proveniente de pulsos que atravessaram uma amostra de óleo mais seca. Trata-se de uma variação do procedimento apresentado utilizando emissão de pulsos acústicos no lugar de descargas parciais. Os resultados do PCA de cada par de conjuntos devem apontar para um ou mais parâmetros indicadores de umidade no óleo isolante.

Os pares de conjuntos de parâmetros utilizados são provenientes de amostras de óleos com os teores de umidade mostrados na tabela 6.1. A figura 6.5 ilustra o resultado do PCA do primeiro par de conjuntos da tabela 6.1. Nele, pode-se observar que o parâmetro de número 16 (primeira partição de tempo, nível 5 de detalhe, banda 39,062 kHz a 78,125 kHz) tem predomínio nos pulsos do óleo mais úmido. Para os pulsos do óleo mais seco, destaca-se o parâmetro 25 (segunda partição de tempo, nível 6 de detalhe, banda 19,531kHz a 39,062kHz). Um resumo dos parâmetros encontrados é apresentado na tabela 6.2.

Tabela 6. 1- Teores de umidade das Amostras de Óleo utilizadas para seleção de parâmetros

<b>Conjunto</b>	<b>Teor de umidade da amostra 1 [ppm]</b>	<b>Teor de umidade da amostra 2 [ppm]</b>
1	101,47	14,97
2	55,30	18,37
3	53,57	17,23
4	105,33	44,47
5	25,37	10,63
6	92,23	17,23
7	102,23	54,87
8	35,20	18,93



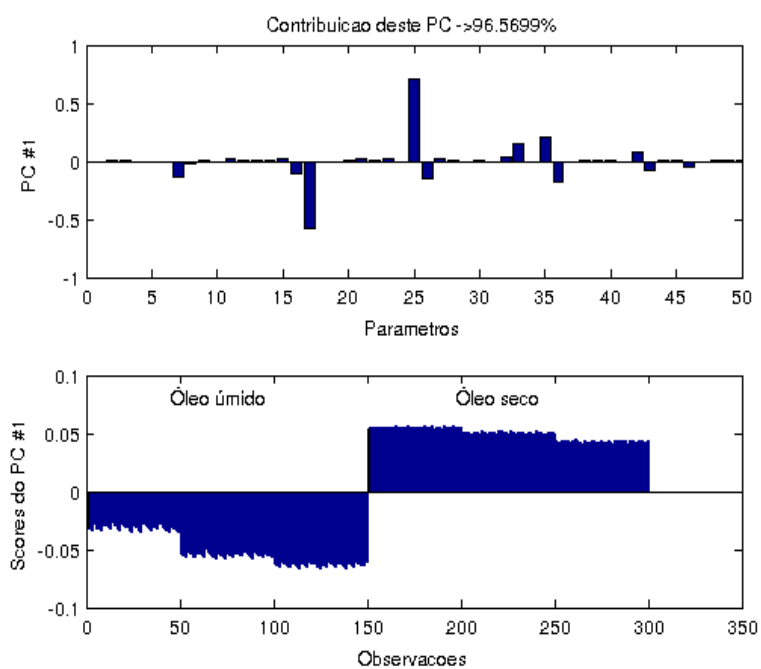


Figura 6. 5- Resultado do PCA do primeiro conjunto da tabela 6.1.

Tabela 6. 2- Parâmetros selecionados como indicadores de teor de umidade.

<b>Conjunto</b>	<b>Parâmetro para óleo mais úmido</b>	<b>Parâmetro para óleo mais seco</b>
1	16	25
2	16	25
3	17	25
4	17	25
5	16	25
6	16	25
7	36	25
8	17	25

Como se vê na tabela 6.2, o parâmetro 25 aparece de forma mais constante que os demais parâmetros. Assim, este será o parâmetro escolhido para os testes de curva de tendência de umidade.

## **CAPÍTULO 7**

### **RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

#### **7.1- PREPARO DA BANCADA DE ENSAIOS**

Para a realização do ensaio de contaminação do óleo isolante, iniciamos com os procedimentos descritos no capítulo 5, itens 5.3, 5.3.1 e 5.3.2, que descrevem o enchimento, secagem e em seguida a umidificação. A operação de secagem é necessária para se definir o valor inicial do teor de umidade desejado para o ensaio.

#### **7.2- CONSIDERAÇÕES SOBRE O ÓLEO ENSAIADO E REGIME DOS ENSAIOS**

Nos experimentos ensaiamos basicamente o óleo novo NYTRO 4000A Naftênico em condições de temperatura ambiente de 25°C e pressão atmosférica, para garantir as características físico-químicas do óleo. A temperatura, a agitação, o fluxo de ar e o tempo, aumentam o teor de umidade do óleo.

Nos ensaios experimentais, não pode ocorrer turbulência no óleo, pois ela invalida a transdução ultrassônica. A cubeta instrumentada deve ser observada através de suas conexões transparentes. Caso apareça micro bolhas de ar, devem ser tomadas as providências necessárias para eliminá-las.

#### **7.3- EXPERIMENTO DE CONTAMINAÇÃO DO ÓLEO PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE TENDÊNCIA DE UMIDIFICAÇÃO**

A bancada cheia com óleo novo a 30,5 ppm medido por KF, iniciou o procedimento de secagem até se obter 17,9 ppm (KF), tomado como valor de teor de umidade inicial. A curva de tendência de umidificação é mostrada na figura 7.1. A umidificação iniciou-se às 11:00 do dia 21/06/12, em operação de medidas automáticas com intervalo de medida e aquisição a cada 30 minutos. O valor inicial de -0,40 pu amplitude do parâmetro de umidade. Após 188 horas, final do ensaio, obteve-se -0,35 pu de umidade e 28,7 ppm no coulômetro de Karl Fischer, na data de 29/06/12. O "setup" de umidade segue em figura 5.1.

## TENDÊNCIA 1

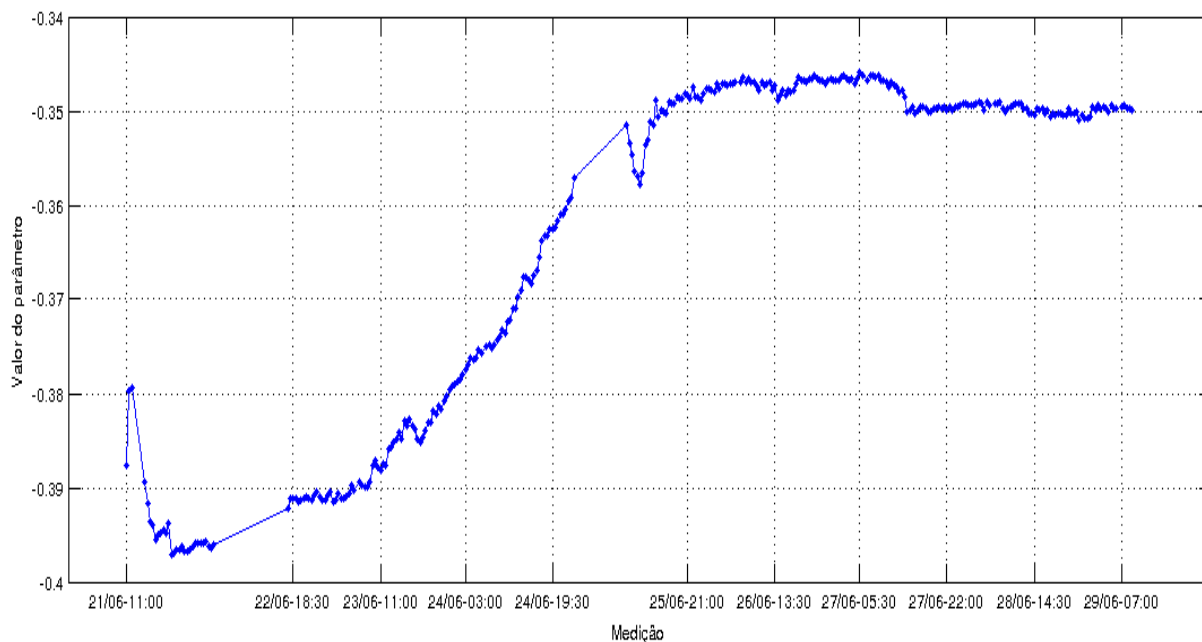


Figura 7. 1- Curva de tendência de contaminação por umidade do experimento realizado com óleo isolante novo de 21/06/12 a 29/06/12 (T= 25°C).

### 7.4- EXPERIMENTO DE SECAGEM DO ÓLEO ISOLANTE PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE TENDÊNCIA DE DESUMIDIFICAÇÃO

A bancada cheia com óleo novo e com 37,9 ppm (KF) em 02/07/12 iniciou a secagem do óleo, para obtenção da curva de tendência de desumidificação do óleo, que na prática representa seu comportamento quando o transformador opera em baixo regime de carga e temperatura por tempo prolongado.

A duração do ensaio foi de 71 horas e no final a umidade abaixou para 22,7 ppm medida por KF. Neste experimento, a bancada foi preparada com o "setup" de secagem, com destaque na inclusão do filtro de umidade, conforme mostrado na figura 5.1(circuito II).

A água retida no filtro é purgada posteriormente e o filtro refil é seco em estufa. A figura 7.2 mostra a curva de tendência de desumidificação do óleo isolante em processo de secagem de 03 a 05/07/12, acompanhado por medidas de Karl Fischer em temperatura de 25°C.

## TENDÊNCIA 2

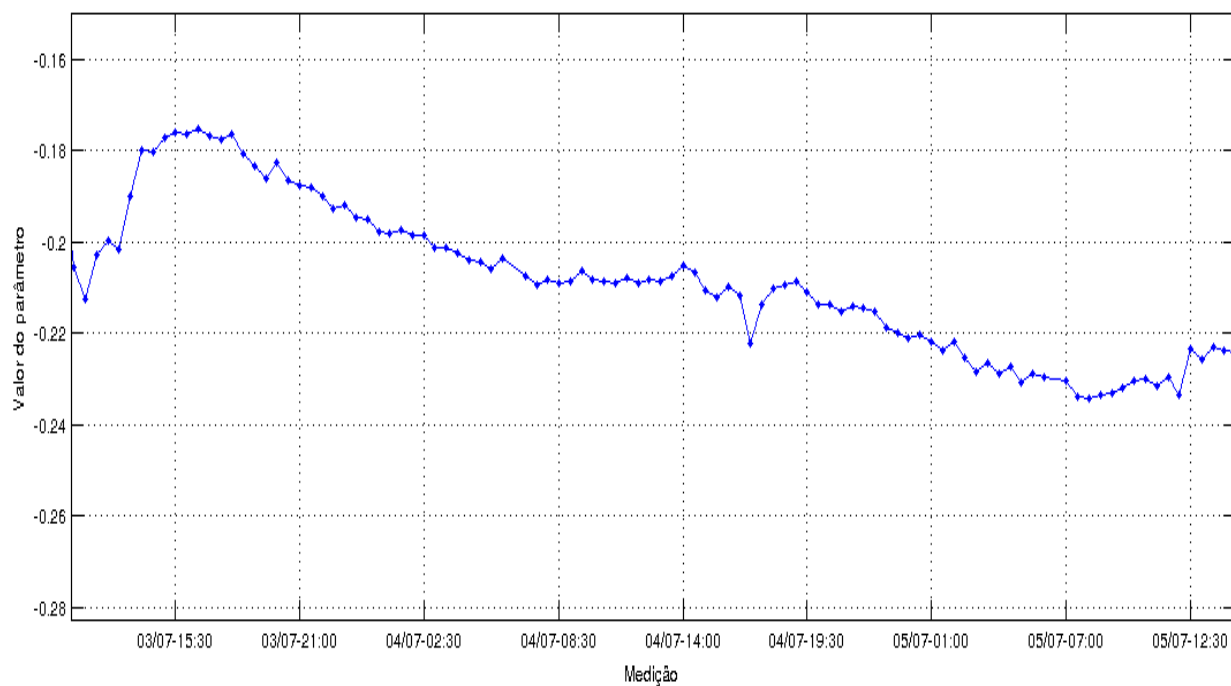


Figura 7. 2- Curva de tendência de desumidificação do óleo isolante de 03 a 05/07/12, acompanhado com medidas de Karl Fischer.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Para realização deste trabalho, foi desenvolvida uma bancada de umidificação ou secagem do óleo isolante e instalação parcial de um laboratório de ensaios físico-químicos de óleo isolante com o coulômetro de Karl Fischer e todos os seus acessórios. Equipamentos de proteção individual e coletivos foram necessários para permitir a realização dos ensaios para a obtenção das curvas de tendência.

Com a técnica ultrassônica apresentada, realizaram-se cerca de 1500 ensaios de tendência de umidificação ou secagem de óleo isolante. Foram utilizadas 50 amostras do óleo novo NYTRO 4000A num total de aplicações de 37500 pulsos. Os ensaios foram acompanhados de medidas simultâneas de teor de umidade por Karl Fischer com cerca de 900 medidas de pipetagem sem contaminação usando seringa descartável.

De acordo com os resultados obtidos dos experimentos, através da detecção das ondas ultrassônicas que atravessam o óleo isolante, foi possível descobrir um parâmetro que reflete o teor de umidade contido no mesmo, e como resultado, as curvas de tendência de umidificação e secagem do óleo. A relação entre o parâmetro e o valor do teor de umidade, obtido por KF, apresenta característica não linear e ainda não foi encontrada essa relação. A seleção dos parâmetros que refletem a umidade do óleo, sofrem influência da geometria da cubeta e dos materiais de sua construção.

Nos ensaios apenas, foi utilizado o óleo NYTRO 4000A novo, portanto, o parâmetro selecionado pode variar caso o óleo seja diferente.

A técnica ultrassônica aperfeiçoada pode substituir as medições coulométricas de Karl Fischer, oferecendo grandes vantagens:

- É uma técnica não invasiva;
- Não exige a retirada de amostra, que pode receber umidade tanto no acesso ao transformador quanto no ensaio de laboratório;
- A medição é "online";
- Confiabilidade da medida, pois é isenta de manipulação, pipetagem e agitação no traslado;
- Permite a monitoração contínua do sistema de isolamento e prognóstico do transformador;

Com o refinamento dos recursos matemáticos, pode-se conseguir aumentar a sensibilidade e seletividade do medidor, o que não é possível de ser conseguido no coulômetro de Karl Fischer, que processa por titulação química e seu "setup" é limitado, devido a reações químicas paralelas secundárias. Para a evolução desse estudo é necessário um trabalho de pesquisa interdisciplinar envolvendo fabricantes de óleo de transformadores, engenheiros de subestações, laboratórios de ensaios de materiais e especialistas em química analítica dirigida para manutenção preventiva de transformadores.

A técnica ultrassônica permite através da análise ultrassônica contínua o desenvolvimento de uma nova filosofia de "customização" dos óleos isolantes, de modo a atender necessidades específicas e diferenciadas de transformadores de potência.

## **CAPÍTULO 9**

### **PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para a continuidade deste trabalho, um fator importante para pesquisa, seria a inclusão de parâmetros múltiplos para o diagnóstico de contaminação do óleo.

Análise de artefatos inerentes da técnica ultrassônica, tais como temperatura, vibração, vácuo no fluxo, perda de carga e reações químicas secundárias no processo. Outro ponto é o trabalho no relacionamento das medidas obtidas nas curvas de tendência (pu) com correspondentes valores em ppm do coulômetro de Karl Fischer, para medida direta.

Desenvolvimento de um algoritmo que faça a seleção automática do parâmetro que aponta para a umidade do óleo, o ensaio de outros tipos de óleo como o AV60 PETROBRAS e óleos com composições diferentes como sintético, vegetal e óleos usados e contaminados com partículas de celulose são condições fundamentais para aprimoramento da técnica.

A adaptação do link ultrassônico diretamente no radiador do transformador e sua substituição por um único transdutor, operando em modo multiplexado, transmissor e receptor usando a técnica pulso-eco, tornarão o método mais simples e eficiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBRO, P.W., KOHLI, K. K. e McKINNEY, J. D. Radioisotope Dilution Assay (RIDA) for the Estimation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs).Journal of Analytical Toxicology, v. 3, n. 3, p. 125-128, May 1979.
2. ALSTOM T & D LTDA. Ficha técnica do óleo isolante NYTRO 4000 A, 2010.
3. ANDREUCCI, R. Ensaio por Ultrassom. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br>. Acesso: novembro 09, 2010.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR7070: Guia para amostragem de gases e óleos de transformadores e para análise dos gases dissolvidos. Rio de Janeiro, 1981.
5. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL Special Technical Publication. Symposium of insulating oils. 5 ed., n. 152, USA: June 23, 1952.
6. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D1524. Standard Test Method for Visual Examination of Used Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin in the Field. Annual Book of ASTM Standards. USA : July, 15 1994.
7. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D1534. Standard Test Method for Approximate Acidity in Electrical Insulating Liquids by Color-Indicator Titration. Annual Book of ASTM Standards. USA: September 10, 1995.
8. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D2285. Test Method for Interfacial Tension of Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin Against Water by the Drop-Weight Method. Annual Book of ASTM Standards. USA: march 10, 1999.
9. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D1298. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. Annual Book of ASTM Standards. USA: June 10, 1999
10. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D971. Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method. Annual Book of ASTM Standards. USA: October 10, 1999.
11. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL. D877: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.Annual Book of ASTM Standards. USA: October 10, 2002.

12. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D1698. Standard Test Method for Sediments and Soluble Sludge in Service-Aged Insulating Oils. Annual Book of ASTM Standards .USA: May, 10, 2003.
13. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL. D1816: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes. Annual Book of ASTM Standards .USA: February 01, 2004.
14. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D1500. Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale). Annual Book of ASTM Standards. USA: December 01, 2007.
15. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D 974. Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. Annual Book of ASTM Standards. USA: July 01, 2008.
16. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL D924. Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids. Annual Book of ASTM Standards .USA: November 01, 2008.
17. ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS MATERIAL . Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method D971. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D971.htm>. Acesso: Agosto 12, 2010.
18. ATCP do Brasil. Apostila 2 da fase 1-Efeito piezoelétrico e as cerâmicas piezoelétricas, São Carlos: 2004.
19. BAIRD, C. Química Ambiental. 2 ed., Porto Alegre:Bookman, 2008. p.359-66.
20. BESSA, P. Ascarel. Rio de Janeiro: 2005. Disponível em: <http://www.oeco.com.br>. Acesso: novembro 12, 2010.
21. BURNS, C. P. New Approaches to testing insulating oils. Foster Transformer ltd. Paper 193. England: 1953.
22. BURRUS, C. S., GOPINATH, R. A. e GUO, H. Introduction to wavelets and wavelet transforms. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
23. CHRISTENSEN, D. A. Ultrasonic Bioinstrumentation. New York: John Wiley & Sons, 1988.
24. CLARK, F. M. Insulating materials for design and engineering practices. John Wiley and Sons, v 1, New York, p.131 -209, 1979.
25. CLARK, F. M. Water Solution in high voltage dielectric liquids. AIEE Transactions, USA, v 59, p. 40-77, October 1940.



26. COBEI, Cursos de líquidos isolantes para fins elétricos. Dezembro, 1982.
27. COCHRAN, W. T. et al. What is the Fast Fourier Transform? IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, n. 2, p. 45-55, 1967.
28. DEXSIL CORPORATION. Clor N Oil 50 A PCB- Screening transformer oil. Disponível em: [http://www.dexsil.com/uploads/docs/cns\\_rev.8.pdf](http://www.dexsil.com/uploads/docs/cns_rev.8.pdf). Acesso: novembro 20, 2010.
29. FABRE, J. e PICHON, A. Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application Transformers. 1960 International Conference on large High Voltage Electric System. Paper 137, France, 1960.
30. GREWOOD, M. S. e BAMBERGER, J. A. Measurement of viscosity and shear wave velocity of a liquid or slurry for on-line process control. Ultrasonics, New York, n 39, p.623-30, 2002.
31. HANSON, D. J. Hazardous Waste incineration presents legal, technical Challenges. Chemical and Engineering News. v. 29, p. 7-14, march 1993.
32. HARLOW, J. H. Electric Power Transformer Engineering. Florida: CRC Press LLC, 2004. p. 23-45.
33. IEC -International Electrotechnical Commission. IEC 60296: Fluids for electrotechnical applications Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear. USA: November 1, 2003.
34. IFEACHOR, E. e JERVIS, B. Signal Processing- a practical approach 2ed USA: Prentice Hall, 2002
35. JELZ, J. L., STUART, A. P. e ROSS, E. S. The Effect of Composition on the Oxidation Stability of Electrical Oils. AIEE Transactions, p. 57-84, October 1958.
36. JOLLIFFE, I.T. Principal component analysis. New York: Springer, 2002
37. KARSAI, K., KERENYI, D. e KISS, L. Large power transformer. Elsevier, p.282-325. USA: 1987.
38. KORCEK, S. e JENSEN, R. K. Relation Between Base Oil Composition and Oxidation Stability at Increased Temperatures. ASLE Transactions, v 19, n 2, p 83-94. 1975.
39. KRAUTKRAMER, J. e KRAUTKRAMER, H. Ultrasonic Testing of Materials. 4 ed Germany: Springer, 1990.
40. LAMPE, W., SPICAR, E. e CARRANDER, K. Continuous Purification and Supervision of Transformer Insulation System in Service. IEE Winter Point Meeting, New York, paper A78, New York: 1978. p.111-7.

41. LEWAND, L. Which Insulating Oil Analytical Tests to Request and When. Chemist's Perspective. Neta World. USA: 2002.
42. LIPSTEIN, R. A. e SHAKNOVICH, M. I. Transformer oil. 2 ed. Jerusalem: Israel program for Scientific translations, 1970.
43. McMURRY, J. Química Orgânica, 6 ed ., São Paulo: Thomson, 2005.
44. McNUTT, W. J. e KAUFMANN, G. W. Evaluation of Funtional Life Test Model for Power Transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus System, v. 102, n 5, p. 1151-62. May 1983.
45. MILASCH, M. Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante. São Paulo: Editora Edgard, 1984. p. 86-223.
46. NYNAS NAPHYTENICS A.B (Sweden). Transformer Oil Handbook.2006.
47. OLYMPUS NDT. Ultrasonic Transducers Technical Notes. Disponível em: <http://www.olympusNDT.com>. Acesso: 05 outubro 2007
48. PABLO, A. e PAHLAVANPOUR, B. Furanic Compounds Analysis: a tool for predictive maintenance of oil filled electrical equipment. Electra, n.175, p. 9-31, December 1997.
49. PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION. Acoustic Emission Sensors. Disponível em: [http:// www.pacndt.com](http://www.pacndt.com). Acesso em outubro 19, 2010a.
50. PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION. Complete line of standards acoustic emission sensors, 2010b.
51. SIEMENS (Brasil). Ensaio Elétricos em Subestações e Usinas- COPEL. FIEE Elétrica, 2007.
52. SILLARS, R. W. Electrical insulating materials and their application. Peter Peregrinus ltd. for the Institution of Electrical Engineers. England: 1973. p.214.
53. SINGH, O. Applied Thermodynamic. New Age international limited publisher, 3 ed. New Delhi: 2009.
54. TETTEX INSTRUMENTS. Water, paper, oil and temperature. Measuring & Diagnostics. Disponível em: <http://www.haefely.com/measuring>. Acesso : setembro 18, 2010.
55. THRANE, N. The Discrete Fourier Transform and FFT Analysers. Technical Review, v. 1, p.29, 1979.
56. VELOSO, G. F. C. Identificação de Padrões de Contaminação em Óleo de Transformador Através de Monitoração Acústica das Descargas Parciais. 2011. 102

f. Dissertação (Doutorado em Automação e Sistemas Elétricos Industriais).  
Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

## APÊNDICE

### PUBLICAÇÕES E EVENTOS

1-NORONHA, I. et. al. Detecting Partial Discharges Using Empirical Mode Decomposition. In: VIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. Anais da VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009.

2-AHN, S.U. et. al. Detection of Partial Discharge In Power Transformers Using Rogowski Coil And Multiresolution Analysis. In: 10o. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2009, Bonito, MS. COBEP 2009 CDROM, 2009.

3-NORONHA, I. et. al. Detecting moisture in transformer oil using acoustic signals of partial discharges. In: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD2010), 2010, Tokyo. Conference Proceedings of CMD2010, 2010. v. 2.

4-NORONHA, I. et. al. Using partial discharge as sample signal source to identify contamination moisture pattern in power transformer insulating oil. In: 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2010), 2010, Phoenix. Proceedings of IECON-2010, 2010.

5-NORONHA, I. et. al. Investigation on partial discharges acoustic signals to detect Power transformer-oil quality. In: 8th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2011), 2011, Bologna, Italy. Conference Proceedings of SDEMPED 2011.

6-NORONHA, I et. al. Identificação de padrões de contaminação por umidade em óleo de transformador usando descargas parciais como fontes de sinais. Revista da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência – Sessão especial: Diagnóstico e Operação Tolerante a Falhas em Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos – Aceito para publicação em 2011.

# IECON' 2010

7-10 November - Phoenix, AZ, USA



## HOME

PROGRAM

ANNOUNCEMENTS

TUTORIALS

STUDENTS

REGISTRATION

VENUE

TRAVEL

FOR INDUSTRY

ICELIE' 2010

COMMITTEES

FOR AUTHORS

FAQ

CONTACTS

### WELCOME!

IECON-2010 is the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. The conference will be held 7-10 November 2010 at the Renaissance Hotel & Conference Center, Glendale, AZ, USA. The conference is technically co-sponsored by the Society of Instrument and Control Engineers (SICE), New Jersey Institute of Technology, North Carolina State University, and Auburn University.

IECON-2010 is being held concurrently with the 4th IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (**ICELIE-2010**), and IES Industry Forum. Participation in both conferences is covered by a single registration fee.

The world's industry, research, and academia are cordially invited to participate in an array of presentations, tutorials, and social activities for the advancement of science, technology, engineering education, and fellowship. Technical interests for these two conferences include:

- Control Systems & Applications
- Power Electronics
- Electrical Drives & Machines
- Factory Automation & Industrial Informatics
- Robotics & Mechatronics
- Sensors, Actuators & System Integration
- Signal Processing & Computational Intelligence

**There will be three exciting plenary sessions for IECON 2010. [Plenary sessions Information.](#)**

**Industry Forum Prize Drawing, [click here](#) for more details.**

**Enjoy your visit!**



## POST CONFERENCE

Thanks to everyone who attended SDEMPED11. The conference was a great success and we hope you enjoyed it.

Download the trailer video:

[Format mp4](#)

[Quicktime mov \(Low Res\)](#)

[Quicktime mov \(High Res\)](#)

### SDEMPED11 in Numbers

---

- 2 General Chairs
- 12 Topic Chairs
- 694 review invitations submitted
- 712 response emails
- 3 key-notes
- 3 tutorials with 49 participants
- 6 special sessions
- 12 regular sessions
- 106 presentations
- 140 participants from 29 countries (and 1 baby)
- 13342 promotional emails
- 34 people joined the city tour
- 482 files uploaded
- 1307 MB used on the department server
- 21 days for coding ReviewNow
- 84 cups of (Italian) coffee drunk in the same period
- 0 unsolved problems.



---

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Viale Risorgimento 2, 40136 - Bologna, Italy.

[Security and Privacy](#) - [Terms & Conditions](#) - [Disclaimer](#)

---



## SOBRAEP - Manuscript Search Tool

[\[ Main \]](#)

[\[ Templates \]](#)

[\[ Submit \]](#)

[\[ Reviewer \]](#)

[\[ Pub. Trans. \]](#)

[\[ Pub. Conf. \]](#)

[\[ Financial \]](#)

[\[ Vote \]](#)

[\[ Profile \]](#)

[\[ Support \]](#)

[\[ Log Out \]](#)

**Search Results: found 4 manuscripts with veloso in Author Name**

Search in : All Published Editions

Show Results: 1-4

Results Per Page : [\[ 5 \]](#) [\[ 10 \]](#) [\[ 20 \]](#)

[\[ New Search \]](#) **1**

**Vol. 13-No.3(August 2008)**

[\[ Abstract Plus \]](#) [\[ Full Text PDF \]](#) [\[ Issue Index \]](#) [\[ X \]](#)

**Reduced Switch Count Converter For Switched Reluctance Generators**

*Augusto Fleury Veloso da Silveira, Felipe dos Santos e Silva, Wanderson Rainer H. de Araújo, Darizon Alves de Andrade, Augusto. W. Fleury V. da Silveira*

 177 - 183

**Vol. 16-No.3(August 2011)**

[\[ Abstract Plus \]](#) [\[ Full Text PDF \]](#) [\[ Issue Index \]](#) [\[ X \]](#)

**Identificação De Padrões De Contaminação Por Umidade Em Óleo De Transformador Usando Descargas Parciais Como Fontes De Sinais**

*Giscard Francimeire Cintra Veloso, Ismael Noronha, Luiz Eduardo Borges Da Silva, Germano Lambert Torres*

 249 - 255

**Vol. 16-No.4(November 2011)**

[\[ Abstract Plus \]](#) [\[ Full Text PDF \]](#) [\[ Issue Index \]](#) [\[ X \]](#)

**Gerador A Relutância Variável Operando No Modo Auto-excitado**

*Victor Régis Bernardeli, Darizon Alves De Andrade, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso Da Silveira, Luciano Coutinho Gomes, Ghunter Paulo Viajante*

 357 - 366

**Vol. 16-No.4(November 2011)**

[\[ Abstract Plus \]](#) [\[ Full Text PDF \]](#) [\[ Issue Index \]](#) [\[ X \]](#)

**Estratégia De Controle Para Melhoria Da Eficiência Da Conversão Mecânico-elétrica Do Grv**

*Ghunter Paulo Viajante, Darizon Alves De Andrade, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso Da Silveira, Victor Régis Berladelli, Luciano Coutinho Gomes, Marcos Antônio Arantes De Freitas, José Luis Domingos, Augusto Fleury Veloso Da Silveira*

 367 - 375

**1**

[\[ New Search \]](#)

[\[ Financial Main \]](#)

[\[ Main Menu \]](#)

[\[ Log Out \]](#)

If you have any problems contact the technical support at [isobraepsupport@dee.feis.unesp.br](mailto:isobraepsupport@dee.feis.unesp.br)

[FASG iRevista - 2011](#)



# Investigation on Partial Discharges Acoustic Signals to Detect Power Transformer-Oil Quality

I. Noronha, G.F.C. Veloso, L.E. Borges da Silva, and G. Lambert Torres

*Abstract* – A properly behavior of power transformers depends on the insulation health. The insulation condition assessment can provide information to a system of diagnosis and prognosis, allowing for planning interventions at the appropriate time to avoid unexpected interruptions. This work presents a condition assessment technique that can detect contaminants in the insulating oil using acoustic signals of partial discharges. These signals can be detected using piezoelectric sensors installed at the wall of the equipment. In the investigation described here, the sensors are mounted in a reservoir with insulating oils with different levels of moisture. A device to produce electric discharges in oil is used to simulate partial discharges. The detected signals are processed using the Discrete Wavelet Transform to extract time-frequency characteristics which can be examined with the Principal Component Analysis in order to find patterns of water contamination in insulating oil.

*Index Terms*– Acoustic emission, Partial discharges, Power transformer insulation, Principal component analysis, Wavelet transforms.

## I. INTRODUCTION

AT the electricity power systems, the predictive maintenance can play an important role in the economic profitability and overall reliability. Applied to power transformers it can improve performance, extend life and reduce the risks of unplanned outage, which avoid large financial losses [1]. The development of predictive maintenance programs at industrial plants has been proved to be an effective way to reduce costs, improve productivity, quality and efficiency. Among different kinds of stresses which a power transformer is submitted, the insulating oil can be considered one of the most important components to be monitored [2]. In addition to electrical insulation, the oil also provides cooling, stabilizes the aging of components and carries information about the condition of the equipment. So, methods of condition assessment can provide information to a system of diagnosis and prognosis, allowing for planning interventions at the appropriate time to avoid unexpected interruptions [2].

The chemical analysis is the common condition assessment method used to extract information about oil, which provides indicative presence of contaminators related to different problems. Its use requires take oil samples from

the transformer and send it to a laboratory, which takes several days to weeks to provide some useful results [3] and using expensive equipments [4]. Moreover, there is a risk of samples being contaminated during collection and transport.

One of the most abundant sources of information concerning insulation system can be the partial discharge acoustic signals. Partial discharges are tiny arcs occurring inside the insulation system of high voltage electrical equipments. They arise due to construction problems, wear, and aging or due to overloading [5], and their activity remain at acceptable levels for a long time [6]. For a power transformer, a minimum partial discharge activity can be detected immediately after its entry into operation [6]. When a partial discharge occurs, it releases energy in the form of acoustic wave that travels throughout the insulation system and hits the transformer wall, where can be detected using an appropriated piezoelectric sensor [7]. If the sensor is sufficiently sensitive, it is possible to monitor the partial discharge since the beginning of its activity until the end of the transformer life. The normal or accelerated aging of insulation changes the dynamic characteristics of the system composed by the metal structure, oil tank, paper and coil [8]. This work shows that such changes can be detected by analysis of an acoustic signal that passes through that system. So, the availability of acoustic signals from partial discharges can be a source of valuable information about insulation system.

The objective of this work is to show the possibility of detect the presence of contaminants, specifically the moisture level, in insulation oil by the analysis of the acoustic signals from partial discharges. This diagnosis on the humidity of insulating oil has been exploited due to the importance of measuring this parameter, since it brings information about the aging of the insulation and about the state of contamination, both relevant to a proper maintenance of the equipment in question. Moreover, among the usual techniques for measuring moisture in insulating oil, the Karl Fischer method is considered the standard ASTM D1533, and involve the removal of sample for further laboratory analysis, which makes the process of obtaining measures too slow and not very reliable [9, 10]. In this context, a noninvasive technique to detect variations in moisture in the oil would be a great advantage. Using Discrete Wavelet Transform, the acoustic signals of partial discharges can be decomposed in their frequency components varying in time.

---

This work was supported in part by FAPEMIG, Minas Gerais State research funding agency, CNPq, a Brazilian research funding agency, CAPES, in the form of research scholarships.

All the authors are with Federal University at Itajuba – Minas Gerais – Brazil (e-mails: {gveloso, leborges, ismael, germano}@unifei.edu.br).



# IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE CONTAMINAÇÃO POR UMIDADE EM ÓLEO DE TRANSFORMADOR USANDO DESCARGAS PARCIAIS COMO FONTES DE SINAIS

G.F.C. Veloso, I. Noronha, L.E. Borges da Silva, G. Lambert-Torres  
Universidade Federal de Itajubá  
CEP 37500-903, Itajubá- MG  
Brasil  
e-mail: gveloso@unifei.edu.br

**Resumo** - Este artigo propõe uma nova técnica de detecção de contaminação por umidade em óleo isolante usando os sinais acústicos das descargas parciais (DP). Para demonstrá-la, um experimento é montado com um sensor piezoelétrico fixado na base de um reservatório que é preenchido com amostras de óleo isolante contaminadas com diferentes níveis de umidade. Um dispositivo gerador de descargas elétricas fica submerso no óleo para simular ocorrências de descargas parciais. Os sinais acústicos detectados são processados usando a Transformada Wavelet Discreta para extrair características de tempo e frequência. Em seguida, é feito um processamento usando a Análise de Componentes Principais (PCA) de modo a identificar padrões de contaminação por água no óleo de transformador. Os resultados mostram que a técnica é promissora para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento on-line de transformadores de potência.

**Palavras-Chave** – Análise de Componentes Principais, Descargas Parciais, Emissão Acústica, Transformada Wavelet, Transformadores de Potência, Umidade.

## IDENTIFICATION OF MOISTURE CONTAMINATION PATTERN IN TRANSFORMER OIL USING PARTIAL DISCHARGES AS SIGNAL SOURCES

**Abstract** – This paper proposes a new technique for detection of moisture contamination in insulating oil using the acoustic signals from partial discharges. To demonstrate it, an experiment with a piezoelectric sensor fixed on the basis of an oil reservoir is mounted. Insulating oil samples contaminated with different moisture levels are tested. A discharge-generating device, submerged in oil, simulate occurrences of partial discharges. The acoustic signals detected are processed using the Discrete Wavelet Transform to extract time-frequency features. Then, a processing using the Principal Component Analysis (PCA) is performed in such a way to identify patterns of water contamination in those oil samples. The results show that the technique is promising for the development of a system for online monitoring of power transformers.

Artigo submetido em 30/08/2010. Primeira revisão em 16/04/2011 segunda revisão em 18/06/2011. Aceito para publicação em 18/06/2011 para a Seção Especial por recomendação do editor especial Antonio J. Marques Cardoso.

**Keywords** – Acoustic Emission, Moisture, Partial Discharges, Power Transformer, Principal Component Analysis, Wavelet Transform.

### NOMENCLATURA

DP	Descarga parcial.
PCA	Análise de componentes principais
FFT	Transformada rápida de Fourier

### I INTRODUÇÃO

No setor elétrico, transformadores de potência são componentes fundamentais, sendo sua confiabilidade um dos fatores mais importantes na operação do sistema [1]. Os altos custos de reposição de peças ou do equipamento, ou ainda das paradas não programadas, exige uma atitude pró-ativa das companhias de energia elétrica com relação à operação e manutenção de seus transformadores de potência. O desenvolvimento de programas de manutenção preditiva nas empresas de energia elétrica tem permitido a otimização de seus processos no sentido de promover não somente a redução de custos de manutenção, mas também de melhorar a produtividade, a qualidade e a eficiência [2].

Dentre diversos fatores estressantes a que o transformador de potência está submetido, aqueles relacionados ao óleo isolante, sem dúvida, representam os mais interessantes para serem monitorados [3]. Além do isolamento elétrico, o óleo também proporciona resfriamento, estabiliza o envelhecimento dos componentes e pode servir de portador de informação sobre a condição geral do equipamento. O uso de métodos de avaliação de suas condições pode prover informação para um sistema de diagnóstico e prognóstico [4], permitindo o planejamento de intervenções em momentos apropriados, evitando as indesejadas interrupções não programadas.

Uma peculiar fonte de informação relacionada ao sistema de isolamento é constituída pelos sinais gerados pelas descargas parciais. Estas descargas são minúsculos arcos elétricos que ocorrem no interior do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão. Podem ser causadas por problemas de construção, desgaste e envelhecimento, ou por sobrecargas [5], e sua atividade permanece em níveis aceitáveis por um longo período. Em um transformador de potência, um nível mínimo de atividade pode ser detectado imediatamente após sua entrada em operação [6]. Quando

# Using Partial Discharge as Sample Signal Source to Identify Contamination Moisture Pattern in Power Transformer Insulating Oil

G.F.C. Veloso, L.E. Borges da Silva, I. Noronha and G. Lambert Torres  
Federal University at Itajuba – Minas Gerais – Brazil  
{gveloso, leborges, ismael, germano}@unifei.edu.br

*Abstract*—The properly behavior of power transformers is highly dependent of the insulation health. So, the insulation condition assessment can provide information to a system of diagnosis and prognosis, allowing for planning interventions at the appropriate time to avoid unexpected interruptions. This paper presents a technique that can detect moisture contamination in the insulating oil using acoustic signals of partial discharge. In this work, a piezoelectric sensor is mounted in a reservoir with insulating oils with different levels of moisture. A device to simulate partial discharges is immersed in those oils. The detected signals are processed using Discrete Wavelet Transform to extract time-frequency characteristics which are processing using the Principal Component Analysis in order to identify patterns of water content in insulating oil. The results are presented and the methodology has shown a very good technique to be implemented as on line monitoring system.

## I. INTRODUCTION

Nowadays, the development of predictive maintenance programs has allowed the optimization of industrial plants in order to promote not only the reduction of maintenance costs itself, but also improve productivity, quality and efficiency [1]. At the electric system, the power transformers are fundamental components and there reliability is a factor of vital importance for the operation of the system [2]. The predictive maintenance can play an important role in the economic profitability of the electric system, to improve performance and extend the life of power transformers, reducing the risks of unplanned outage in power systems, which it is known to generate large financial losses.

Among different kinds of stresses which a power transformer is submitted, the insulating oil can be considered one of the most important components to be monitored [3]. In addition to electrical insulation, the oil also provides cooling, stabilizes the aging of components and carries information about the condition of the equipment. The use of methods of condition assessment can provide information to a system of diagnosis and prognosis, allowing for planning interventions at the appropriate time to avoid unexpected interruptions [3].

The most common used oil condition assessment method is the chemical analysis, which provides indicative presence of contaminants substances in the oil related to different problems. Its use requires take oil samples from the transformer, and send it to a laboratory, which takes several days to weeks to provide some useful results [4]. Often, one wants to know only the information about the presence of one

or two critical substance, and not a full report. However, the tests can only be done by a laboratory using expensive equipments [5] and requiring some time.

One of the most abundant sources of information concerning insulation system can be the partial discharge signals. Partial discharges are tiny arcs occurring inside the insulation system of high voltage electrical equipments. They arise due to construction problems, wear, and aging or due to overloading [6], and their activity remain at acceptable levels for a long time [7]. For a power transformer, a minimum partial discharge activity can be detected immediately after its entry into operation [7]. When a partial discharge occurs, it releases energy in the form of acoustic wave that travels throughout the insulation system and hits the transformer wall, where can be detected using an appropriated piezoelectric sensor [8]. If the sensor is sufficiently sensitive, it is possible to monitor the partial discharge since the beginning of its activity until the end of the transformer life. The normal or accelerated aging of insulation changes the dynamic characteristics of the system composed by the metal structure, oil tank, paper and coil [9]. It will be show that such changes can be detected by analysis of an acoustic signal that passes through that system. So, the availability of acoustic signals from partial discharges can be a source of valuable information about insulation system.

The objective of this work is to show the possibility of detect the presence of moisture contamination in insulation oil by the analysis of the acoustic signals from partial discharges. Using Discrete Wavelet Transform, those signals can be decomposed in their frequency components varying in time. Then, these components, here called parameters, are examined with the Principal Component Analysis (PCA) in such way to find patterns related to water contamination. The same technique can be used to detect other changes in the insulation system, building the basis for a real time predictive maintenance system for power transformers.

## II. SETUP AND MEASUREMENT PROCEDURE

The experimental setup consists in a reservoir to be filled with insulating oil, a device to produce electric discharges in order to simulate partial discharges (PD), and a piezoelectric sensor at the platform where the reservoir is placed (Fig.1). The sensor used is broadband type and has approximately flat

# Detecting Moisture in Transformer-oil Using Acoustic Signals of Partial Discharges

G.F.C. Veloso<sup>1</sup>, L.E. Borges da Silva<sup>1</sup>, I. Noronha<sup>1</sup> and G. Lambert Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University at Itajuba – Minas Gerais – Brazil  
{gveloso, leborges, ismael, germano}@unifei.edu.br

*Abstract*—At the electric system, the power transformers are fundamental components and their reliability is a factor of vital importance for the operation of the system. A properly behavior of power transformers depends on the insulation health. So, the insulation condition assessment can provide information to a system of diagnosis and prognosis, allowing for planning interventions at the appropriate time to avoid unexpected interruptions. This paper presents a condition assessment technique that can detect water in the insulating oil using acoustic signals of partial discharge. The signals can be detected through piezoelectric sensors installed at the wall of the equipment. For this work, these sensors are mounted in a reservoir with insulating oils with different levels of moisture. A device to produce electric discharges in oil is used to simulate partial discharges. The detected signals are processed using the Discrete Wavelet Transform to extract non-stationary characteristics which can be correlated with different levels of water content in insulating oil.

*Keywords* -- Acoustic emission, Moisture, Partial discharges, Power transformer insulation, Wavelet transforms.

## I. INTRODUCTION

The development of predictive maintenance programs nowadays has allowed the optimization of industrial plants in order to promote not only the reduction of maintenance costs itself, but also improve productivity, quality and efficiency [1]. At the electric system, the predictive maintenance can play an important role in the economic profitability of the electric system, to improve performance and extend the life of power transformers, reducing the risks of unplanned outage in power systems, which it is known to generate large financial losses [2].

Among different kinds of stresses which a power transformer is submitted, the insulating oil can be considered one of the most important components to be monitored [3]. In addition to electrical insulation, the oil also provides cooling, stabilizes the aging of components and carries information about the condition of the equipment. The use of methods of condition assessment can provide information to a system of diagnosis and prognosis, allowing for planning interventions at the appropriate time to avoid unexpected interruptions [3].

The most common used oil condition assessment method is the chemical analysis, which provides indicative presence of contaminants substances in the oil related to different problems. Its use requires take oil samples from the transformer, and send it to a laboratory, which takes several days to weeks to provide some useful results [4]. Often, one wants to know only the information about the presence of one

or two critical substance, and not a full report. However, the tests can only be done by a laboratory using expensive equipments [5] and requiring some time.

One of the most abundant sources of information concerning insulation system can be the partial discharge signals. Partial discharges are tiny arcs occurring inside the insulation system of high voltage electrical equipments. They arise due to construction problems, wear, aging or due to overloading [6], and their activity remain at acceptable levels for a long time [7]. For a power transformer, a minimum partial discharge activity can be detected immediately after its entry into operation [7]. When a partial discharge occurs, it releases energy in the form of acoustic wave that travels throughout the insulation system and hits the transformer wall, where can be detected using an appropriated piezoelectric sensor [8]. If the sensor is sufficiently sensitive, it is possible to monitor the partial discharge since the beginning of its activity until the end of the transformer life. The normal or accelerated aging of insulation changes the dynamic characteristics of the system composed by the metal structure, oil tank, paper and coil [9]. It will be show that such changes can be detected by analysis of an acoustic signal that passes through that system. So, the availability of acoustic signals from partial discharges can be a source of valuable information about insulation system.

The objective of this work is to show the possibility of detect the presence of moisture contamination in insulation oil by the analysis of the acoustic signals from partial discharges. Using Discrete Wavelet Transform, those signals can be decomposed in their frequency components varying in time. Then, these components, here called parameters, are examined in such a way to find characteristics related to water contamination. The same technique can be used to detect other changes in the insulation system, building the basis for a real time predictive maintenance system for power transformers.

## II. SETUP AND MEASUREMENT PROCEDURE

The setup consists in a reservoir to be filled with insulating oil, a device to produce electric discharges in a way to simulate partial discharges, and a piezoelectric sensor coupled at a platform where the reservoir is mounted (Fig. 1). The sensor used is broadband type and has approximately flat frequency response up to 1MHz. An acquisition system of 2.5MSamples/sec of sampling rate is used to collect the acoustic signals from the discharges. This setup is intended to show how acoustic signals generated by partial discharges and propagated through the oil can be detected and analyzed in a



# DETECTION OF PARTIAL DISCHARGE IN POWER TRANSFORMERS USING ROGOWSKI COIL AND MULTIREOLUTION ANALYSIS

Giscard F. C. Veloso<sup>1</sup>, L.E. Borges da Silva<sup>1</sup>, I. Noronha<sup>1</sup>, G. Lambert Torres<sup>1</sup>, J. Haddad<sup>1</sup>  
Rondineli R. Pereira<sup>1</sup>, Se Un Alm<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Group of Artificial Intelligence Applications - UNFEI

Av. BPS, 1303 – Pinheirinho – Itajubá MG

{gveloso, leborges, ismael, germano, jamil}@unifei.edu.br rondinelipereira@yahoo.com.br

<sup>2</sup>CPFL Paulista  
Campinas, Brasil

*Abstract* – Partial discharge detection in power transformers is discussed using a new approach that exploit the broad band of the Rogowski coils and the potential of two signal processing tools: discrete wavelet transform and empirical mode decomposition. Detecting and analyzing incipient activities of partial discharge can provide useful information to diagnostics and prognostics about transformer insulation. So, partial discharge signals embedded in the electric current at ground conductor are measured using the Rogowski coil. These signals are submitted to noise suppression and the partial discharges waveforms are extracted through different ways: using discrete wavelet transform and using empirical mode decomposition. These two methods are compared and their advantages discussed.

*Keywords* – Discrete Wavelet Transform, Empirical Mode Decomposition, Partial Discharge, Power Transformer, Rogowski coil.

## I. INTRODUCTION

The power transformers are the most expensive equipment in the electric power systems. A replacement due an unexpected fail can cause huge troubles and enormous financial losses. A permanent monitoring in this kind of equipment can detect incipient flaws and avoid its unconstrained evolution that certainly would lead to an abrupt failure. So, a predictive maintenance of these transformers can assure reliability to the electric system and lower costs in its conservation.

A common problem in this context of inconspicuous flaws is the partial discharge. If its activities are not monitored and constrained, the transformer insulation system can be deteriorated until a disruption lead to a catastrophic fail. There are several techniques to detect partial discharges, but the greater part requires the transformer cut out, making them high-cost and impractical. These difficulties lead to a search for methods sufficiently non-invasive and safety to be applied at the equipment in normal operation.

Another problem concerned to partial discharge monitoring is the susceptibility to noise. There are cases where it is impossible to distinguish between noise and signal of partial discharge, what requires the implementation of a signal processing to extract the correct information. Among the possibilities in digital signal processing tools, the Discrete Wavelet Transform and the Empirical Mode Decomposition can be very useful in the solution of

problems with partial discharge signal detection. Their multiresolution characteristics allows not only the noise reduction, but the detection of transient signals related to partial discharge activities.

In this work, a technique that take advantage of the characteristics of Rogowski coils and the power of the Discrete Wavelet Transform and of the Empirical Mode Decomposition to detect partial discharge pulses shall be described and compared using simulations and a real case.

## II. PARTIAL DISCHARGE CHARACTERISTICS IN POWER TRANSFORMERS

Partial discharge is an electric arc that can occurs inside bubbles immersed in liquid insulations [1] [2]. This arc partially completes the circuit between electric conductors or between it and ground through transformer core or tank [1]. It manifests itself in the form of electrical pulses of high frequency [3] that travel through the insulation and transformer structure until the electrical terminals suffering attenuations that substantially distort its original waveform [2]. To this small amplitude pulses are summed the electrical noise. In a substation, there are several noise sources like radio waves, electrostatic discharges, corona, lightning and thermal noise [4]. The data acquisition equipment itself can contribute with random noise because its broadband characteristic to detect high frequency pulses. So, a simple visual analysis of sample signal can not reveal anything related to partial discharge. It is indispensable a more accurate analysis using digital signal processing techniques.

## III. PARTIAL DISCHARGE DETECTION USING ROGOWSKI COIL

Taking into account the transformer grounding attachment as a way through which partial discharge pulses flow to the earth, its detection can be made measuring the electric current in this place. This task must be accomplished using a sensor capable to detect high frequencies electric current and provide a strong insulation. The device suitable to perform such a measurement is the Rogowski coil.

The Rogowski coil (fig. 1) is a circular plastic mold with a winding mounted in order to have a uniformly distributed density of turns [5]. The crosswise sections must have uniform areas. It is used mounting the coil around the conductor where the alternating current must be measured. A voltage signal proportional to the variations in time ( $t$ ) of the electrical current  $I$  appears at the terminals of the winding

# Detecting Partial Discharges Using Empirical Mode Decomposition

Giscard F. C. Veloso, Luiz Eduardo Borges da Silva, Ismael Noronha, Germano Labert Torres  
Universidade Federal de Itajubá – Av. BPS, 1303, Pinheirão, Itajubá-MG

*Abstract* — Partial discharge detection in power transformers is discussed using a new approach that exploit the broad band of the Rogowski coils and the potential of the empirical mode decomposition. Detecting and analyzing incipient activities of partial discharge can provide useful information to diagnostics and prognostics about transformer insulation. So, partial discharge signals embedded in the electric current at ground conductor are measured using the Rogowski coil. These signals are submitted to noise suppression and the partial discharges waveforms are extracted using empirical mode decomposition.

*Keywords* — Partial discharge, Empirical mode decomposition, Rogowski coil, Power transformer.

## INTRODUCTION

The power transformers are the most expensive equipment in the electric power systems. Their health is the utmost importance for the reliability of the electric system. A replacement due an unexpected fail can cause huge troubles and enormous financial losses. A permanent monitoring in this kind of equipment can detect incipient flaws and avoid its unconstrained evolution that certainly would lead to an abrupt failure. So, a predictive maintenance of these transformers can assure reliability to the electric system and lower costs in its conservation.

A common problem in this context of inconspicuous flaws is the partial discharge. If its activities are not monitored and constrained, the transformer insulation system can be deteriorated until a disruption lead to a catastrophic fail. There are several techniques to detect partial discharges, but the greater part requires the transformer cut out, making them high-cost and impractical. These difficulties lead to a search for methods sufficiently non-invasive and safety to be applied at the equipment in normal operation.

Another problem concerned to partial discharge monitoring is the susceptibility to noise. There are cases where it is impossible to distinguish between noise and signal of partial discharge, what requires the implementation of a signal processing to extract the correct information. Among the possibilities in digital signal processing tools, the Empirical Mode Decomposition can be very useful in the solution of problems with partial discharge signal detection. Its multiresolution characteristic allows not only the noise reduction, but the detection of transient signals related to partial discharge activities.

G. F. C. Veloso, gveloso@unifei.edu.br, L. E. B. da Silva, leborges@unifei.edu.br, I. Noronha, ismael@unifei.edu.br, G. Lambert Torres, germano@unifei.edu.br

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, à CAPES e à TERMOPE.

In this work, a technique that take advantage of the characteristics of Rogowski coils and the power of the Empirical Mode Decomposition to detect partial discharge pulses shall be described and compared using a real case.

## PARTIAL DISCHARGE CHARACTERISTICS IN POWER TRANSFORMERS

Partial discharge is a very small electric arc that can occurs inside bubbles immersed in liquid insulations [1] [2]. This arc partially completes the circuit between electric conductors or between it and ground through transformer core or tank [1]. It manifests itself in the form of electrical pulses of high frequency [3] that travel through the insulation and transformer structure until the electrical terminals, suffering attenuations that substantially distort its original waveform [2]. To this small amplitude pulses are summed the electrical noise. In a substation, there are several noise sources like radio waves, electrostatic discharges, corona, lightning and thermal noise [4]. The data acquisition equipment itself can contribute with random noise because its broadband characteristic to detect high frequency pulses. So, a simple visual analysis of sample signal can not reveal anything related to partial discharge. It is indispensable a more accurate analysis using digital signal processing techniques.

## PARTIAL DISCHARGE DETECTION USING ROGOWSKI COIL

Taking into account the transformer grounding attachment as a way through which partial discharge pulses flow to the earth, its detection can be made measuring the electric current at that place. This task must be accomplished using a sensor capable to detect high frequencies electric current and provide a strong insulation. The device suitable to perform such a measurement is the Rogowski coil.

The Rogowski coil (Fig. 1) is a circular plastic mold with a winding mounted in order to have a uniformly distributed density of turns. The crosswise sections must have uniform areas. It is used mounting the coil around the conductor where the alternating current must be measured. A voltage signal proportional to the variations of the electrical current appears at the terminals of the winding according to (1), where  $H$  is related to the coil sensitivity. Therefore, integrating this voltage signal, the electric current signal can be obtained.

$$E = H \frac{dI}{dt} \quad (1)$$