

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

**Giscard Francimeire Cintra Veloso**

**Identificação de Padrões de Contaminação em Óleo  
de Transformador Através da Monitoração Acústica  
das Descargas Parciais**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica

**Área de Concentração:**  
Automação e Sistemas Elétricos  
Industriais

**Orientador:**  
Luiz Eduardo Borges da Silva

**Co-Orientador:**  
Ronaldo Rossi

Julho de 2011

Itajubá - MG

*“Antes do compromisso, há hesitação. A oportunidade de recuar, a ineficácia permanente. Em todo ato de iniciativa e de criação, há uma verdade elementar, cujo desconhecimento destrói muitas ideias e planos esplêndidos. No momento em que nos comprometemos de fato, a Providência age. Ocorre toda espécie de coisas para nos ajudar; coisas que de outro modo nunca ocorreriam. Toda cadeia de eventos emana da decisão, fazendo vir em nosso favor todo tipo de encontros, de incidentes e de apoio material imprevistos, que ninguém poderia sonhar que surgiria no caminho. Começa tudo o que possas fazer ou que sonhas poder fazer. A ousadia traz em si o Gênio, o Poder e a Magia.”*

*Goethe*

# *Agradecimentos*

---

A Deus, que me inspirou e me protegeu nesta jornada.

Ao meu orientador professor **Luiz Eduardo Borges da Silva**, conselheiro e um pouco pai, que não me deixou desanimar nos momentos mais difíceis, mantendo-me no caminho correto sem coibir minhas intuições.

Ao professor Ismael, que deu novo impulso a este trabalho, viabilizando-o através de sua incrível criatividade e tenaz persistência em resolver todos os problemas em nível de laboratório. Sem ele, este trabalho não teria sido concluído.

À filial da Alstom em Itajubá, Divisão de Transformadores de Medidas, nas pessoas do engenheiro Tiago Bueno e do técnico Mário Luiz Veloso, que nos abriu as portas de seu laboratório de análises físico-químicas, nos forneceu todas as amostras de óleo para os testes e respondeu com paciência às nossas dúvidas.

Aos professores Marcos Aurélio de Souza, coordenador do NUSEC (Núcleo de Separadores Compacto – IEM/Petrobrás/Unifei) e Luiz Fernando Barca, pesquisador do referido laboratório, bem como à supervisora de laboratório Maria Imaculada Alexandre Ueno, pelo fundamental apoio nos testes de Karl Fischer, imprescindíveis para os experimentos desta tese.

À CAPES pelo apoio financeiro.

# Sumário

---

Agradecimentos.....	3
Sumário.....	4
Resumo.....	7
Abstract.....	8
Lista de figuras.....	9
Lista de Tabelas.....	11
Notações e Abreviações.....	12
1 Introdução.....	13
1.1 Contexto.....	13
1.2 Hipótese e Metodologia.....	15
1.3 Organização do Documento.....	16
2 Contaminação do Isolamento do Transformador Por Umidade.....	18
2.1 Características Gerais do Isolamento Celulose/Óleo.....	18
2.1.1 A Celulose Como Isolante.....	18
2.1.2 O Óleo Isolante.....	20
2.2 A Contaminação por Umidade.....	22
2.3 Métodos de Medição da Umidade no Isolamento.....	26
2.4 Considerações sobre Umidade no Isolamento do Transformador.....	28
3 Descargas Parciais.....	29
3.1 Definição e Conceitos.....	29
3.1.1 Características das Descargas Parciais.....	30
3.1.2 Tipos de Descargas Parciais.....	32
a) Corona.....	32
b) Descargas em Cavidades.....	32
c) Trilhamento.....	33
d) Descarga Parcial em Líquidos.....	34
3.2 Descargas Parciais em Transformadores.....	34
3.3 Medição Acústica de Descargas Parciais em Transformadores.....	36
3.3.1 Definições.....	36
3.3.2 Sensores de Emissão Acústica.....	37
3.3.3 Sinal Acústico como Portador de Informações.....	38

3.4 Breve Histórico Sobre o Estudo de Descargas Parciais.....	40
3.5 Considerações Sobre Descargas Parciais e Medição Acústica.....	42
4 Processamento dos Sinais Acústicos – A Transformada Wavelet Discreta.....	43
4.1 O Sinal de Emissão Acústica.....	43
4.2 Transformada Wavelet Discreta.....	46
4.2.1 Análise de Multirresolução.....	46
4.2.1.1 Expansão de Sinais.....	46
a) Espaço de Sinais.....	47
b) Produto Interno.....	47
c) Norma.....	48
d) Ortogonalidade.....	48
e) Base Ortogonal de Sinais.....	48
4.2.1.2 Obtenção dos Coeficientes de Expansão.....	49
4.2.1.3 Recuperação do Sinal.....	50
4.2.2 A Transformada Wavelet Discreta.....	51
4.2.2.1 Wavelets.....	51
4.2.2.2 Expansão Wavelet e Multirresolução.....	53
4.2.3 O Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta.....	54
4.2.3.1 Expansão no Espaço $L^2(\mathbb{R})$ .....	54
4.2.3.2 A Função Escala.....	55
4.2.3.3 A Função Wavelet.....	58
4.2.3.4 Bancos de Filtros e a Transformada Wavelet Discreta.....	63
a) Análise.....	63
b) Síntese.....	67
c) Teorema de Parseval.....	70
4.2.3.5 Considerações sobre o Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta.....	70
5 Processamento e Interpretação dos Parâmetros – O PCA.....	72
5.1 Extração de Informações com o PCA.....	72
5.1.1 Descrição da Técnica PCA.....	72
5.1.2 Exemplo de Aplicação da Técnica PCA.....	75
5.2 Interpretação dos Componentes Principais.....	77
5.3 Considerações sobre o Processamento dos Parâmetros dos Sinais Acústicos.....	81
6 Experimentos e Resultados.....	82
6.1 O Aparato Experimental.....	82
6.2 Extração de Parâmetros dos Sinais Acústicos.....	85
6.3 Análise dos Dados Experimentais.....	85
6.4 Resultados.....	87
7 Conclusões.....	90
7.1 Conclusões e Contribuições.....	90
7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	91
Referências.....	92
Apêndice A.....	96
A.1 Resultados dos Experimentos com Óleo de Transformador.....	96

---

Apêndice B.....	102
B.1 Publicações.....	102

# *Resumo*

No setor elétrico, os transformadores de potência são componentes fundamentais e sua confiabilidade é um fator de vital importância para a operação do sistema. Um comportamento adequado destes transformadores depende em grande parte da saúde de seu isolamento. Sendo formado normalmente por óleo mineral e celulose, o sistema de isolamento é dinâmico, suas condições estão sempre se alterando dependendo do regime de funcionamento, de condições ambientais e da manutenção. Mantê-lo em boa forma depende de um bom programa de monitoramento das suas condições de modo a compor um sistema de diagnóstico e prognóstico que permita intervenções apenas quando necessário e evitando, assim, interrupções inesperadas. Dentre os diversos parâmetros que devem ser monitorados, o nível de umidade aparece como um dos mais importantes, uma vez que seu excesso, sob certas condições, pode destruir o equipamento ao provocar um curto-circuito. Assim, a avaliação da condição deste componente se torna uma necessidade que tem motivado o desenvolvimento de métodos inovadores na área de manutenção preditiva de transformadores. Esta tese apresenta uma metodologia não invasiva para detectar variações de umidade no óleo isolante. Para isso, aproveita a atividade de descargas parciais do transformador, utilizando seus sinais de emissão acústica para obter as informações necessárias. As descargas parciais são pequenos arcos elétricos que ocorrem no interior do isolamento, podendo ser detectadas por sensores acústicos instalados do lado de fora do transformador. Como essas emissões acústicas viajam pelo interior do equipamento, atravessando parte do sistema de isolamento, passam a transportar informações sobre seus percursos. Este trabalho mostra que é possível extrair aquelas informações relativas ao teor de umidade do óleo isolante a partir dos sinais acústicos. Estes sinais são processados de modo a obter parâmetros representativos e relacionados à umidade utilizando a Transformada Wavelet Discreta. Posteriormente, estes parâmetros são analisados com a técnica de Análise de Componentes Principais. Experimentos conduzidos em laboratório demonstram a viabilidade da técnica e abrem caminho para uma nova metodologia de monitoramento de condições totalmente não invasiva.

# *Abstract*

At the electric power sector, power transformers are key components and their reliability is very important for system operation. Proper behavior of these transformers depends largely on the insulation health. Normally being formed by mineral oil and cellulose, the insulation system is dynamic, its conditions are always changing depending on the operating regime, environmental conditions and maintenance. To keep it in good shape it is necessary a program to monitor their conditions in order to make a diagnosis and prognosis system that allows intervention only when necessary and thus avoid unexpected interruptions. Among several parameters that must be monitored, the moisture level appears as one of the most important, since when it is in excess, under certain conditions, it can destroy the equipment generating a short circuit. Thus, the condition assessment of this component becomes a requirement that has motivated the development of innovative methods in the field of predictive maintenance of transformers. This thesis presents a non-invasive method to detect variations of moisture in insulating oil. To do this, it takes the partial discharge activity and use its acoustic emission signals to obtain the necessary information. The partial discharges are small electrical arcs that occur inside the insulation, which can be detected by acoustic sensors installed outside the transformer. Since these acoustic emissions travel through the interior of the equipment, crossing part of the insulation system, they carry information about their routes. This work shows that it is possible to extract such information relating to moisture content of the insulating oil from the acoustic signals. These signals are processed to obtain representative parameters related to moisture using the Discrete Wavelet Transform. Then an analysis with the technique of Principal Component Analysis are performed. Experiments conducted on laboratory demonstrate the feasibility of the technique and pave the way for a totally new noninvasive methodology for condition monitoring.



# *Lista de figuras*

---

Figura 3.1: Esquema com os pontos de ocorrência de descargas parciais.....	30
Figura 3.2: Ocorrência de pulsos de descargas parciais no ciclo de tensão.....	31
Figura 3.3: Diferença entre a técnica de emissão acústica e o teste de ultrassom (SENSORES.GIF, 2011).....	36
Figura 4.1: Propagação da onda esférica no interior do transformador atingindo as paredes em diferentes instantes.....	45
Figura 4.2: Decomposição de um vetor geométrico.....	49
Figura 4.3: Forma de onda da wavelet Daubechies 2 (db2).....	51
Figura 4.4: Aninhamento de subespaços.....	57
Figura 4.5: Ilustração do conceito de complemento ortogonal.....	60
Figura 4.6: Aninhamento dos subespaços expandidos por bases formadas pelas funções escalas e pelas funções wavelets.....	62
Figura 4.7: Um nível do algoritmo de análise da Transformada Wavelet Discreta.....	66
Figura 4.8: Algoritmo de análise da Transformada Wavelet Discreta para 3 níveis de decomposição.....	67
Figura 4.9: Análise no domínio da frequência.....	68
Figura 4.10: Um estágio do algoritmo da Transformada Wavelet Discreta Inversa.....	69
Figura 4.11: Algoritmo de síntese para 3 estágios.....	70
Figura 5.1: Resultado do programa Matlab para as matrizes $M$ e $M'$ .....	76
Figura 5.2: Resultado do programa Matlab para a matriz de covariância.....	76
Figura 5.3: Autovalores e autovetores da matriz de covariância.....	77
Figura 5.4: Matriz $P$ de componentes principais.....	77
Figura 5.5: Scores obtidos para o exemplo da seção 5.1.2 utilizando o Matlab.....	78
Figura 5.6. Análise do primeiro componente principal do exemplo da seção 5.1.2.....	79
Figura 5.7. Análise do segundo componente principal do exemplo da seção 5.1.2.....	80
Figura 5.8. Análise do terceiro componente do exemplo da seção 5.1.2.....	81
Figura 6.1: A montagem experimental.....	82
Figura 6.2: Sistema de aquisição de sinais NI PXI-6133.....	83
Figura 6.3: Karl Fisher Mettler Toledo C20.....	84
Figura 6.4: Ilustração do processo de extração de parâmetros de um sinal acústico de descarga parcial.....	86
Figura 6.5: Análise de um PC qualquer.....	87

Figura 6.6: Análise de um PC satisfatório.....88

Figura 6.7: Histograma do número de sinais que confirmam a variação do teor de  
umidade nas amostras de óleo.....89

# ***Lista de Tabelas***

---

Tabela 5.1.: Dados do exemplo de aplicação da técnica PCA.....	75
Tabela 6.1: Medidas de umidade nas amostras de óleos dos experimentos.....	84
Tabela A.1: Resultados dos experimentos com óleo de transformador.....	96

# ***Notações e Abreviações***

---

DP: Descarga parcial

AET: *Acoustic Emission Technique* (técnica de emissão acústica)

UT: *Ultrasonic Test* (teste de ultrassom)

PCA: *Principal Component Analysis* (análise de componentes principais)

PC: Componente Principal

# 1

## *Introdução*

### **1.1 CONTEXTO**

---

Nos últimos anos, o desenvolvimento de programas de manutenção preditiva tem possibilitado a otimização das plantas industriais de modo a promover não só a redução de custos da manutenção em si, mas também melhorar a produtividade, a qualidade do produto e a eficiência da produção (MOBLEY, 2002). No setor elétrico, transformadores de potência são componentes fundamentais, sendo sua confiabilidade um dos fatores mais importantes na operação do sistema elétrico (STRACHAN et al., 2008). Os altos custos de reposição de peças ou do equipamento, ou ainda das paradas não programadas, exigem uma atitude pró-ativa das companhias de energia elétrica com relação à operação e manutenção de seus transformadores de potência. Assim, a manutenção preditiva contribui não só com a maior confiabilidade destes equipamentos, mas na redução de custos de manutenção, na eficiência energética e até mesmo na qualidade da energia. Sua implantação garante que a intervenção, tanto para reparos quanto para substituição, aconteça somente quando for efetivamente necessária e, ao se utilizar de técnicas não invasivas, não afeta a operação normal dos equipamentos. Esta abordagem de manutenção acaba por exercer papel importante na rentabilidade econômica do sistema elétrico, melhorando o desempenho e aumentando a vida útil dos equipamentos, postergando ao máximo os investimentos para sua reposição. Além disso, a manutenção preditiva dos transformadores de potência reduz significativamente os riscos de interrupções não programadas de energia, as quais, sabidamente, geram grandes prejuízos.

Descargas parciais são minúsculos arcos elétricos ocorrendo no interior de sistemas de isolamento de equipamentos elétricos, principalmente os de alta-tensão. Surgem devido a problemas construtivos (NATTRASS, 1993), desgaste por envelhecimento ou sobrecarga (HASSAN et al., 2004) e representam uma fonte importante de

problemas ao longo da vida útil do equipamento elétrico. Elas podem se desenvolver em qualquer tipo de isolamento seja ele sólido, líquido, gasoso, ou uma combinação destes. Sua atividade se mantém em níveis aceitáveis por um longo período, sendo importante monitorá-la para permitir um desempenho apropriado do sistema de isolamento. Desta forma, a manutenção preditiva dos transformadores de potência, através da monitoração das descargas parciais, pode ser de grande utilidade para prolongar ao máximo a vida útil do isolamento, com intervenções apropriadas e pertinentes, nos momentos certos e com o procedimento correto determinado pelo processo de avaliação das condições operacionais reais do equipamento.

A ocorrência de uma descarga parcial leva ao aparecimento de um pulso de corrente entre o condutor, isolamento e aterramento (BOGGS, 1990). Cada tipo de equipamento elétrico e respectivo sistema de isolamento determinam a forma como esse pulso de corrente ocorre e, conseqüentemente, o método a ser usado para sua detecção e quantificação (BARTNIKAS, 2002). Este pulso de corrente não é a única manifestação da descarga parcial. Sua ocorrência também deixa rastros químicos devido à queima do isolamento no local, o que permite detectar sua atividade através da análise de gases dissolvidos no óleo. Além disso, há ainda a liberação de ondas acústicas que percorrem o isolamento e chegam à carcaça, podendo ser detectadas através de sensores acústicos com faixa de operação na região do ultrassom (LUNDGAARD, 2002). A análise destas emissões acústicas pode revelar não somente a atividade de descargas parciais, mas também, sua intensidade e, o que pode ser uma vantagem em relação aos métodos eletromagnéticos, sua localização dentro do equipamento (MARKALOUS; FESER, 2004); (AUCKLAND et al., 1994). A assinatura espectral destas ondas pode revelar os caminhos percorridos no interior do equipamento (SAKODA et al., 1999) (SAKODA, et al., 2001), bem como suas condições, permitindo estimar a localização da fonte emissora e o estado do material isolante (HASSAN et al., 2004).

O monitoramento dos sinais acústicos emitidos pelas descargas parciais permite o desenvolvimento de técnicas não invasivas de manutenção de transformadores. Estas técnicas se baseiam em ferramentas de processamento de sinais e análise estatística. A Transformada Wavelet Discreta pode ser usada para o processamento dos sinais acústicos produzidos pelas descargas parciais, que possuem a característica de serem não estacionários e, possivelmente, não lineares (HUANG et al., 1998). Existem ainda ou-

tros métodos que podem aumentar em muito a capacidade de caracterização das falhas, como é o caso das técnicas de processamento estatístico de sinais, mais especificamente a Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* - PCA). A análise das características extraídas é de fundamental importância para a interpretação dos sinais coletados de forma a reconhecer os padrões de defeitos em evolução no interior do transformador monitorado.

Estas técnicas, aplicadas aos sinais acústicos das descargas parciais em transformadores de potência, permitem obter um sistema de diagnóstico e prognóstico, fornecendo informações para que o pessoal técnico da manutenção tome decisões (MOBLEY, 2002) sobre quando deve ser feita uma interrupção para intervenção no equipamento ou remoção de operação antes da falha, já sabendo onde e qual seria exatamente o problema do transformador. O objetivo deste trabalho é, explorando os sinais acústicos das descargas parciais, aplicar as técnicas citadas no desenvolvimento de uma metodologia de extração de informações sobre o óleo isolante dos transformadores de uma maneira não invasiva.

## **1.2 HIPÓTESE E METODOLOGIA**

O envelhecimento normal ou acelerado dos isolantes, a deterioração provocada pelas descargas parciais e a contaminação do óleo causam alterações nas características dinâmicas do sistema formado pela estrutura metálica do transformador de potência e pelo seu isolamento. A hipótese que orienta este trabalho é a de que há possibilidade de se detectar a modificação da resposta dinâmica deste sistema analisando-se os sinais de emissão acústica produzidos pelas descargas parciais (CHAI et al., 2006) (HASSAN et al., 2004), modificação esta causada especificamente pelo aumento do teor de umidade no óleo isolante. Considerando-se o fato de que as descargas parciais produzem ondas acústicas que atravessam o isolamento e a estrutura até atingirem as paredes do transformador onde podem ser detectadas, os sinais obtidos deste processo podem revelar, através de uma análise de seu conteúdo de frequência e de sua variação no tempo, aquelas mudanças que se relacionarem com as modificações de umidade no isolamento. Este diagnóstico específico sobre a umidade do óleo isolante

foi escolhido devido à importância da medição deste parâmetro, uma vez que traz informações sobre o envelhecimento do isolamento e sobre o estado da contaminação, ambas relevantes para uma manutenção adequada do equipamento em questão. Como a atividade das descargas parciais em um transformador, uma vez iniciada, tende a permanecer até o fim da vida útil do isolamento (NATTRASS, 1993), sempre há disponibilidade destes sinais para a monitoração do sistema de isolamento, desde que os sensores utilizados tenham sensibilidade suficiente para a detecção.

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho está focada em experimentos com óleos isolantes contaminados com umidade e na análise dos sinais acústicos de descargas parciais provocadas em seu interior. A análise consiste na aplicação da Transformada Wavelet Discreta para extração de características e no uso da Análise de Componentes Principais para interpretação dos parâmetros extraídos. Os experimentos são feitos num recipiente preenchido com óleo isolante onde um dispositivo gerador de arcos elétricos num *gap* de dimensões reduzidas é inserido e descargas parciais são geradas em amostras de óleo de transformador com diferentes teores de umidade.

O objetivo desta tese é o de mostrar a viabilidade da extração de informações sobre o óleo isolante utilizando-se sinais acústicos de descargas parciais. Outros trabalhos podem dar continuidade ao desenvolvimento deste método, ampliando sua capacidade de detecção de contaminantes, bem como estabelecendo um indicador quantitativo do grau de contaminação.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO**

---

Este documento inicia seus argumentos pela apresentação do problema da contaminação de umidade no óleo isolante (capítulo 2), suas principais características e como pode ser monitorado pelos métodos atuais. Para isto, apresenta as características do sistema de isolamento composto por celulose e óleo mineral. Também são discutidos os mecanismos de absorção de umidade e os estados em que a água pode aparecer naqueles isolantes.

No capítulo 3, é apresentado o fenômeno da descarga parcial, o que é, como se comporta, como pode ser medida e como a indústria tem tratado deste problema ao



longo do tempo. Atenção especial é dada à medição de descargas parciais por métodos acústicos com destaque para a capacidade de obter informações sobre os meios pelos quais as ondas mecânicas se propagam.

O capítulo 4 trata da Transformada Wavelet Discreta, abordando-a sob o enfoque da multirresolução e com tratamento matemático voltado para a obtenção dos algoritmos necessários à implementação em computadores.

O capítulo 5 se concentra na ferramenta de análise dos dados, o PCA. É apresentado um breve embasamento matemático voltado para a compreensão de seus mecanismos internos de busca por padrões em grandes conjuntos de dados. Seu algoritmo é apresentado, bem como uma proposta para interpretação de seus resultados visando a identificação de padrões de dados correlacionados com fenômenos que se deseja identificar.

No capítulo 6 são descritos e discutidos o experimento e seus resultados. Detalhes da extração de características dos sinais acústicos bem como a forma de interpretação dos resultados da análise são apresentados, com destaque para o modo como a hipótese é comprovada.

A tese é finalizada no capítulo 7 com as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

# 2

## *Contaminação do Isolamento do Transformador Por Umidade*

### **2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ISOLAMENTO CELULOSE/ÓLEO**

---

A combinação da celulose com o óleo mineral tem sido usada comercialmente desde a década de 1920. As boas propriedades mecânicas e elétricas da celulose, bem como sua disponibilidade somadas a características isolantes e de arrefecimento do óleo mineral têm feito desta combinação um isolante melhor do que seus componentes quando considerados individualmente. A análise de cada um destes materiais dá uma boa compreensão de seu comportamento frente a contaminações por impurezas, especialmente a água, que pode reduzir drasticamente suas propriedades de isolamento elétrico e acelerar sua degradação.

#### **2.1.1 A Celulose Como Isolante**

O principal material usado como isolamento sólido em equipamentos elétricos em geral é a celulose, na forma de papel Kraft e *pressboard*. As razões para a escolha da celulose são suas propriedades mecânicas e elétricas, bem como sua disponibilidade e custo. Além disso, ela se comporta muito bem em combinação com o óleo mineral, permitindo o preenchimento de vazios ou cavidades em sua estrutura, o que reduz o desen-

volvimento de descargas parciais. As funções do isolamento sólido num transformador incluem, além da isolação elétrica, estabilidade mecânica, criação de espaços e direcionamento do fluxo de óleo.

Atualmente, a celulose é usada em todo tipo de transformadores. Porém, antes da década de 1920, outros tipos de materiais poderiam ser encontrados nestes equipamentos além da celulose, como alguns materiais têxteis (PREVOST; OOMMEN, 2006). Entre 1920 e 1930, várias experiências foram feitas com a combinação da celulose com óleo mineral até que, na década de 1940, o papel Kraft impregnado de óleo se tornou o principal isolante nos transformadores de alta tensão. Somente em 1950 é que se iniciam as pesquisas de materiais sintéticos. O papel Kraft do tipo crepe foi introduzido na década de 1970 pela Denninson Paper Company, motivado pela necessidade de um papel mecanicamente mais resistente para isolar o enrolamento dos transformadores. Esta variação do papel Kraft pode ser esticada em até 20% além do seu comprimento normal sem se romper. Apesar das pesquisas de outros materiais, a celulose ainda prevalece na escolha dos fabricantes de transformadores.

Uma preocupação significativa das concessionárias de energia elétrica é a vida útil de seus equipamentos. Num transformador de potência, o papel é o elemento chave nesta questão, pois pode degradar-se mecânica e eletricamente de forma acelerada em condições de calor excessivo gerado por sobrecargas. Assim, a partir da década de 1960, iniciou-se o tratamento térmico da celulose, o que possibilitou um aumento da vida útil em, no mínimo, três vezes em relação ao papel normal. Este tratamento é feito com agentes químicos (compostos de amina), principalmente o *dicyandiamide*, conhecido como “dicy” (PREVOST; OOMMEN, 2006). Com isto, o papel passa a suportar temperaturas de 20°C a 30°C acima do que um papel não tratado suportaria sem se degradar. Além do tratamento térmico, tentativas de modificações da celulose foram feitas visando aumentar sua vida útil. Neste caso, a direção seguida era a de redução da higroscopia, pois a umidade também tem influência na degradação do papel (OOMMEN; PREVOST, 2006). Porém, essas tentativas resultaram em processos de alto custo e o tratamento térmico é o que prevalece na busca por um material a base de celulose com maior vida útil.

O *pressboard*, um tipo de cartolina ou papel prensado misturado com fibra

de algodão, é usado principalmente em equipamentos de alta tensão. A principal aplicação é na forma de espaçadores nos enrolamentos. Sua característica mais valiosa é a boa rigidez dielétrica devido às camadas de óleo e celulose (quando impregnado) que se formam em sua estrutura. Também pode ser usado para direcionar o fluxo de óleo no interior do transformador e para formar sistemas de barreiras com o objetivo de subdividir canais de óleo sob grande estresse elétrico em *gaps* menores, o que permite reduzir as dimensões do equipamento.

A molécula da celulose tem a fórmula geral  $(C_6H_{12}O_5)_n$  e sua estrutura confere características de alta porosidade. Assim, o papel e o *pressboard* são muito higroscópicos e bons secadores do ar e do próprio óleo isolante. Estes materiais, ao entrarem em contato com um óleo com algum teor de umidade, tendem a absorvê-la até um ponto de equilíbrio (MILASCH, 1984), o que significa que o contrário também pode ocorrer, ou seja, a água pode passar da celulose para o óleo. Uma forma de reduzir a higroscopia é impregnar a celulose com verniz ou resina antes da impregnação com óleo de modo a retardar a absorção de água, mas isto pode levar à formação de vazios (cavidades), o que facilita a ocorrência de descargas parciais.

A rigidez dielétrica da combinação do óleo com a celulose pode chegar a quatro vezes a rigidez do óleo sozinho. Esta combinação também contribui com a estabilidade térmica do papel ou *pressboard* e com o preenchimento de cavidades no interior do isolamento. Portanto, trata-se de um excelente sistema de isolamento, devidamente ajustado e adaptado ao longo do tempo para ser usado em grandes transformadores de potência. Porém, sua estrutura requer cuidados especiais para evitar uma degradação prematura devida ao calor e à umidade.

### 2.1.2 O Óleo Isolante

O óleo mineral usado como isolante em transformadores foi introduzido em 1892 pela GE (PREVOST; OOMMEN, 2006). É usado até hoje devido à sua disponibilidade, baixo custo, boas propriedades e por se combinar bem com a celulose, produzindo um excelente sistema de isolamento. Num transformador de potência, o óleo isolante tem duas principais funções: isolamento elétrico e distribuição ou controle de temperatura (ROUSE, 1998).

O óleo isolante mineral é produzido pelo refino (destilação) do petróleo cru. Os métodos de refino são praticamente os mesmos usados na produção de óleos lubrificantes e cada empresa produtora possui sua própria tecnologia. Isto faz de cada óleo um produto único, o que exige normas para controlar os requisitos mínimos para um óleo ser usado como isolante elétrico de transformadores. A norma vigente é a ASTM D3487, porém, os fabricantes de transformadores podem impor ainda mais requisitos. Também há normas para medição das características do óleo. O comitê ASTM D27 define métodos de medição dessas propriedades do óleo isolante. Os requisitos definidos pelas normas são, portanto, uma maneira de comparar diferentes produtos, além de assegurar que um determinado óleo possui características relevantes para o equipamento a que se destina (ROUSE, 1998). Estas características podem ser agrupadas em três categorias: físicas, moleculares e dielétricas.

As principais características físicas do óleo isolante são:

- viscosidade: principal parâmetro para cálculos de transferência de calor;
- ponto de fluidez (*pour point*): é a temperatura abaixo da qual o óleo não mais se move devido ao espessamento sob condições específicas;
- ponto de inflamação (*flash point*): temperatura na qual um gás evaporando de um líquido exposto ao ar pode se inflamar.

As características moleculares importantes são:

- principais classes de hidrocarbonetos presentes: é impraticável determinar todos os hidrocarbonetos presentes no óleo mineral, mas é possível definir quais das grandes classes estão presentes; são elas os alcanos, os naftenos e os hidrocarbonetos aromáticos.
- limites de contaminantes: pode-se determinar quais os níveis aceitáveis de contaminantes no óleo; compostos contendo oxigênio, nitro-

gênio e enxofre são responsáveis pela oxidação; sulfuretos, dissulfuretos e *mercaptans* podem reagir com o cobre; ácidos orgânicos podem atacar alguns materiais no transformador e contribuem para a redução da tensão interfacial; moléculas orgânicas polares (álcoois, aldeídos e cetonas) podem se oxidar e se transformar em ácidos; a umidade pode existir no óleo em diferentes formas dependendo da temperatura, da quantidade e do refino, e pode reduzir a rigidez dielétrica.

As principais características dielétricas são:

- rigidez dielétrica;
- evolução de gases;
- tensão de ruptura por impulso.

Uma outra função que o óleo pode desempenhar num transformador é a de portador de informação. Ele pode agir como solvente que reage a todas as condições de operação do transformador, carregando produtos de degradação como partículas, compostos furânicos, água, ácidos e gases. A análise destes subprodutos, sua simples presença ou sua taxa de evolução, pode fornecer um indicativo das condições do transformador.

## **2.2 A CONTAMINAÇÃO POR UMIDADE**

---

A água é a inimiga número um dos materiais isolantes. Ela influencia negativamente todas as propriedades dielétricas. A celulose úmida tem sua resistência mecânica reduzida e, sob estresse térmico, tende a se deteriorar muito rapidamente. Considera-se, portanto, a umidade na celulose como um dos maiores inconvenientes num transformador (ARAKELIAN; FOFANA, 2007).

O papel age como um reservatório no sistema de isolamento, onde a água

está constantemente em estado dinâmico num transformador em operação (WEBB, 1997). A umidade pode entrar no isolamento através do ar, quando o óleo tem liberdade de contato com a atmosfera. O envelhecimento do papel gera água como subproduto das reações químicas deste processo, sendo esta a fonte mais comum do aumento do teor de umidade num transformador. Como o envelhecimento está ligado à temperatura, transformadores que operam com pouca carga tendem a ter uma taxa de crescimento de umidade menor e, conseqüentemente, uma vida útil maior (WEBB, 1997).

Além da aceleração da degradação, a umidade afeta principalmente as propriedades dielétricas do material isolante. A presença de água aumenta o fator de potência da celulose, sendo esta uma das formas de se estimar o teor de umidade (MILASCH, 1984). No óleo, a rigidez dielétrica é grandemente afetada pela presença de água. Por exemplo, um óleo com 120ppm de água a 75°C tem sua rigidez dielétrica diminuída em 26,5% em relação a um teor de 10ppm (MILASCH, 1984). Em qualquer situação, é imperativo manter sob controle a quantidade de umidade presente no isolamento.

A água num sistema de isolamento pode aparecer em três estados possíveis, cada um deles com seus respectivos estados físicos (ARAKELIAN; FOFANA, 2007):

- água dissolvida: é considerada água dissolvida quando há moléculas individuais difundidas no óleo (estado de distribuição molecular) ou quando há a formação de pequenos agrupamentos de moléculas de água, mas não o suficiente para que apresentem as propriedades da água líquida (estado associado);
- água dispersa: quando surgem pequenos aglomerados de água com tamanhos limitados aos de coloides (estado coloidal) ou quando há formações macro dispersas já apresentando as propriedades da água líquida (estado de emulsão), determinando a heterogeneidade do meio;
- *bound-water*: corresponde a todos os estados possíveis convivendo simultaneamente.

Do ponto de vista físico-químico, a água pode aparecer nos seguintes estados, por ordem crescente de força de ligação e decrescente de concentração:

- estado aglomerado: compostos de óleo ligados a água por pontes de hidrogênio;
- estado adsorvido: fisiosorção (adsorção física) da água por impurezas sólidas através de forças de Van der Waals;
- estado de clatrato: moléculas de água incluídas em cavidades de uma rede (estrutura de malha) constituída pelas moléculas dos compostos presentes no óleo, principalmente impurezas;
- estado quimiosorvido: quimiosorção (adsorção química) da água na estrutura das moléculas de compostos presentes no óleo através de ligações químicas, como a covalente, formando hidratos.

Os estados descritos acima são genéricos e podem aparecer de forma diferente quando o óleo isolante está de algum modo “poluído” (com impurezas resultantes da degradação do isolamento). Quando se trata de óleo novo, tem-se um líquido fracamente polarizado, com seus compostos polares distribuídos uniformemente provocando algum cancelamento das forças de indução. Nestas condições, as moléculas de água, que são polares, tendem a ficar livres para se moverem no óleo, uma vez que as ligações com aqueles compostos são efêmeras. Isto constitui uma condição de alta solubilidade (ARAKELIAN; FOFANA, 2007), pois há poucas possibilidades das moléculas de água se aglomerarem. Portanto, um meio levemente polar reduz a possibilidade da água ser adsorvida por impurezas sólidas presentes nesse meio ou de se condensar nos poros do isolante sólido (celulose).

Um óleo considerado poluído adquire seus poluentes durante sua operação, principalmente sob condições de estresses térmico e elétrico. Estes poluentes tornam o óleo isolante uma substância extremamente complexa, influenciando fortemente sua relação com a água. Em geral, eles são compostos iônicos e polares e influenciam significativamente as propriedades elétricas do óleo, pois passam a ser os principais portadores de carga em seu interior. A água pode ligar-se quimicamente aos poluentes através de hidratos e clatratos ou fisicamente com as partes polares das impurezas orgânicas.



Como esta condição de óleo é o que se encontra na realidade dos transformadores em uso, é interessante listar os estados do conteúdo de água por ordem crescente de concentração e decrescente de força de ligação com outras moléculas:

1. *bound-water*, química e fisicamente ligada;
2. água dissolvida;
3. água dispersa;
4. água livre.

Com exceção da *bound-water* quimicamente ligada, todos os estados estão em equilíbrio em torno do estado dissolvido. Este equilíbrio é completamente influenciado pela temperatura do óleo e também depende da quantidade de água presente. Inicialmente, a água estará no estado *bound-water*, e conforme a quantidade aumenta, este tipo de ligação fica de certa forma saturada e surge a água dissolvida. Seguindo este raciocínio, conforme o aumento da quantidade de água, os outros estados vão surgindo até chegar à água livre. A influência da temperatura aparece na “saturação” de cada um dos estados, ou seja, com o aumento da temperatura, a água em estado livre começa a passar para o estado disperso. O mesmo ocorre do estado disperso para o dissolvido e deste para a *bound-water*, o que pode ser entendido como o aumento da capacidade de cada estado com a temperatura. É importante ressaltar que a água livre representa um grande perigo para um transformador em operação, podendo causar uma falha catastrófica por curto-circuito devido a uma queda significativa na rigidez dielétrica do isolamento (BUERSCHAPER et al., 2003).

Na celulose, a água está presente nos seguintes estados:

- vapor;
- água adsorvida: pode estar adsorvida numa única camada (*monolayer*), em camadas polimoleculares ou condensada em capilares;
- livre: ocorre quando a umidade relativa está em 100% (presença de sedimentos), o que é raro em equipamentos elétricos em operação

(ARAKELIAN; FOFANA, 2007).

A porosidade, nos isolamentos à base de celulose, determina sua propriedade de forte adsorvente polar. A adsorção inicia-se com a formação de uma camada monomolecular e, conforme mais água é adquirida, outras camadas vão se formando, podendo chegar a dezenas delas. À medida que estas camadas de água se distanciam da superfície do material celulósico, mais propriedades de água livre elas adquirem. Por fim, excessos de saturação de água (acima de 60% de umidade relativa) levam à condensação em poros, seguida da condensação em capilares.

A celulose exerce uma função importante como adsorvente de água. Ela age como filtro das impurezas polares do óleo, pois estas se ligam mais fortemente à celulose do que à água. Após algumas interações entre as impurezas conectadas à água e a celulose, esta acaba capturando as impurezas. Um fato que merece destaque é que somente a água em estado dissolvido é capaz de ser adsorvida pela celulose. Água em estado disperso ou livre não se liga ao papel ou *pressboard*. Portanto, a partir destas informações e do que foi apresentado sobre o equilíbrio dos estados, conclui-se que todas as transformações de água no isolamento devem passar primeiro pelo estado dissolvido.

## **2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA UMIDADE NO ISOLAMENTO**

Não são muitos os métodos de medição da umidade no isolamento de equipamentos elétricos, especialmente grandes transformadores de potência. Para se conhecer o conteúdo total de umidade num equipamento elétrico, é preciso saber a quantidade de água no isolamento sólido e a quantidade de água no óleo. Obviamente, é inviável drenar um transformador apenas pra saber o que há de água no papel, assim como manter sensores internamente para se obter estas informações, dada a impossibilidade de manutenção dos mesmos. O que é usualmente feito, é medir a umidade do óleo isolante e estimar a quantidade de água na celulose com base nos conhecimentos de equilíbrio dos estados da água, principalmente em função da temperatura. Então, os métodos são voltados à medição da umidade no óleo e são poucas as opções. A mais importante delas é o método de Karl Fischer. Outras opções ainda são alternativas que não foram to-

talmente aceitas por fabricantes de equipamentos elétricos e concessionárias de energia elétrica, como a medição da umidade relativa.

Os métodos mais aceitos, como o de Karl Fisher, se baseiam em coletar uma amostra de óleo do equipamento, levar ao laboratório e medir seu teor de umidade. Desta forma, além do Karl Fisher, há o método gasoso e o cromatográfico. Porém, estes dois últimos não têm a mesma precisão e confiabilidade do anterior, no qual será concentrada esta discussão. O método de Karl Fisher é a titulação coulométrica, e está baseada na oxidação de  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) por  $\text{I}_2$  (iodo) na presença da água. Ele emprega um reagente preparado pela ação do dióxido de enxofre sobre uma solução de iodo numa mistura de piridina anidra e metanol anidro. A titulação mais adequada é feita com o amperímetro com corrente sob tensão contínua (MILASCH, 1984). Os níveis de corrente elétrica estão na faixa de microamperes e os eletrodos utilizados devem ser de platina. Cuidados devem ser tomados para evitar a contaminação do reagente e da amostra pela umidade atmosférica, devendo todos os materiais envolvidos serem secados antes da execução do método. Este é o ponto fraco de toda a metodologia baseada na coleta de amostras e posterior medição em laboratório. Como aponta (XINGANG et al., 2008), além da demora em se obter o resultado, o conteúdo de umidade pode mudar durante a coleta, o transporte e a manipulação da amostra. Assim, apesar de toda a precisão e confiabilidade do método de Karl Fisher, os resultados podem ser inconsistentes.

Dados os problemas com coleta e transporte de amostras de óleo, busca-se, portanto, por métodos de medição em tempo real, com sensores que forneçam resultados instantaneamente. Há algumas opções, mas nenhuma ainda confiável. Em (XINGANG et al., 2008) há a proposta de uma metodologia baseada na medição da umidade relativa. Trata-se da colocação de um sensor de poliamida em contato com o óleo. O método se baseia na medição da constante dielétrica do material do sensor que varia com a umidade relativa. Um fator importante é a temperatura que influencia diretamente a solubilidade da água no óleo e deve ser medida para que o resultado seja confiável. Testes feitos em diferentes temperaturas apontaram erro de medição de no máximo 4% quando comparados com testes em laboratório. O maior problema deste método é onde colocar o sensor, o que faz deste método algo um tanto invasivo. Antes desta proposta, um sensor de umidade relativa já tinha sido citado em (DU et al., 2001), mas para uso

em laboratório. Neste trabalho, os autores acrescentam a necessidade de se usar o sensor dentro de sua faixa de linearidade. De qualquer modo, ainda persistem as questões de ser invasivo ou da contaminação da amostra.

## **2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE UMIDADE NO ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR**

---

A presença de umidade no isolamento do transformador, em maior ou menor grau, é inevitável. Dadas as características dos materiais isolantes predominantes nestes equipamentos, celulose e óleo, bem como seus métodos de fabricação, é inviável ou mesmo impossível a eliminação total deste contaminante. Portanto, uma vez conhecidas as consequências da presença de excesso de água no isolamento, resta às equipes de manutenção monitorar e manter o teor de umidade abaixo dos níveis aceitáveis. Além deste controle, pode-se tirar proveito das medições de umidade para obter informações a respeito do estado do equipamento, principalmente quanto ao regime de uso e ao envelhecimento. A principal questão recai, portanto, na medição da umidade do óleo isolante. Este é um dos assuntos de que trata esta tese.

# 3

## *Descargas Parciais*

### **3.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS**

---

A descarga parcial (DP) é um fenômeno que ocorre numa grande variedade de equipamentos elétricos e se desenvolve lentamente ao longo do tempo culminando com a falha total do sistema de isolamento. Ela ocorre de modo invisível na maioria das vezes, podendo ser percebida apenas por medições externas de sinais eletromagnéticos, acústicos ou químicos. Devido ao seu comportamento sorrateiro, há grande necessidade de monitoramento e controle de sua atividade, o que deve consistir de uma efetiva manutenção preditiva dos equipamentos.

Uma descarga parcial é a ação de um pulso elétrico ou descarga elétrica que ocorre no interior de um material isolante sob um campo elétrico. Este pulso ou descarga fecha apenas parcialmente o circuito entre as partes condutoras isoladas, daí o nome descarga parcial. A DP pode ser gerada por vários tipos de mecanismos. De uma maneira geral, ela ocorre devido a uma mudança rápida na configuração do campo elétrico devido a algum tipo de atividade interna ao sistema. Esta mudança leva ao aparecimento de uma corrente elétrica que flui em um condutor conectado com o exterior do equipamento, sendo a manifestação mais comum e mais explorada para medições de DP. Porém, sua ocorrência pode ser detectada através de outras manifestações, como o aparecimento de uma onda acústica que percorre todo o isolamento e a estrutura do equipamento, ou o rastro da queima do material dielétrico, liberando algumas substâncias que ficam misturadas ao isolamento, como alguns gases dissolvidos em óleo de transformador. Estas diferentes manifestações da atividade de DP são exploradas pelos diversos métodos de medições existentes.

O monitoramento da atividade de descarga parcial torna-se vital para garantir uma maior vida útil de equipamentos elétricos de grande porte, como os transforma-

dores de potência, além de se evitar surpresas devidas a falhas de construção que podem acelerar o processo de destruição do isolamento pelas descargas parciais.

### 3.1.1 Características das Descargas Parciais

Compreender as características das descargas parciais permite uma melhor escolha do método de medição para determinado equipamento, bem como proporciona informações úteis para a intervenção e correção do problema. De uma maneira geral, dependendo da forma como a DP está se manifestando, pode-se inferir não só a gravidade do problema como suas possíveis causas.

Em geral, a descarga parcial pode ocorrer em qualquer ponto do isolamento, seja no interior, na interface com o condutor ou com a carcaça aterrada, ou na superfície, conforme Fig. 3.1. As descargas são minúsculos arcos que ocorrem nos pontos indicados, causando a deterioração do material dielétrico no local. Elas geram pulsos de alta frequência, característica responsável pela grande atenuação do sinal elétrico da DP ao longo do circuito para terra, dependendo do equipamento (transformadores, por exemplo). Na superfície de isolantes sólidos, as descargas parciais levam ao aparecimento de trilhas.

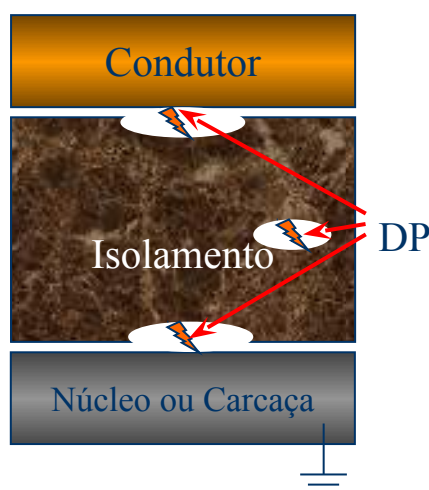


Figura 3.1: Esquema com os pontos de ocorrência de descargas parciais.

As descargas parciais ocorrem predominantemente no primeiro e no terceiro quartos do ciclo de tensão (PAOLETTI; GOLUBEV, 2001), conforme Fig. 3.2 (os pulsos

estão exagerados na ilustração). Nestes quartos de ciclo, acontece o crescimento do valor da tensão. O sistema elétrico formado pelos condutores e isolamento age como um capacitor sendo carregado até o ponto em que começam a aparecer as descargas parciais. Elas podem ser medidas como pulsos de tensão de alta frequência e baixa intensidade. No primeiro quarto do ciclo de tensão, a descarga resulta num pulso negativo (ou orientado para baixo). Este pulso é chamado de descarga parcial de polaridade negativa. No terceiro quarto do ciclo, a DP resulta num pulso orientado para cima, ou positivo, sendo chamado de descarga parcial de polaridade positiva. Estes pulsos são da ordem de milivolts para tensões de algumas unidades de volts. Embora apareçam na Fig. 3.2 como um pulso para cada quarto de ciclo, na verdade eles aparecem em grandes quantidades, sendo sua contagem dentro dos quartos de ciclo um dos parâmetros medidos.

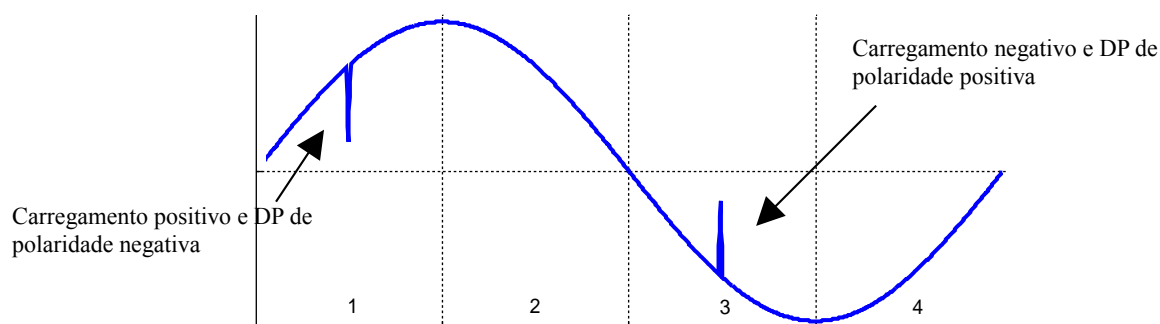


Figura 3.2: Ocorrência de pulsos de descargas parciais no ciclo de tensão.

No quadro geral do monitoramento de descargas parciais, observa-se que seu comportamento pouco antes da falha total do isolamento é o de uma queda na sua atividade. Isto se deve à carbonização do dielétrico pelas descargas, que leva à redução da resistência do isolamento, aumentando a corrente de fuga. Este aumento na corrente de fuga consome boa parte da energia usada nas descargas parciais, porém aumenta o calor dissipado, acelerando a deterioração do isolamento. As trilhas superficiais são também resultados desta passagem de corrente de fuga na superfície do isolante. Depois da formação destas trilhas, a deterioração do isolamento já pode ser detectada através de testes tradicionais de resistência do isolamento (PAOLETTI; GOLUBEV, 2001).

Com relação à medição elétrica de descargas parciais, o meio isolante age

como um atenuador para o sinal de DP, reduzindo sua amplitude e distorcendo a sua forma de onda. Além disso, o intenso ruído eletromagnético pode mascarar o sinal de DP.

Portanto, sabendo como as descargas parciais se manifestam, não apenas de forma localizada, mas de uma maneira geral, conhecendo seu comportamento ao longo do tempo, pode-se inferir sobre o estado do equipamento monitorado e, até mesmo, antecipar possíveis falhas, o que representa uma grande economia nos custos de manutenção.

### **3.1.2 Tipos de Descargas Parciais**

Há diversos tipos de descargas parciais. Elas aparecem com maior ou menor frequência dependendo do tipo de equipamento e de sistema de isolamento.

#### **a) Corona**

A corona é uma DP que ocorre em meios gasosos. Ela é considerada um tipo de DP porque a ruptura do gás se inicia numa posição onde o campo elétrico é muito alto no sistema, mas desaparece devido ao fato da intensidade do campo decair rapidamente como função da distância. (Daí ela ser uma descarga parcial, pois não completa o caminho do curto-circuito.) O motivo do decréscimo do campo elétrico pode ser o tamanho diminuto da região de campo de alta intensidade, o que inibe a formação de um canal de ruptura completo, ou a natural redução da intensidade devido à distância para o condutor, impedindo a propagação do canal de ruptura.

A corona propriamente dita é “uma região (parcialmente) ionizada adjacente a um condutor” (BOGGS, 1990). Esta região ionizada se forma devido à grande intensidade do campo elétrico de forma que, quando um elétron livre aparece, há uma avalanche na criação de outros elétrons livres e, obviamente, de íons positivos, culminando com uma corrente na região ionizada. A corona no ar é sensível à velocidade dos ventos e a condições ambientais.

#### **b) Descargas em Cavidades**

É, provavelmente, o tipo mais importante. Pode ser detectado de formas não



elétricas, por meios acústicos e por meios ópticos. O mecanismo de DP em cavidades não é trivial. Ele é explicado aqui de forma apenas conceitual.

Seja uma cavidade presente num dielétrico sólido entre dois eletrodos submetidos a uma tensão alternada. Naturalmente, surge um campo elétrico nesta cavidade que, se for suficientemente intenso, quando aparecer um elétron livre, provoca uma ruptura do gás dentro da cavidade, com conseqüente ionização. Esta ionização tende a derrubar a intensidade do campo elétrico para sustentar a ruptura, podendo chegar a valores próximos de zero, o que faz a cavidade parecer um condutor, levando a um aumento na capacitância entre os eletrodos (BOGGS, 1990). Após a extinção da descarga, que ocorre devido à queda da intensidade do campo (que foi a causa inicial), restam ainda os íons que se encaminham para as paredes da cavidade numa tentativa de manter o campo elétrico baixo, ainda próximo de zero, o que realmente acontece. Isto faz com que as cargas elétricas que fluíram da fonte de potência para os eletrodos permaneçam neles após a descarga. Este fluxo de cargas pode ser calculado analiticamente e numericamente para muitos casos. É ele o responsável pelo sinal elétrico de DP que é medido externamente. A escala de tempo para esta DP é de 1 a 3 nanossegundos.

As cavidades em dielétricos líquidos são efêmeras e aparecem em regiões de intenso campo elétrico dentro do material dielétrico. Acredita-se (POMPILI et al., 2005) que são formadas por avalanches de elétrons nestas regiões, que causam a geração de gases formando uma bolha que cresce até poder sustentar as descargas parciais. Estas, por sua vez, contribuem para a expansão da bolha/cavidade até que ela sucumbe diante da pressão hidrostática ao seu redor. As descargas parciais nestas cavidades também produzem pulsos de tensão que podem ser detectados nos terminais do equipamento.

### **c) Trilhamento**

Descargas parciais em dielétricos sólidos podem resultar em um padrão dendrítico que eventualmente atingem os eletrodos levando a uma falha. Podem ser causadas por estresse metálico sobre o isolamento, como asperidades num eletrodo ou protuberâncias pontiagudas.

As trilhas superficiais são os resultados da passagem da corrente de fuga na

superfície do dielétrico, que gera um intenso calor localizado. O processo de formação das trilhas se inicia pela passagem da corrente de fuga no isolamento por caminhos formados por um filme contaminado ou rachaduras contaminadas. Com o tempo, o calor da passagem de corrente faz evaporar este filme, formando pequenas ilhas. A formação destas ilhas interrompe o circuito da corrente de fuga, o que leva ao aparecimento de pequenos arcos de descarga parcial que geram calor suficiente para carbonizar o isolante.

O crescimento das trilhas pode levar de horas a anos e a DP correspondente é quase sempre de pequena magnitude durante toda sua formação até minutos antes da falha total. Esta DP ocorre numa escala de tempo menor do que 1 nanossegundo.

#### **d) Descarga Parcial em Líquidos**

Tem algo em comum com o trilhamento em sólidos, mas o crescimento do padrão dendrítico ocorre em muito menos tempo (de horas a anos nos sólidos para microssegundos a milissegundos nos líquidos) devido à menor viscosidade do material. Por outro lado, a DP em líquidos possui características muito semelhantes à corona, pois pode se “autoconsertar” como nos gases, afinal suas moléculas estão relativamente livres para se moverem e diluírem o material avariado.

Assim, DP em líquidos pode ser repetitiva como as coronas em gases, porém numa escala de tempo maior devido à maior viscosidade em relação aos gases, o que leva a um tempo bastante grande para a identificação da DP. Em geral, nos líquidos, as descargas parciais podem ocorrer através de mecanismos semelhantes aos da corona, ou do trilhamento ou mesmo aos da cavidade, quando da formação de bolhas.

### **3.2 DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES**

Os transformadores de potência estão entre os equipamentos mais caros do sistema elétrico. Por isto mesmo são feitos e mantidos de forma a serem também os equipamentos mais confiáveis, o que é essencial para a operação de todo o sistema (YANG; JUDD, 2003). Prova disso é a presença de transformadores com mais de 30

anos ainda em operação (STRACHAN et al., 2008). Porém, esta reputação é mantida a custo de uma manutenção de excelência, o que inclui o monitoramento rigoroso de suas condições. Isto é absolutamente necessário, pois os transformadores são partes estratégicas do sistema elétrico e falhas em seu funcionamento podem causar enormes problemas como a interrupção de energia para grandes populações e para empresas de setores produtivos importantes. Sua destruição catastrófica pode causar danos em outros equipamentos próximos, ferimentos em funcionários das empresas de energia elétrica, poluição do meio ambiente com substâncias tóxicas, levando a multas e sanções devidas à legislação ambiental. Todos estes problemas representam altos custos que podem ser evitados com uma manutenção apropriada baseada no monitoramento de suas condições. Neste contexto, o sistema de isolamento dos transformadores constitui um aspecto crítico desse monitoramento.

Os transformadores, juntamente com os reatores, são os equipamentos elétricos mais complexos para medição de descargas parciais. O ponto em que ocorre a DP está separado dos terminais, onde é feita a medição elétrica, por uma grande indutância que aparece em paralelo com uma capacitância, sendo aterrada ainda por outra capacitância. O pulso elétrico gerado pela DP tem que percorrer toda esta impedância até atingir os terminais, sendo acrescido ainda de um intenso ruído eletromagnético (BARTNIKAS, 2002).

Descargas parciais em transformadores também geram sinais acústicos que podem ser detectados no exterior do equipamento. Sinais de emissão acústica são produzidos por liberações repentinas de energia, como no caso das descargas parciais. As ondas mecânicas geradas abrangem predominantemente a faixa do ultrassom, e percorrem o sistema de isolamento, passando pela estrutura metálica do transformador até chegar à parede, onde sensores podem ser fixados para captar o sinal da onda mecânica. As principais vantagens da medição acústica estão na presença muito pequena de ruídos e na possibilidade de localização direta da posição de origem das descargas parciais. Além disso, ao percorrerem o interior do equipamento, as ondas acústicas podem se tornar portadoras de informação o que, se bem explorado, pode ser de grande utilidade para a manutenção.

### 3.3 MEDIÇÃO ACÚSTICA DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES

A técnica de emissão acústica é um método não destrutivo e não invasivo de monitoramento de equipamentos, estruturas e processos. Sua grande sensibilidade permite obter diagnósticos precisos sobre falhas em estruturas e integridade de equipamentos e materiais. É um método promissor na área de manutenção preditiva, além de se adaptar perfeitamente à medição de descargas parciais.

#### 3.3.1 Definições

*Emissão acústica* é o nome originalmente dado à onda elástica emitida por um sólido quando este sofre alguma deformação ou quando é golpeado. A técnica de emissão acústica (AET) consiste em detectar estes sons, que estão normalmente na faixa do ultrassom, para monitorar a condição de resistência mecânica de estruturas sólidas. Ela difere de outras técnicas não destrutivas, como o *teste de ultrassom* (UT), por ser passiva, ou seja, os sinais captados são emitidos pelo objeto de teste espontaneamente, conforme Fig. 3.3. No teste de ultrassom, o sensor emite uma onda ultrassônica e detecta o sinal de eco.

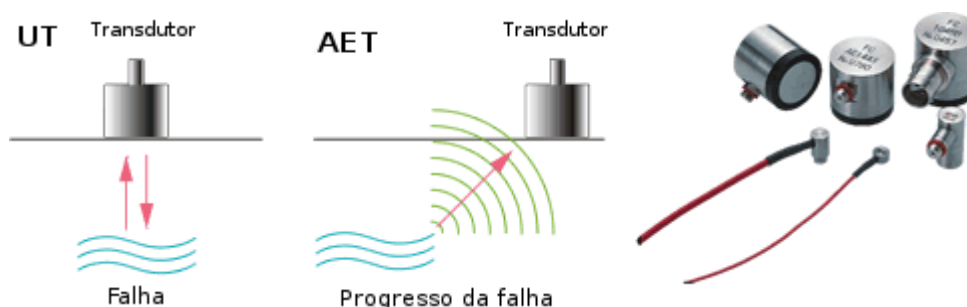


Figura 3.3: Diferença entre a técnica de emissão acústica e o teste de ultrassom (SENSORES.GIF, 2011).

A descarga parcial é parecida com uma pequena “explosão” que gera ondas mecânicas que se propagam pelo isolamento e pela estrutura do transformador. Estas ondas são detectadas por sensores adequados e um sistema de aquisição convencional. A

distância entre sensor e fonte de emissão depende da intensidade da onda e das características do meio. A onda emitida pela descarga parcial é esférica e, no caso de transformadores, se espalha por toda a estrutura, tendo que percorrer os diversos obstáculos no seu interior até chegar às paredes onde os sensores podem captar seus sinais.

### 3.3.2 Sensores de Emissão Acústica

Os sensores utilizados na técnica de emissão acústica são, normalmente, do tipo piezoelétricos. As ondas acústicas, quando atingem o sensor, causam pequenas deformações no material piezoelétrico que, por sua vez, gera um sinal de tensão. A técnica de emissão acústica pode ser usada, com vantagens, em operações como:

- observar deformações plásticas e microscópicas em tempo real;
- localizar falhas usando vários sensores;
- diagnosticar equipamentos em plena operação.

Os sensores piezoelétricos são classificados em dois tipos: *sensores de ressonância* e *sensores de banda larga*. No primeiro, a ressonância mecânica do elemento detector é usada para obter uma altíssima sensibilidade, porém numa banda relativamente estreita com pico em uma frequência determinada. No sensor de banda larga, um elemento amortecedor é usado em conjunto com o elemento detector para garantir uma banda de detecção larga (por exemplo, entre 1kHz e 1MHz, como o usado neste trabalho) e relativamente plana, mas sacrificando a sensibilidade. Mas, este sacrifício não é em vão, pois um sinal acústico com banda larga possui uma quantidade maior de informações que podem ser usadas para outras finalidades além da simples detecção de descargas parciais.

A medição acústica de descargas parciais em transformadores abre novas possibilidades para a manutenção preditiva destes equipamentos. Sua principal vantagem é o monitoramento em tempo real e em campo, com o transformador operando normalmente, afinal, é uma técnica não-invasiva. Esta é uma área ainda pouco explorada, sendo usada apenas para detecção e localização de descargas parciais. Este trabalho

vem trazer uma nova proposta que amplia as possibilidades deste método de monitoramento.

### **3.3.3 Sinal Acústico como Portador de Informações**

Além da detecção de descargas parciais em transformadores, há uma necessidade crescente de se obter mais informação sobre sua atividade, como localização, intensidade, possíveis causas e materiais envolvidos. Nesta linha de pesquisa, há diferentes métodos para identificação de tipos de descargas parciais, como em (STRACHAN et al., 2008) e em (CHEN et al., 2005). Os tipos são importantes, pois permitem estimar (grosseiramente) localização e causas. Esta identificação só é possível devido à capacidade dos sinais gerados pelas descargas parciais carregarem informação sobre elas. Estendendo esta linha de raciocínio, pode-se buscar nos sinais acústicos da DP não apenas informação sobre seu tipo, mas também sobre o seu percurso, ou seja, sobre os materiais que a onda acústica atravessou.

O uso de sinais acústicos para identificação de materiais já é utilizado há algum tempo. A abordagem convencional deste tipo de aplicação é obter parâmetros acústicos explorando informações da função de transferência do meio que está sendo investigado, usando métodos de convolução e deconvolução. Por exemplo, em (KING; HO, 1993) é descrito um método para identificação de material que segue essa linha de raciocínio, mas faz as medições de características acústicas obtidas de um sinal de eco sem usar a assinatura do sinal incidente (pulso de teste), através da Decomposição por Valores Singulares para estimação de parâmetros espectrais. Já em (PERRISSIN-FABERT et al., 1995), características acústicas de polímeros são obtidas através da análise da atenuação dos sinais de eco de pulsos acústicos. É uma abordagem que explora a lei de atenuação de ondas acústicas em um meio através da estimação do coeficiente de atenuação. No trabalho, este coeficiente é estimado a partir do espectro dos dois primeiros ecos de um pulso acústico emitido para o material. Verifica-se, então, que os sinais acústicos refletidos em um determinado material passam a carregar informação referente à composição do meio.

Aplicações mais simples para a extração de informações de sinais acústicos são aquelas relacionadas à detecção e localização de fraturas em materiais como placas

metálicas. Em (JEONG; JANG, 2000), quatro sensores são posicionados sobre placas metálicas para captura de emissões acústicas provenientes de fraturas. Informações são extraídas dos sinais usando a transformada *wavelet* para obter as coordenadas da(s) fratura(s). Este também é outro exemplo do aproveitamento dos sinais acústicos para obtenção de informação sobre os meios de propagação.

Uma das áreas mais beneficiadas pelo uso do ultrassom é a biomédica. Informações extraídas de sinais acústicos permitem obter imagens, identificar tecidos e medir a velocidade do fluxo sanguíneo, entre outros usos. (FERRARA et al., 1992) faz um estudo sobre a influência do tecido presente entre o sensor e o fluxo sanguíneo na correta medição de sua velocidade. Esta influência está relacionada não apenas à atenuação, mas ao fenômeno da dispersão, que faz variar a velocidade de propagação de ondas acústicas em função de sua frequência. O que aparentemente é um problema, pode ser usado para identificar o tecido ou possíveis anomalias nele. Tudo depende de como explorar os fenômenos acústicos manifestados nos sinais. Um estudo similar, mas em tecidos ósseos pode ser visto em (WEAR, 2000), onde o autor destaca a modificação do formato do pulso propagado, uma influência da dispersão e também da atenuação.

Uma questão que pode ser colocada na proposta desta tese é: quais parâmetros de um sinal acústico devem ser medidos para se detectar a presença em maior ou menor grau de umidade em óleo de transformador? Apesar de não ser esta a abordagem deste trabalho, as experiências mostram que possivelmente, o fenômeno da dispersão é o mais significativo a ser explorado. Em geral, a dispersão é medida através do uso de modelos matemáticos baseados nas equações de *Kramers-Kronig* para propagação de ondas, como em (WATERS et al., 2005). Alternativas para esta abordagem também são encontradas, como em (PEIRLINCKX et al., 1993), onde seu modelo se baseia numa função de transferência obtida a partir da *lei de Hooke* para materiais viscoelásticos. Como pode ser observado nestes exemplos de trabalhos da área, estas abordagens são bastante complexas, exigindo um alto nível de conhecimento matemático e físico na área de propagação de ondas mecânicas e de materiais.

Por fim, para ilustrar a viabilidade do método proposto nesta tese, cita-se o trabalho de (ADAMO et al., 2004) que apresenta uma técnica para medição de umidade em solos a partir de medidas de velocidade de propagação de ondas acústicas baseadas

em um modelo para ondas elásticas em meios porosos. Verifica-se que a ideia é sempre a mesma: extrair informação de um sinal acústico que teve contato com o material sob investigação. Nesta tese, o material é o óleo e o sinal acústico é gerado pelas descargas parciais, cujas ondas percorrem o isolante até chegarem à parede do transformador onde são detectadas pelo sensor acústico. Porém, a forma de extração de informação é diferente, evitando o uso de modelos matemáticos, explorando apenas uma relação de causa e efeito.

### **3.4 BREVE HISTÓRICO SOBRE O ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS**

---

O interesse pelas descargas parciais data do início dos anos 1940 (NAT-TRASS, 1993). As primeiras técnicas e equipamentos eram tão primitivos que alguns nem foram registrados. São exemplos o uso de rádios portáteis com antenas externas usados como “*sniffers*” eletrônicos para procurar descargas parciais, principalmente corona; para transformadores isolados a óleo, usava-se longos tubos feitos de material isolante que eram encostados na parede externa do transformador numa extremidade e na outra um operador tentava ouvir “assobios” indicativos da presença de DP; este último método era capaz de detectar DP's a partir de 40 pC (nível baixo o suficiente para indicar o início da atividade de DP num transformador).

Os primeiros materiais e sistemas estudados foram:

- materiais poliméricos, polietileno e porcelana;
- equipamentos de alta tensão, isolados com dielétricos líquidos e sólidos: isoladores impregnados de óleo, transformadores isolados a óleo e outros.

Na área de localização de descargas parciais, as primeiras pesquisas datam de 1949 e incluem:



- localização usando detectores de ultrassom, muito popular para transformadores isolados a óleo;
- localização usando raios-X para induzir DP;
- localização através de vetor ultrassônico em transformadores.

Os primeiros testes de DP eram feitos com os equipamentos de medição disponíveis no mercado na época, o que limitava bastante os métodos e obrigava os pesquisadores a desenvolverem seus próprios equipamentos. Os fabricantes de equipamentos elétricos que necessitavam realizar estes testes participaram do desenvolvimento dos equipamentos de medição, dos métodos e técnicas, e dos padrões. Um dos primeiros instrumentos usados foi o medidor de RIV (*radio interference voltage*). É um receptor de rádio (MHz) com uma escala em dB e em  $\mu\text{V}$ , além de um *speaker* para ouvir o padrão sonoro de interferência. Usa uma antena externa para monitorar o ruído externo. Sua principal limitação é não permitir a análise dos pulsos individuais de DP, necessária para certos tipos de equipamentos a serem monitorados. A análise dos pulsos inclui seu reconhecimento, sua contagem e distribuição em relação à fase. Isto levou ao desenvolvimento de equipamentos de largura de banda moderada, pois a análise em alta frequência ainda tem os inconvenientes da atenuação, de ressonâncias e de ruídos. A largura de banda utilizada nestes equipamentos era suficiente para as exigências da análise dos pulsos. O resultado disso foi o desenvolvimento de um mercado deste tipo de equipamento de medição.

Os primeiros questionamentos feitos no início das pesquisas foram:

- o que é descarga parcial?
- qual a causa da descarga parcial?
- como eliminar ou controlar a descarga parcial?

Ao longo das pesquisas, percebeu-se a inviabilidade da eliminação da descarga parcial. Isto se deve ao fato da existência da DP estar associada ao processo de fabricação dos equipamentos elétricos e uma melhoria a ponto de eliminar as descargas parciais elevaria demais os custos de fabricação, tornando estes equipamentos pouco com-

petitivos no mercado. Optou-se por tolerar algum nível de DP nos equipamentos de forma que se encontrasse um compromisso entre eficácia e custo.

Enquanto normas e especificações eram desenvolvidas, muito foi publicado sobre o assunto da DP. Localização ultrassônica foi uma das técnicas que mais chamou a atenção. Desde o método primitivo (com o tubo isolante) até sensores que podem ser instalados internamente num transformador, muito se desenvolveu nesta área. A pesquisa sobre a relação entre a magnitude da DP, taxa de repetição, distribuição de fase e perspectiva de tempo de vida do isolamento evoluiu bastante.

Os fabricantes de equipamentos elétricos frequentemente realizam testes de DP para assegurar o atendimento dos requisitos de normas e de clientes. Assim, o campo da detecção, localização e interpretação de descargas parciais continua a evoluir. Tal progresso exigirá modificações nos padrões existentes, criação de novos padrões e a melhoria e/ou modificação dos testes de descargas parciais.

### **3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE DESCARGAS PARCIAIS E MEDIÇÃO ACÚSTICA**

---

A técnica de emissão acústica aplicada na medição de descargas parciais em transformadores se enquadra perfeitamente na ideia de uma manutenção preditiva destes equipamentos, dado seu caráter não invasivo, o que permite o monitoramento sem interferir no funcionamento dos transformadores. Mas a proposta defendida neste trabalho de doutoramento é o uso dos sinais acústicos de DP não só para detecção e localização, mas para diagnosticar a condição do isolamento. Mais especificamente, obter informações sobre o grau de umidade presente no óleo isolante, o que permite estimar a umidade total do equipamento. Portanto, dada a inevitabilidade da atividade de DP em um transformador de potência, pode-se passar a usá-la como fonte de informação, o que talvez mude a percepção que se tem da descarga parcial de vilã para aliada da manutenção.

# 4

## *Processamento dos Sinais Acústicos – A Transformada Wavelet Discreta*

### **4.1 O SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA**

---

Para entender o sinal de emissão acústica produzido por uma descarga parcial e captado por um sensor piezoelétrico é importante compreender alguns aspectos relacionados à propagação da onda acústica que geram diferentes tipos de sinais.

A velocidade do som depende, em algum grau, da frequência, o que é chamado de *dispersão*. Esta dependência é causada por não-linearidades na elasticidade do material. Em meios volumosos, o efeito da dispersão é pequeno, podendo ser desconsiderado. Mas em estruturas (onde há restrições de dimensões), a dispersão pode ser significativa. Nestes casos, deve-se, também diferenciar velocidade de fase e velocidade de grupo. De uma maneira simplificada, pode-se dizer que a *velocidade de fase* é determinada pelas oscilações locais das partículas (daí também ser chamada de velocidade local). A velocidade de fase é calculada a partir do comprimento de onda numa dada frequência:

$$c_{fase} = \lambda f \quad (4.1)$$

onde  $c_{fase}$  é a velocidade de fase [m/s],  $\lambda$  é o comprimento de onda [m] e  $f$  é a frequência [Hz].

A *velocidade de grupo* é aquela na qual a informação é transportada. É a velocidade em que o som se propaga ao longo de um caminho numa estrutura mecânica. As velocidades de fase e de grupo podem ser muito diferentes uma da outra.

Quando uma onda acústica atinge uma interface entre dois materiais diferentes numa incidência não perpendicular pode haver conversão de parte de sua energia em outro modo de propagação. Quando a onda longitudinal atinge a interface, ela pode excitar as partículas não só na direção de propagação, mas também numa direção perpendicular à de propagação, dando origem a uma onda transversal. Neste caso, cada uma das ondas refratadas tem sua própria velocidade, que serão tão diferentes uma da outra quanto maior for a diferença entre as impedâncias acústicas dos dois meios. A combinação destes dois modos, somada às diversas reflexões no interior do material pode ainda dar origem a outros modos de propagação.

As ondas acústicas, quando se propagam em diferentes modos e em diferentes meios, produzem um sinal no sensor piezoelétrico com características que refletem estes percursos. As ondas sonoras podem se propagar em quatro modos principais. Estes modos de propagação se baseiam na forma como as partículas oscilam. Nem todos os estados da matéria permitem todos os modos. Assim, o som pode se propagar como:

- *ondas longitudinais*: as oscilações ocorrem na direção de propagação da onda;
- *ondas transversais*: as oscilações ocorrem na direção perpendicular à direção de propagação da onda;
- *ondas de superfície*: as partículas descrevem um movimento oscilatório com órbita elíptica;
- *plate waves*: as partículas oscilam perpendicularmente à direção de propagação em chapas muito finas; podem ser do tipo *Lamb* (movimento perpendicular à superfície) ou do tipo *Love* (movimento paralelo ao plano da superfície, perpendicular à direção de propagação).

Em líquidos, apenas ondas longitudinais são possíveis.

No caso de descargas parciais no transformador isolado a óleo, há dois modos de propagação da onda acústica que merecem uma maior atenção: a onda longitudinal que percorre o óleo e a estrutura do transformador; e a onda de superfície que percorre a parede de aço. Elas se propagam com velocidades muito diferentes uma da outra, sendo de fundamental importância a distinção entre elas, por exemplo, para se fazer a correta localização da fonte que gerou a emissão acústica.

A onda acústica gerada pela descarga parcial é esférica e se propaga em todas as direções. No óleo, ela irá se propagar no modo longitudinal até atingir as paredes do transformador. Sendo esférica, ela irá atingir uma extensa área da parede em diferentes instantes de tempo, conforme figura 4.1.

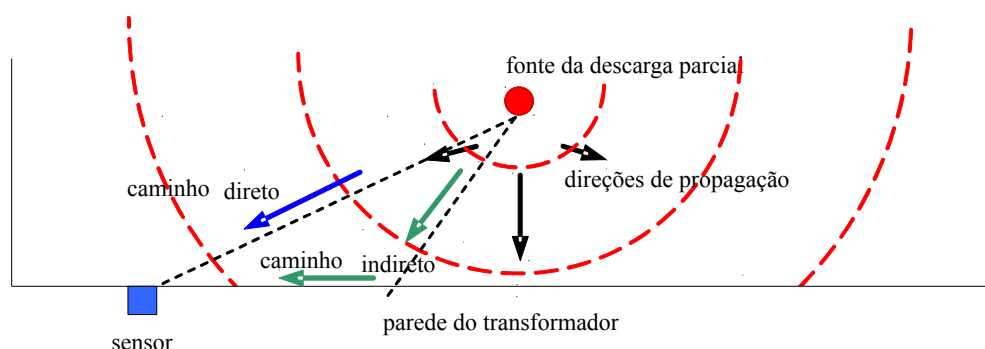


Figura 4.1: Propagação da onda esférica no interior do transformador atingindo as paredes em diferentes instantes.

Conforme os diversos pontos da parede são atingidos, há uma conversão de modos de propagação, gerando uma onda de superfície que passa a percorrer a parede. Esta onda de superfície tem características diferentes da onda longitudinal no óleo, e uma velocidade maior (cerca de 5000m/s contra 1400m/s no óleo). Isto significa que, se o sensor estiver numa posição da parede muito distante da fonte da emissão acústica, certamente ele será atingido pela onda de superfície antes da onda que vem pelo caminho direto no óleo. Assim, o sinal captado por este sensor deverá conter, nos primeiros instantes, duas frentes de onda distintas. Fazer a distinção entre elas no sinal é uma tarefa importante para a localização da fonte de emissão acústica.

O sinal acústico captado pelos sensores é essencialmente não-estacionário.

Suas componentes de frequências iniciais, bem como a magnitude, dependem da natureza da fonte da descarga parcial (VARLOW et al., 1999). Além disso, uma característica importante do sinal acústico é o fato de carregar informações sobre o caminho percorrido no interior da estrutura. Explorando esta característica, pode-se inferir sobre o estado do sistema de isolamento do transformador e não só sobre o problema de descargas parciais.

## 4.2 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

O uso da Transformada Wavelet em sua versão discreta, na extração de características de sinais acústicos de descargas parciais é justificado pela sua capacidade de analisar sinais não-estacionários. Sinais assim possuem parâmetros que variam ao longo do tempo, como por exemplo, a frequência e a amplitude. Não é conveniente utilizar a Análise de Fourier devido à sua inadequação a este tipo de sinal (HUANG et al., 1998) e à perda da informação temporal.

### 4.2.1 Análise de Multirresolução

A multirresolução é um conceito relacionado com a capacidade de visualizar um mesmo sinal em diferentes resoluções, ou seja, analisar um sinal em diferentes níveis de detalhes, podendo destacar o que há de mais relevante em cada nível.

#### 4.2.1.1 Expansão de Sinais

A Transformada Wavelet Discreta é um recurso matemático usado para representar ou expandir funções (e/ou sinais). Ao expandir uma função em termos de outra, revelam-se informações que poderiam estar ocultas na apresentação natural, ou original, da função/sinal.

Um sinal (ou função) pode ser decomposto linearmente através da expressão (4.2):

$$f(t) = \sum_k a_k \psi_k(t) \quad (4.2)$$

onde  $f(t)$  é o sinal (ou função) a ser decomposto,  $a_k$  são os coeficientes de expansão e  $\psi_k(t)$  forma o chamado conjunto de expansão. A análise dos coeficientes  $a_k$  pode ser vantajosa ao explicitar características de  $f(t)$  que não são evidentes. O conjunto de funções  $\psi_k(t)$  é formado por funções com as quais se pode “montar”  $f(t)$ , usando para isso os coeficientes  $a_k$ . Se a expansão é *única*, isto é, se para “montar” (ou reconstruir)  $f(t)$  os coeficientes  $a_k$  e as funções  $\psi_k(t)$  são combinados de forma única, então tal conjunto de expansão é chamado de *base*. Se esta base for *ortogonal*, então os coeficientes podem ser calculados através de uma operação de produto interno. Verifica-se que há termos e definições da Álgebra Linear. Eles são importantes para a compreensão da Transformada Wavelet Discreta.

### a) Espaço de Sinais

Sinais podem ser somados, subtraídos e multiplicados por constantes. Isto permite tratá-los como vetores de um espaço vetorial, com todas as propriedades definidas na Álgebra Linear. Assim, podem-se enunciar algumas destas propriedades do *espaço de sinais*, como a seguir.

### b) Produto Interno

O produto interno entre dois sinais definidos no intervalo de tempo  $a < t < b$  é dado por:

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int_a^b x(t) y^*(t) dt \quad (4.3)$$

onde  $y^*(t)$  denota o conjugado de  $y(t)$ . Para sinais discretos e reais, o produto interno pode ser dado por:

$$\langle x[n], y[n] \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] y[n] \quad (4.4)$$

Deve-se notar que a operação *produto interno* toma dois sinais e retorna um

único valor (um *escalar*). Uma interpretação para este valor estaria no conceito geométrico de projeção de um vetor sobre o outro, ou seja, a “sombra” que um faz no outro quando o primeiro é “iluminado” perpendicularmente. Para sinais, esta “projeção” está relacionada a uma medida da quantidade de informação que os dois sinais têm em comum.

### c) Norma

A norma do sinal (ou função)  $x(t)$  é dada por:

$$\|x(t)\| = \sqrt{\langle x(t), x(t) \rangle} \quad (4.5)$$

A expressão para sinais discretos é idêntica. O quadrado da norma de um sinal é sua energia. A norma é uma medida da intensidade do sinal, de sua grandeza. Como comparação, o tamanho ou comprimento de um vetor geométrico é dado pela sua norma. Como a energia de um sinal é uma medida de sua “magnitude”, pode-se entender o motivo pelo qual o valor da sua energia está ligado ao valor de sua norma.

### d) Ortogonalidade

Dois sinais,  $x(t)$  e  $y(t)$  são ortogonais se:

$$\langle x(t), y(t) \rangle = 0 \quad (4.6)$$

A ortogonalidade entre vetores geométricos significa que eles fazem ângulo de  $90^\circ$  um com o outro e, conseqüentemente, um não se projeta sobre o outro. Para sinais, isto significa que um sinal é independente do outro, ou seja, não há informação em comum entre eles. A ortogonalidade é importante na obtenção dos coeficientes de expansão e na reconstrução do sinal a partir destes mesmos coeficientes.

### e) Base Ortogonal de Sinais

Uma *base* é um conjunto de sinais a partir dos quais outros podem ser descritos. A ortogonalidade garante apenas que não haverá redundância nesta descrição. Na



prática, isto significará duas coisas: haverá apenas uma representação para um determinado sinal com este conjunto; e o produto interno, que é uma operação relativamente simples, será usado para obter os coeficientes desta representação, que é o objetivo principal da expansão de sinais.

Diz-se que um conjunto de sinais  $\psi_k(t)$  é uma *base ortogonal* se:

- i. os sinais  $\psi_k(t)$  são mutuamente ortogonais:  $\langle \psi_n(t), \psi_m(t) \rangle = 0 \quad (m \neq n)$ ;
- ii. os sinais  $\psi_k(t)$  são completos no sentido de que o único sinal que é ortogonal a todos os  $\psi_k(t)$  é o sinal nulo (composto apenas de zeros), ou seja, se  $\langle x(t), \psi_k(t) \rangle = 0$  para qualquer  $k$ , então  $x(t) = 0$ .

### 4.2.1.2 Obtenção dos Coeficientes de Expansão

A obtenção dos coeficientes de uma expansão como aquela da eq. (4.2) pode ser perfeitamente entendida estudando-se um caso análogo de geometria. Num plano geométrico, um vetor pode ser obtido a partir de um par de vetores ortogonais (fig. 4.2):

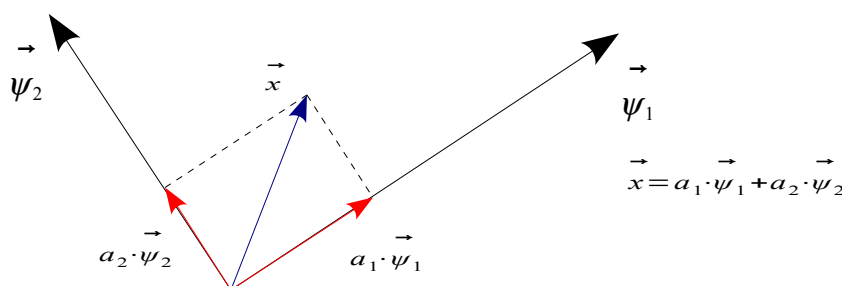
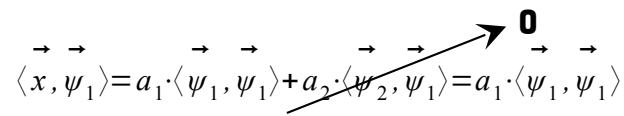


Figura 4.2: Decomposição de um vetor geométrico.

O coeficiente  $a_1$  pode ser obtido usando-se as propriedades do produto interno e a ortogonalidade:

$$\langle \vec{x}, \vec{\psi}_1 \rangle = \langle \left( a_1 \cdot \vec{\psi}_1 + a_2 \cdot \vec{\psi}_2 \right), \vec{\psi}_1 \rangle = \langle a_1 \cdot \vec{\psi}_1, \vec{\psi}_1 \rangle + \langle a_2 \cdot \vec{\psi}_2, \vec{\psi}_1 \rangle$$

Como os vetores da expansão ( $\vec{\psi}_1$  e  $\vec{\psi}_2$ ) são ortogonais, vem:

$$\vec{x} \cdot \vec{\psi}_1 = a_1 \cdot \vec{\psi}_1 \cdot \vec{\psi}_1 + a_2 \cdot \vec{\psi}_2 \cdot \vec{\psi}_1 = a_1 \cdot \vec{\psi}_1 \cdot \vec{\psi}_1$$


Assim,

$$a_1 = \frac{\langle \vec{x}, \vec{\psi}_1 \rangle}{\langle \vec{\psi}_1, \vec{\psi}_1 \rangle} \quad (4.7)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, vem:

$$a_2 = \frac{\langle \vec{x}, \vec{\psi}_2 \rangle}{\langle \vec{\psi}_2, \vec{\psi}_2 \rangle} \quad (4.8)$$

No espaço de sinais/funções, considerando o conjunto de expansão como sendo uma base ortogonal, pode-se escrever:

$$a_m = \frac{\langle f(t), \psi_m(t) \rangle}{\langle \psi_m(t), \psi_m(t) \rangle} \quad (4.9)$$

Portanto, utilizando o produto interno entre sinais (ou funções), eq. (4.3), pode-se obter os coeficientes da expansão linear da eq. (4.2), operação conhecida como *análise do sinal*.

#### 4.2.1.3 Recuperação do Sinal

A obtenção do sinal (ou função), ou seja, a *síntese* do sinal, a partir dos coeficientes da expansão é feita através de:

$$f(t) = \sum_k a_k \cdot \psi_k(t) \quad (4.10)$$

Esta equação, descrita anteriormente como uma equação de decomposição

ou expansão linear (eq. 4.2), é chamada de *equação de síntese*.

## 4.2.2 A Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet Discreta também é uma forma de expansão de sinais. A principal diferença para a maioria das expansões está na organização de seus coeficientes, que variam de acordo com dois parâmetros em vez de apenas um, como na Série de Fourier.

As funções que formam a base são as chamadas *wavelets* que podem ser organizadas para formarem conjuntos ortogonais. Os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta são organizados em diferentes níveis, que representam as diferentes resoluções, ou *escalas*, e são dados em função do tempo. A obtenção destes coeficientes pode ser interpretada através da correlação entre o sinal e as funções da base, reforçando o conceito de multirresolução.

### 4.2.2.1 Wavelets

*Wavelets* são formas de onda de duração limitada, valor médio igual a zero e norma unitária. Um exemplo é mostrado na figura 4.3. Estas formas de onda possuem sua energia concentrada no tempo, o que confere uma capacidade para uso em sistemas de expansão para análise não-estacionária, ou seja, para análises onde o sinal é não-estacionário ou possui componentes não-estacionárias (transitórios).

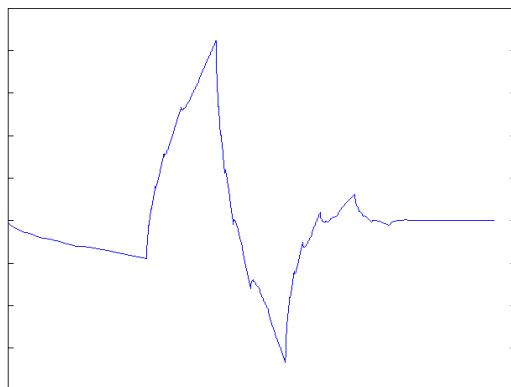


Figura 4.3: Forma de onda da wavelet Daubechies 2 (db2).

O uso de *wavelets* como conjunto de expansão constitui o que é normalmente chamado de *Sistema Wavelet*. Este conjunto de expansão não é único, como é o caso do conjunto de expansão da série de Fourier, por exemplo, que é formado apenas por exponenciais complexas. Na verdade, existem muitos sistemas *wavelets* diferentes, e suas características comuns são:

- i. podem formar um conjunto de “*blocos de construção*” (BURRUS, et al., 1998): este conjunto pode ser usado para *construir* ou *representar* sinais e funções;
- ii. ao fornecer uma localização de tempo e frequência do sinal, a expansão *wavelet* representa a maior parte da energia do sinal com poucos coeficientes;
- iii. o cálculo dos coeficientes da expansão é feito de maneira eficiente;
- iv. os diferentes sistemas *wavelets* ou *famílias de wavelets* têm formas de onda que se equilibram numa relação de compromisso entre o quanto as funções são compactamente localizadas no tempo ou no espaço (duração) e quão suaves elas são (GRAPS, 1995);
- v. *multirresolução*;
- vi. o valor dos coeficientes da expansão decaem rapidamente para zero;
- vii. capacidade de realizar uma descrição local mais precisa e uma separação das características de sinais; os coeficientes da expansão *wavelet* representam a correlação entre o trecho do sinal e a *wavelet*; “trecho”, porque a *wavelet* é uma onda de suporte limitado (duração limitada), assim, os coeficientes representam componentes que são por si só locais;
- viii. a possibilidade de definir sistemas *wavelets* “personalizados” para aplicações específicas.

Há uma linha de pesquisa que estuda as características e desenvolve sistemas

*wavelets*. No presente estudo, serão usados sistemas já existentes e consagrados, como por exemplo a família de *wavelets Daubechies*.

#### 4.2.2.2 Expansão Wavelet e Multirresolução

De uma forma genérica, baseando-se na eq. (4.9), pode-se escrever a expansão através de *wavelets* da seguinte forma:

$$a_{j,k} = \frac{\langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle}{\langle \psi_{j,k}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle} = \frac{\int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt}{\int \psi_{j,k}(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt} \quad (4.14)$$

Porém, como uma das características da *wavelet* é possuir norma unitária, consequentemente energia unitária, a expressão de análise se torna:

$$a_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt \quad (4.15)$$

A eq. (4.15) é chamada de *Transformada Wavelet Discreta*. Sua inversa é dada por:

$$f(t) = \sum_j \sum_k a_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (4.16)$$

Os coeficientes variam com dois parâmetros: o *deslocamento de tempo*  $k$ , e a *escala*  $j$ , diferentemente, por exemplo, da Série de Fourier, onde os coeficientes variam apenas com a frequência. Para cada escala, há um conjunto de coeficientes que variam no tempo.

O conjunto de expansão é formado por “versões” da *wavelet-mãe* escalonadas e deslocadas no tempo. Isto significa que existe uma forma de onda com um formato determinado pelas características da *wavelet* (a *wavelet-mãe*) e todo o conjunto de

expansão é criado a partir dela, variando-se seu posicionamento no tempo ou espaço (variável independente) e variando-se sua escala, ou seja, “esticando” ou “encolhendo” a forma de onda. A escala é um parâmetro inversamente proporcional à frequência.

### 4.2.3 O Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta

O uso prático da Transformada Wavelet Discreta exige a obtenção de um algoritmo eficiente para sua implementação em computadores. A partir da teoria de expansão de sinais/funções chega-se a uma solução para este problema que nada mais é do que um processo de filtragem e subamostragem na análise, e de super amostragem e filtragem na síntese.

#### 4.2.3.1 Expansão no Espaço $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$

O espaço vetorial denotado por  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$  é de grande importância em processamento de sinais (BURRUS, et al., 1998). Trata-se do espaço de todas as funções  $f(t)$  com uma integral bem definida, na forma da Integral de Lebesgue (BEALS, 1973). Para uma função pertencer a este espaço vetorial ela deve satisfazer a condição:

$$\int |f(t)|^2 dt < \infty \quad t \in \mathcal{R} \quad (4.17)$$

Pode-se *expandir* um espaço vetorial a partir de uma base. Assim, um espaço de funções  $S$  pode ser expandido a partir de uma base cujas funções são  $\psi_k(t)$ . Isto será denotado da seguinte forma:

$$S = \text{span}_k \{ \psi_k(t) \} \quad (4.18)$$

O objetivo inicial é definir um conjunto de expansão para a Transformada Wavelet Discreta. Define-se, então, funções  $f(t) \in \mathcal{L}^2(\mathcal{R})$  tais que:

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4.19)$$

Esta expressão (eq. 4.19) pode ser definida como a *série de wavelets*; ela mapeia um sinal de tempo contínuo em uma sequência de coeficientes discretos. A variável  $j$  não é exatamente a *escala*, como na eq. (4.16), embora esteja diretamente envolvida na definição da mesma. 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. Este tipo de variação de escala permite gerar uma base *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-se outro tipo de base, mas da forma como está apresentada na eq. 4.19, o algoritmo de *bancos de filtros* pode ser implementado, o que agiliza aplicações práticas.

Um detalhe importante que influencia muito a série da eq. 4.19 é a necessidade de que a norma das funções da base seja unitária (o que as leva a ter energia unitária). Isto é o que justifica o termo  $2^{j/2}$  nessa expressão.

#### 4.2.3.2 A Função Escala

A primeira função de expansão a ser definida é uma sobre a qual nada ainda foi dito neste trabalho dentro do contexto da Transformada Wavelet Discreta. A *função escala* é como a função *wavelet* no sentido de que ela tem um formato único e o conjunto de expansão é formado por diversos deslocamentos das funções e por variações de escala. Ela é fundamental para a Transformada Wavelet Discreta, pois seu uso permite criar o algoritmo que se está buscando.

Define-se um conjunto de funções através de deslocamentos na variável independente:

$$\varphi_k(t) = \varphi(t - k) \quad (4.20)$$

onde  $\varphi$  é uma função pertencente a  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$ . Este conjunto de funções deve ser uma base para um subespaço  $v_0$  de  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$ . Ou seja:

$$v_0 = \underset{k}{\text{span}} \left\{ \varphi_k(t) \right\} \quad (4.21)$$

Além de deslocamentos na variável independente, modifica-se a escala da função por fatores 2, mas sempre mantendo a norma unitária:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (4.22)$$

Definidas desta forma, com variações na escala e no deslocamento de tempo, as *funções escala* podem constituir uma base ortonormal de um subespaço de  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$ . Este subespaço pode ser escrito da seguinte forma:

$$v_j = \underset{k}{\text{span}} \left\{ \varphi_k(2^j t) \right\} = \underset{k}{\text{span}} \left\{ \varphi_{j,k}(t) \right\} \quad (4.23)$$

Há um conceito importante sobre a abrangência do subespaço que está relacionado com a escala das funções da base e pode ser escrito matematicamente como se segue. Seja  $j=0$ . Então:

$$v_0 = \underset{k}{\text{span}} \left\{ \varphi_k(t) \right\} = \underset{k}{\text{span}} \left\{ \varphi_{0,k}(t) \right\} \quad (4.24)$$

onde o índice zero na função *escala* está relacionado à sua escala, lembrando que as escalas das funções não serão tratadas diretamente, mas sim através da variável  $j$ . Continuando, para  $j=1$ :



$$v_1 = \underset{k}{\text{span}}\{\varphi_k(2^1 t)\} = \underset{k}{\text{span}}\{\varphi_{1,k}(t)\} \quad (4.25)$$

A abrangência destes subespaços pode ser expressa como:

$$v_0 \subset v_1 \quad (4.26)$$

Variando-se  $j$ , tem-se que:

$$\dots v_{-2} \subset v_{-1} \subset v_0 \subset v_1 \subset v_2 \dots \Rightarrow v_j \subset v_{j+1} \quad j \in \mathbb{Z} \quad (4.27)$$

A figura 4.4 ilustra este *aninhamento de subespaços*, que nada mais é do que outra forma de escrever que quanto menor a escala (maior  $j$ ), maior será a abrangência do subespaço.

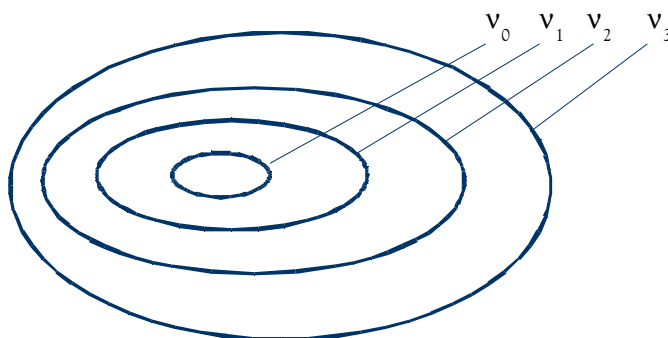


Figura 4.4: Aninhamento de subespaços.

Nos extremos, tem-se:

$$v_{-\infty} = \emptyset \quad \text{e} \quad v_{\infty} = \mathcal{L}^2(\mathfrak{R}) \quad (4.28)$$

Devido à definição do subespaço  $v_j$  (eq. 4.23), estes subespaços devem satis-

fazer a seguinte *condição de escalonamento* (BURRUS, et al., 1998):

“se  $f(t) \in v_j$ , então  $f(2t) \in v_{j+1}$  e vice-versa“

O aninhamento é obtido exigindo-se que  $\varphi(t)$  (função da base) pertença a  $v_0$ , o que implicará que  $\varphi(t)$  também pertença a  $v_1$  (eq. 4.26) assim como  $\varphi(2t)$ . Isto permitirá que  $\varphi(t)$  possa ser representado por  $\varphi(2t)$ , sua versão comprimida (em escala menor). Para formalizar isto, é definida a *equação de análise de multirresolução* (BURRUS, et al., 1998):

$$\varphi(t) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n) \quad (4.29)$$

onde  $n \in Z$  e  $h(n)$  é o *vetor de coeficientes* da função escala. O conjunto de funções do tipo  $\varphi(t)$  deve formar uma base e, com isso, representar todas as funções do subespaço vetorial, inclusive a si própria. No caso de expandir as funções da base do subespaço imediatamente aninhado ( $j - 1$ ), estes coeficientes são normalizados por  $\sqrt{2}$  e são considerados especiais, formando o vetor de coeficientes da função escala.

A *equação de análise de multirresolução* é uma equação recursiva fundamental para a existência da função escala. É análoga a uma equação diferencial com coeficientes  $h(n)$  e solução  $\varphi(t)$  que pode ou não existir ou ser única.

### 4.2.3.3 A Função Wavelet

As características importantes do sinal não são tão bem descritas pelas funções escalas quanto o são pelas funções *wavelet*. O conjunto de funções *wavelet* expande as *diferenças entre os subespaços* expandidos pelas funções escalas.

Define-se um conjunto de funções através de variações de escala e de deslocamentos na variável independente:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4.30)$$

onde  $\psi$  é uma função pertencente a  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$ . Este conjunto de funções, assim como as funções escalas, deve ser uma base ortonormal para um subespaço  $\omega_j$  de  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$ . Ou seja:

$$\omega_j = \text{span}_k \{ \psi_{j,k}(t) \} \quad (4.31)$$

As funções  $\psi(t)$  são as *wavelets*. Tudo o que se aplica à função escala também se aplica à função *wavelet* no que diz respeito às modificações na escala e no deslocamento de tempo, como a capacidade de expandir funções com mais detalhes conforme se diminui a escala.

O que diferencia as funções escalas das funções *wavelets* é o subespaço expandido pelas bases formadas por elas. A diferença fundamental pode ser descrita como:

$$\omega_j \not\subseteq \omega_{j+1} \quad (4.32)$$

o que não acontece com os subespaços expandidos pelas funções escalas (ver eq. 4.27). A característica que gera esta diferença é a exigência de *ortogonalidade* entre as funções escalas e as funções *wavelets*:

$$\langle \phi_{j,k}(t), \psi_{j,l}(t) \rangle = \int \phi_{j,k}(t) \psi_{j,l}(t) dt = 0 \quad j, k, l \in \mathbb{Z} \quad (4.33)$$

Ao exigir ortogonalidade entre as funções escalas e as *wavelets*, deseja-se obter algumas vantagens (BURRUS, et al., 1998):

- simplicidade no cálculo dos coeficientes de expansão;
- aplicabilidade do teorema de Parseval que permite particionar a energia do sinal no domínio da Transformada Wavelet Discreta.

A relação entre os subespaços expandidos pelas funções escalas e pelas funções *wavelets* fica clara quando se define o *complemento ortogonal*, que é uma propriedade entre dois conjuntos. Assim, o complemento ortogonal do subespaço  $v_j$  em  $v_{j+1}$  é o subespaço  $\omega_j$ , ilustrado na figura 4.5.

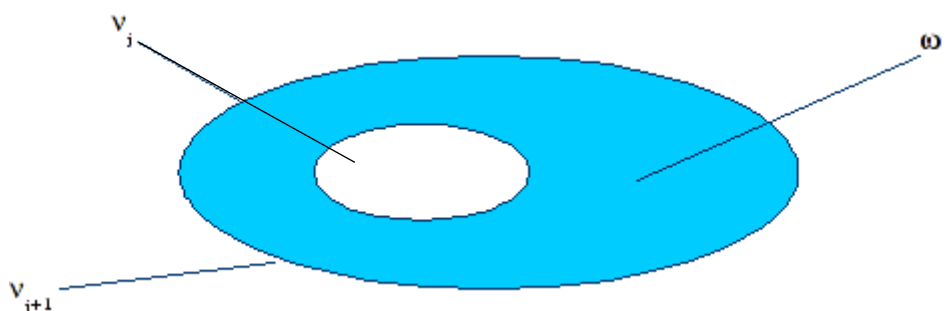


Figura 4.5: Ilustração do conceito de complemento ortogonal.

O complemento ortogonal entre os subespaços significa que as funções do subespaço  $v_j$  são todas ortogonais às funções do subespaço  $\omega_j$  de forma que não há intersecção entre estes subespaços. Isto significa que os detalhes que as funções escalas representam de uma função  $f(t)$  qualquer não são os mesmos que as funções *wavelets* representam. Pode-se ver na figura 4.5 que as funções *wavelets* expandem a “diferença” entre os subespaços  $v_j$  e  $v_{j+1}$ .

Um outro fato importante que se tira do conceito de complemento ortogonal é que o subespaço  $v_{j+1}$  é formado pela união de  $v_j$  e  $\omega_j$  de forma que, para  $j=1$ :

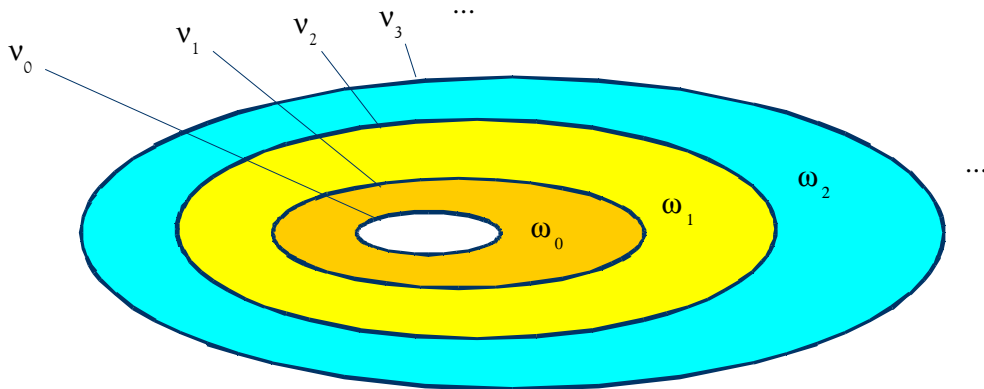
$$v_1 = v_0 \oplus \omega_0 \quad (4.34)$$

onde o símbolo  $\oplus$  representa a união de subespaços. Continuando com o raciocínio,

para  $j=2$ , tem-se:

$$v_2 = v_1 \oplus \omega_1 = v_0 \oplus \omega_0 \oplus \omega_1 \tag{4.35}$$

Para  $j=3$ :



$$v_3 = v_2 \oplus \omega_2 = v_0 \oplus \omega_0 \oplus \omega_1 \oplus \omega_2 \tag{4.36}$$

Assim, pode-se chegar a:

$$\mathcal{L}^2(\mathbb{R}) = v_0 \oplus \omega_0 \oplus \omega_1 \oplus \omega_2 \oplus \omega_3 \dots \tag{4.37}$$

A figura 4.6 ilustra como ficou o aninhamento de subespaços considerando todos os conceitos sobre funções escalas e funções *wavelets* vistos até aqui.

Assim como para as funções escalas, há uma *equação de análise de multirresolução* para funções *wavelets*. Como  $\omega_j \subset v_{j+1}$ , então:

$$\psi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \phi(2t - n) \tag{4.38}$$

onde  $n \in \mathbb{Z}$  e  $h_1(n)$  é o *vetor de coeficientes* da função *wavelet*. Observa-se que as fun-

ções *wavelets* são definidas em termos das funções escalas. Ou seja, as funções escalas numa escala mais comprimida expandem não só a si mesmas, mas também as funções *wavelets*. Isto é visto no aninhamento de subespaços como  $\omega_j \subset v_{j+1}$ .

Como as funções escalas são usadas nas duas equações de análise de multirresolução (eqs. 4.29 e 4.38), pode-se extrair uma relação entre os coeficientes  $h(n)$  e  $h_1(n)$ :

$$h_1(n) = (-1)^n h(1-n) \tag{4.39}$$

ou quando estes vetores de coeficientes tiverem tamanho finito igual a  $N$ :

$$h_1(n) = (-1)^n h(N-1-n) \tag{4.40}$$

Figura 4.6: Aninhamento dos subespaços expandidos por bases formadas pelas funções escalas e pelas funções *wavelets*.

As bases  $\{\phi_{j,k}\}$  e  $\{\psi_{j,k}\}$  em conjunto, podem expandir o espaço  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$ :

$$\mathcal{L}^2(\mathcal{R}) = v_{j_0} \oplus \omega_{j_0} \oplus \omega_{j_0+1} \oplus \omega_{j_0+2} \oplus \omega_{j_0+3} \dots \tag{4.41}$$

Assim, uma função  $f(t)$  contida em  $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$  pode ser expandida da seguinte forma:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j_0,k} \cdot \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \tag{4.42}$$

A primeira parcela da eq. 4.42 representa a informação de baixa resolução, ou seja, a *aproximação*, que é expandida pelas funções escalas. A segunda parcela repre-

senta a informação de alta resolução, ou seja, os *detalhes*, que são incluídos gradualmente através das expansões por *wavelets*.

#### 4.2.3.4 Bancos de Filtros e a Transformada Wavelet Discreta

##### a) Análise

Foi visto que o deslocamento na variável independente e a mudança de escala das funções escalas e *wavelets* devem ser feitos de uma maneira determinada pela Transformada Wavelet Discreta:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (4.43)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4.44)$$

Seja a equação de análise de multirresolução para a função escala:

$$\varphi(t) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n) \quad (4.45)$$

Deseja-se reescrevê-la em termos de  $j$  e  $k$ . Como  $j$  e  $k$  determinam a variação de escala e de deslocamento na variável independente, basta substituir  $t$  na eq. 4.45 pelas variações já discutidas, ou seja, por  $(2^j t - k)$  :

$$\varphi(2^j t - k) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2(2^j t - k) - n) \quad (4.46)$$

Fazendo uma substituição de variáveis de forma que  $m = 2k + n$ , tem-se:

$$\varphi(2^j t - k) = \sum_m h(m - 2k) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} t - m) \quad (4.47)$$

Esta última equação mostra que é possível obter a função escala na escala  $j$  (inferior ou de menor resolução) a partir da função escala na escala  $j+1$  (superior ou de maior resolução). Ou seja, está se generalizando a equação de análise de multirresolução de forma a incluir a variável de escala  $j$ .

O mesmo processo de reescrever a equação de análise de multirresolução da função escala será feito para a função *wavelet*:

$$\psi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \varphi(2t-n) \quad (4.48)$$

Reescrevendo em termos de  $j$  e  $k$ :

$$\psi(2^j t - k) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \varphi(2(2^j t - k) - n) \quad (4.49)$$

Fazendo a substituição de variáveis  $m = 2k + n$ :

$$\psi(2^j t - k) = \sum_m h_1(m-2k) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} t - m) \quad (4.50)$$

A análise consiste em obter os coeficientes  $c$  (aproximação) e  $d$  (detalhes) da eq. 4.42. Sabe-se que para encontrar os coeficientes de uma expansão, deve-se usar o produto interno (ver eq. 4.15). Assim, para encontrar os coeficientes  $c_{j,k}$ :

$$c_{j,k} = \langle f(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \varphi_{j,k}(t) dt \quad (4.51)$$

Mas, já são conhecidas as variações de  $j$  e  $k$ . Então, substituindo a eq. 4.43 na eq. 4.51, vem:

$$c_{j,k} = \langle f(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) dt \quad (4.52)$$



A expressão  $\varphi(2^j t - k)$  já é conhecida. Assim, substituindo a eq. 4.46 na eq. 4.52 e fazendo algumas manipulações algébricas, chega-se a:

$$c_{j,k} = \sum_m h(m-2k) c_{j+1,m} \quad (4.53)$$

Esta equação (4.53) é usada para o cálculo dos coeficientes de aproximação da Transformada Wavelet Discreta. Observa-se que os coeficientes de uma determinada escala são obtidos a partir dos coeficientes de uma escala mais comprimida ( $j+1$ ) e usando os próprios coeficientes da função escala.

Da mesma forma que para os coeficientes de aproximação, para se encontrar os coeficientes  $d_{j,k}$  (detalhes), usa-se o produto interno:

$$d_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (4.54)$$

Seguindo-se o mesmo processo usado anteriormente, substitui-se a eq. 4.44 na eq. 4.54:

$$d_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) 2^{j/2} \psi(2^j t - k) dt \quad (4.55)$$

Substituindo-se a expressão para  $\psi(2^j t - k)$  (eq. 4.50) e fazendo-se as devidas manipulações algébricas, vem:

$$d_{j,k} = \sum_m h_1(m-2k) c_{j+1,m} \quad (4.56)$$

A eq. 4.56 é usada para calcular os coeficientes de detalhes da escala  $j$  da Transformada Wavelet Discreta.

As equações 4.53 e 4.56 são usadas em substituição ao uso direto do produto interno para o cálculo dos coeficientes da Transformada Wavelet Discreta. São equações recursivas, uma vez que dependem apenas dos coeficientes calculados na iteração anterior. Elas não utilizam diretamente as funções escala e *wavelet* para fazer a expansão, mas

apenas seus coeficientes obtidos da equação de análise de multirresolução.

As equações 4.53 e 4.56 representam um processo de *filtragem* por convolução (filtro *FIR*), seguida de uma subamostragem, 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* de escala são obtidos filtrando-se os coeficientes de aproximação do *nível* imediatamente anterior de escala usando como filtros os coeficientes da função escala para a aproximação e da função *wavelet* para o detalhe e, em seguida, realizando uma subamostragem. A figura 4.7 ilustra um estágio ou nível deste algoritmo de obtenção de coeficientes através de filtragem, que é conhecido como *Bancos de Filtros*, normalmente usado em Telecomunicações.

No processo de obtenção dos coeficientes de aproximação, o filtro determinado pelo vetor  $h(n)$  é um filtro passa-baixas. Para os coeficientes de detalhe, o vetor  $h_1(n)$  determina um filtro passa-altas. O processo de subamostragem consiste em descartar amostras intercaladas (uma sim, uma não) do sinal, de forma que se tenha a metade do número de amostras original. Normalmente, isto significa perda de informação, mas no caso da Transformada Wavelet Discreta, trata-se apenas de um “enxugamento” dos coeficientes, pois o processo de filtragem já fez a “retirada” da informação que seria perdida, recolocando-a nos outros coeficientes. Isto é mais bem entendido quando se visualiza o algoritmo de análise no domínio da frequência (fig. 4.9).

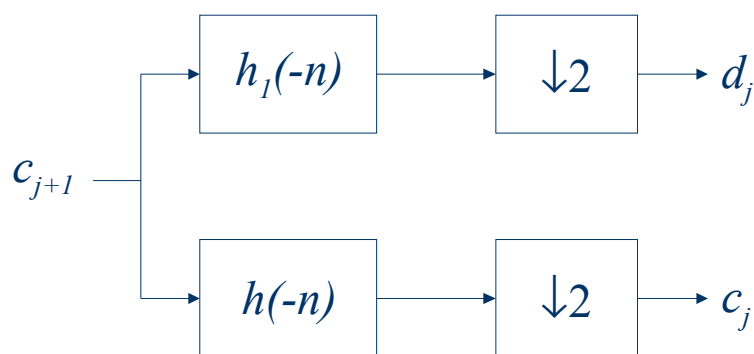


Figura 4.7: Um nível do algoritmo de análise da Transformada Wavelet Discreta.

O processo para 3 níveis é mostrado na figura 4.8.

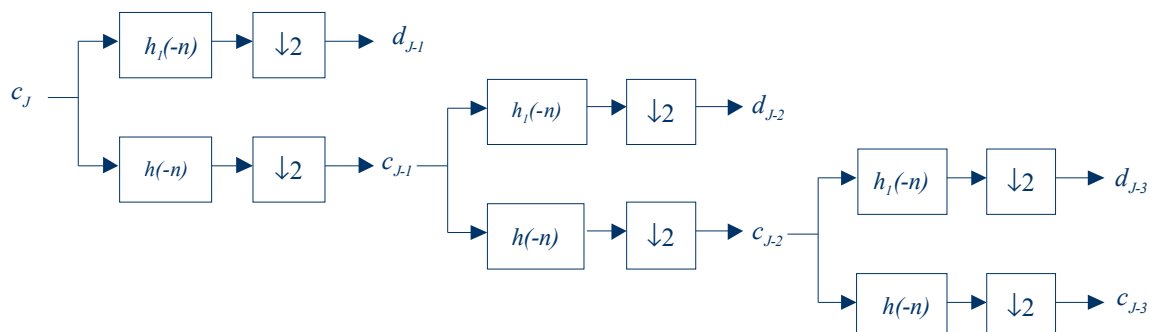


Figura 4.8: Algoritmo de análise da Transformada Wavelet Discreta para 3 níveis de decomposição.

Quando um sinal é decomposto pela Transformada Wavelet Discreta, seu efeito é bem característico no domínio da frequência (fig. 4.9). O resultado 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 a resolução está intimamente ligada à frequência do sinal, isto é, os detalhes são componentes de frequências gradualmente mais altas do sinal e são obtidos filtrando-o com um filtro passa-altas ( $h_1(n)$ ); a aproximação são os componentes de mais baixa frequência, obtidos com o filtro passa-baixas ( $h(n)$ ).

Deve-se observar, na figura 4.8, que os coeficientes  $c_J$  correspondem ao nível de mais alta resolução. Em outras palavras, eles são o próprio sinal amostrado. A decomposição vai em direção a uma escala de baixa resolução determinada arbitrariamente.

## b) Síntese

Até aqui, a preocupação era com o cálculo dos coeficientes da Transformada Wavelet Discreta a partir do sinal a ser analisado. Agora, pretende-se obter o sinal original a partir dos coeficientes da decomposição. Este é o processo de *síntese* ou *reconstrução* do sinal.

A reconstrução de um sinal decomposto pela Transformada Wavelet Discreta

é feita combinando-se os coeficientes de detalhes e de aproximação. Ou seja, se  $f(t) \in v_{j+1}$ , então se deve combinar os coeficientes de  $v_j$  e  $w_j$  para reconstruí-lo:

$$f(t) = \sum_k c_{j+1,k} 2^{\frac{j+1}{2}} \varphi(2^{j+1}t - k) \quad (4.57)$$

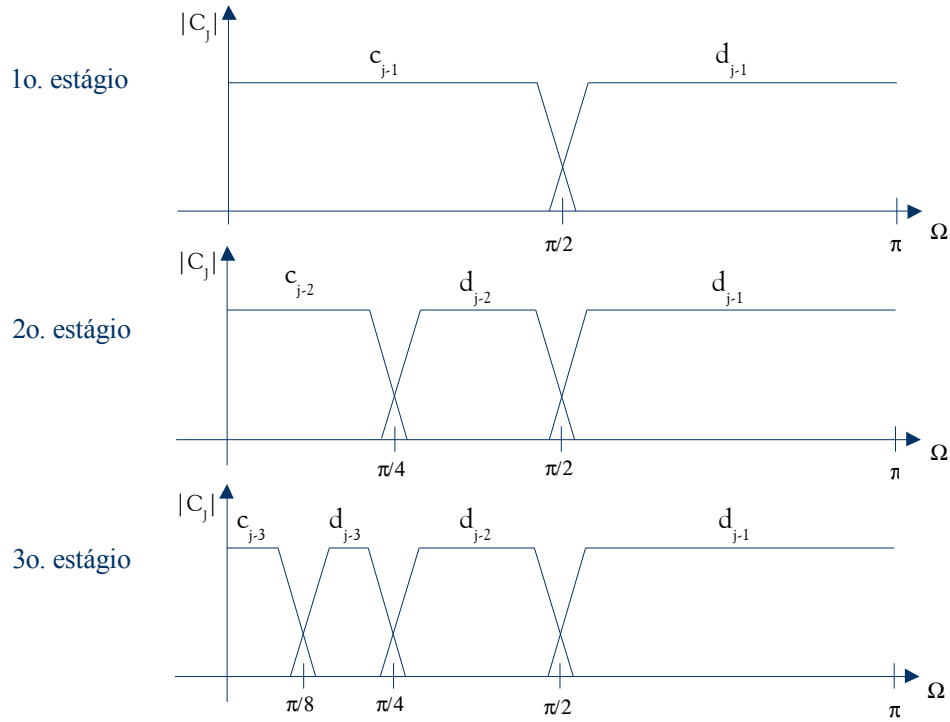


Figura 4.9: Análise no domínio da frequência.

Pode-se reescrever esta equação (4.57) em termos dos coeficientes do nível de resolução imediatamente inferior:

$$f(t) = \sum_k c_{j,k} 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) + \sum_k d_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4.58)$$

Tomando as equações de análise de multirresolução (eqs. 4.29 e 4.38):

$$\varphi(t) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n) \quad \psi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n)$$

e substituindo-as em 4.58, vem:

$$f(t) = \sum_k c_{j,k} \sum_n h(n) 2^{\frac{j+1}{2}} \varphi(2^{j+1}t - 2k - n) + \sum_k d_{j,k} \sum_n h_1(n) 2^{\frac{j+1}{2}} \psi(2^{j+1}t - 2k - n) \quad (4.59)$$

Multiplicando-se 4.57 e 4.59 por  $\varphi(2^{j+1}t - k)$ , igualando as duas equações e realizando algumas manipulações algébricas e trocas de variáveis (ver (BURRUS, et al., 1998)), chega-se a:

$$c_{j+1,k} = \sum_m c_{j,m} h(k - 2m) + \sum_m d_{j,m} h_1(k - 2m) \quad (4.60)$$

Esta é a equação para o algoritmo de síntese de um sinal, ou colocando de outra forma, esta equação representa o algoritmo para a Transformada Wavelet Discreta Inversa. Também é uma equação recursiva e, mais importante, também é um processo de filtragem, como no algoritmo de análise. Neste caso, porém, a filtragem é feita após uma super amostragem (*upsample*). Esta super amostragem consiste em inserir zeros entre cada par de amostras, “esticando” o sinal, no caso, dobrando seu número de amostras. Não há alteração de informação no sinal nesta operação. Um estágio deste algoritmo é mostrado na figura 4.10.

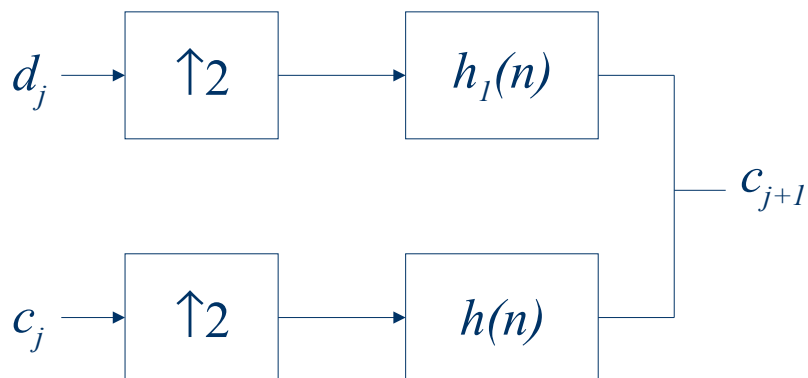


Figura 4.10: Um estágio do algoritmo da Transformada Wavelet Discreta Inversa.

A equação 4.60 realiza uma super amostragem nos coeficientes  $c_j$  e  $d_j$  e, em

seguida, uma filtragem com  $h(n)$  e  $h_1(n)$ , respectivamente. Somando-se os sinais resultantes, chega-se a  $c_{j+1}$ . Esta é a síntese feita pelo banco de filtros. Uma árvore com 3 estágios é mostrada na figura 4.11.

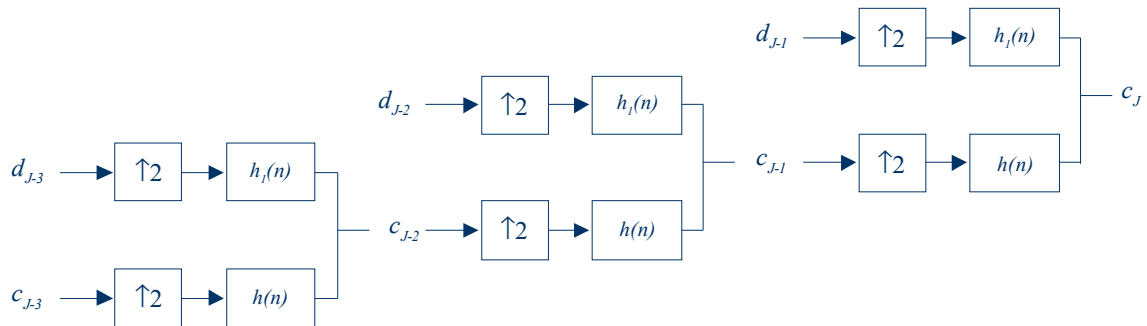


Figura 4.11: Algoritmo de síntese para 3 estágios.

### c) Teorema de Parseval

O Teorema de Parseval diz respeito ao particionamento da energia do sinal através dos coeficientes da expansão. Assim, para a equação 4.42 da Transformada Wavelet Discreta:

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

o Teorema de Parseval resultará em:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_{j_0,k}|^2 + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_{j,k}|^2 \tag{4.61}$$

com a energia particionada no tempo por  $k$  e na escala por  $j$ .

#### 4.2.3.5 Considerações sobre o Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta

O algoritmo para a Transformada Wavelet Discreta nada mais é do que processos muito comuns de filtragem e reamostragem usados largamente em processamento de sinais. Para cada escala, os coeficientes são obtidos filtrando e reamostrando os coeficientes de aproximação da escala anterior. As funções que formam a base para a expansão de sinais, função escala e função *wavelet*, determinam os filtros que serão usa-

dos no algoritmo. Com alguns ajustes, estes filtros são usados tanto na análise do sinal pela Transformada Wavelet Discreta quanto na sua síntese.

A implementação em computador se torna simples, pois é necessário apenas reunir algoritmos já conhecidos de filtragem e de reamostragem (*downsample* e *up-sample*). Diversos softwares matemáticos já possuem estes algoritmos prontos para uso, como é o caso do Matlab, trazendo, inclusive, os coeficientes de muitas das funções escalas e *wavelets* conhecidas.

O sinal acústico emitido por uma descarga parcial, ao ser decomposto pela Transformada Wavelet Discreta, é separado em níveis, cada um referente a uma banda de frequência particular. No processo de decomposição, o número de níveis é um parâmetro arbitrário. Assim, a informação de frequência está contida nos diferentes níveis de detalhe e no de aproximação, enquanto a informação temporal se mantém na variação dos coeficientes em cada nível. No presente trabalho, estes coeficientes são usados como parâmetros para a caracterização dos sinais acústicos das descargas parciais e devem conter a informação relativa ao teor de umidade. Porém, o volume de dados é muito grande e a correlação entre a umidade e os parâmetros mostrou-se bastante difícil de encontrar. Portanto, um outro passo no processamento das informações deve ser dado no sentido de interpretá-las e relacioná-las ao problema em questão. Este processamento é a identificação de padrões realizada pela *Análise de Componentes Principais*.

# 5

## *Processamento e Interpretação dos Parâmetros – O PCA*

### **5.1 EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES COM O PCA**

---

A identificação de padrões presentes nos dados pode ser uma tarefa difícil e demorada para ser feita manualmente quando o volume é muito grande e não se sabe exatamente qual característica observar. Um único sinal não estacionário contém muita informação, pois parâmetros, como frequência e amplitude, podem variar a cada instante (HUANG et al., 1998). Portanto, não se trata apenas de detectar componentes de frequências presentes no sinal, mas algo além disso, perceber padrões de frequências variando no tempo.

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística normalmente utilizada na identificação de padrões contidos em grandes conjuntos de dados. Na maioria das vezes, esses padrões não são facilmente percebidos numa análise superficial dos dados, estando ocultos no grande volume de informações. Além de detectar padrões, o PCA pode organizá-los em função de sua contribuição na formação do conjunto de dados.

#### **5.1.1 Descrição da Técnica PCA**

A técnica PCA atua na identificação de padrões em dados destacando suas similaridades e diferenças. Pode ser definida em termos da covariância num conjunto de dados organizados em forma matricial (JOLLIFFE, 2002). 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. Uma dimensão é um conjunto de dados formado por uma linha de elementos da matriz de dados original. A expressão matemática pode ser rapidamente deduzida da expressão da variância:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (X_i - \bar{X})}{n-1} \quad (5.1)$$

onde  $X_i$  representa o  $i$ -ésimo elemento,  $\bar{X}$  representa a média e  $n$  o número total de elementos. Para a variância entre duas dimensões (covariância), por exemplo,  $X$  e  $Y$ , tem-se:

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (5.2)$$

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 se pode deduzir 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 *signal*;
- 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.

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:

$$C^{n \times n} = [c_{X,Y} | c_{X,Y} = \text{cov}(Dim_X, Dim_Y)] \quad (5.3)$$

onde  $C^{n \times n}$  é a matriz de covariância,  $c_{X,Y}$  é o elemento posicionado na linha  $X$  e na coluna  $Y$  da matriz de covariância, sendo formado pela covariância entre as dimensões (colunas)  $X$  e  $Y$  da matriz de dados original.

As principais propriedades desta matriz são:

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

Calcular a matriz de covariância é apenas o primeiro passo da técnica PCA. O passo seguinte é calcular os autovetores e os autovalores associados para esta matriz. Cada autovetor será chamado de “componente” e sua contribuição na formação dos dados será medida pelo seu autovalor associado. Desta forma, os componentes podem ser organizados pela sua importância, daí o nome de “Análise de Componentes Principais”.

A técnica PCA pode ser desenvolvida como se segue.

### 1) Organizar os dados.

Seja  $M^{m \times n}$ , a matriz dos dados. Eles devem ser organizados de tal forma que os parâmetros formam as colunas de uma matriz, e cada medição ou observação destes parâmetros forma uma linha. Assim, tem-se  $n$  parâmetros e  $m$  observações ou medições destes parâmetros.

### 2) Subtrair a média.

A média de todos os parâmetros deve ser subtraída de cada linha da matriz  $M$ , formando a nova matriz  $M'$ .

### 3) Calcular a matriz de covariância.

A matriz de covariância  $C^{n \times n}$  deve ser obtida a partir dos dados com a média subtraída. Nota-se que esta matriz é quadrada de dimensão

$n \times n$ . Ou seja, o número de parâmetros determina a dimensão da matriz de covariância.

4) Obter os autovetores e os autovalores da matriz de covariância.

Os autovetores calculados devem ser unitários e organizados também na forma de uma matriz, definida como  $P^{n \times n}$ , onde cada coluna é um autovetor. Estes são os chamados componentes, e fornecem informações sobre os padrões presentes nos dados. A contribuição de cada um deles é dada pelo seus autovalores associados,  $\lambda_i$ , onde  $i$  varia de 1 a  $n$ .

Estes procedimentos definem a técnica PCA. Para ilustrá-los, segue um exemplo de aplicação.

### 5.1.2 Exemplo de Aplicação da Técnica PCA

Seja uma classe de 10 alunos de um curso de 8 semanas com 20 horas semanais de aula. Supõe-se que os alunos estão disponíveis durante 40 horas por semana, sobrando 20 horas livres para usar como quiserem, inclusive para estudar. Foram sintetizados os seguintes dados: média de horas estudadas por semana, frequência e nota final. Os dados estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1.: Dados do exemplo de aplicação da técnica PCA.

Aluno	Média de horas estudadas por semana	Frequência	Nota Final
1	15	156	100
2	10	160	90
3	12	160	90
4	18	152	85
5	20	160	100
6	16	148	80
7	08	140	60
8	14	156	85
9	06	160	70
10	20	140	95

Utilizando-se o Matlab, tem-se a matriz  $M$  e a matriz  $M'$  (Fig. 5.1).

```
>> M = [15 156 100; 10 160 90; 12 160 90; 18 152 85; 20 160 100; 16  
148 80; 08 140 60; 14 156 85; 06 160 70; 20 140 95]  
  
M =  
  
    15    156    100  
    10    160     90  
    12    160     90  
    18    152     85  
    20    160    100  
    16    148     80  
     8    140     60  
    14    156     85  
     6    160     70  
    20    140     95  
  
>> Mlinha = M-ones(10,1)*mean(M)  
  
Mlinha =  
  
    1.1000    2.8000   14.5000  
   -3.9000    6.8000    4.5000  
   -1.9000    6.8000    4.5000  
    4.1000   -1.2000   -0.5000  
    6.1000    6.8000   14.5000  
    2.1000   -5.2000   -5.5000  
   -5.9000  -13.2000  -25.5000  
    0.1000    2.8000   -0.5000  
   -7.9000    6.8000  -15.5000  
    6.1000  -13.2000    9.5000
```

Figura 5.1: Resultado do programa Matlab para as matrizes M e M'.

A matriz de covariância pode ser obtida, no Matlab, com o comando 'cov', conforme Fig. 5.2. Nota-se a simetria em relação à diagonal principal.

```
>> C = cov(Mlinha)  
  
C =  
  
    23.6556   -7.4222   43.9444  
   -7.4222   64.1778   37.1111  
    43.9444   37.1111  163.6111
```

Figura 5.2: Resultado do programa Matlab para a matriz de covariância.

A obtenção dos autovetores e autovalores da matriz de covariância com o Matlab, resulta na Fig. 5.3.

```
>> autovetores

autovetores =

   -0.2405    0.3803   -0.8930
   -0.2700   -0.9099   -0.3148
   -0.9323    0.1655    0.3215

>> autovalores

autovalores =

  185.6947         0         0
         0   60.5318         0
         0         0    5.2180
```

Figura 5.3: Autovalores e autovetores da matriz de covariância.

A disposição dos autovetores apresentados na Fig. 5.3 corresponde aos autovalores, ou seja, o autovetor (ou componente) mais importante é o terceiro da esquerda para a direita. O segundo em importância é o do meio. Lembrando que cada coluna é um autovetor ou componente. Assim, obtém-se a matriz  $P$  dos componentes principais organizados por ordem decrescente de importância (Fig. 5.4).

```
>> P = [ autovetores(:,1) autovetores(:,2) autovetores(:,3) ]

P =

   -0.2405    0.3803   -0.8930
   -0.2700   -0.9099   -0.3148
   -0.9323    0.1655    0.3215
```

Figura 5.4: Matriz  $P$  de componentes principais.

Como se vê, o procedimento para obtenção dos componentes principais dos dados é relativamente simples. A questão, a partir deste ponto, é qual o uso que se faz deles. Ou seja, como interpretar esses componentes como padrões presentes nos dados.

## 5.2 INTERPRETAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

Os autovetores de uma matriz de covariância têm a característica de serem ortogonais entre si (JOLLIFFE, 2002). E ortogonalidade, como visto no capítulo 4, implica em independência dos dados. Pode-se pensar nos componentes principais como

vetores ortogonais nos quais os dados originais podem ser projetados. Tal projeção pode revelar informações independentes presentes nos dados, o que pode ser pensado como sendo padrões embutidos. Para auxiliar na interpretação dos componentes principais, definem-se os *scores* como a projeção dos dados originais (normalmente já modificados através da subtração da média) nos autovetores da matriz de covariância, ou seja, nos componentes principais:

$$\text{scores} = M' * P \quad (5.4)$$

onde as matrizes são as mesmas definidas na seção 5.1.1. Na Fig. 5.5, pode-se ver a matriz de *scores* obtidas para o exemplo da seção anterior.

```
>> scores = Mlinha*P
scores =
-14.5395    0.2697    2.7983
-5.0940   -6.9262    2.7891
-5.5749   -6.1656    1.0030
-0.1957    2.5685   -3.4445
-16.8221   -1.4684   -2.9261
 6.0271    4.6203   -2.0068
28.7579    5.5480    1.2255
-0.3140   -2.5925   -1.1315
14.5146  -11.7567   -0.0692
-6.7595   15.9030    1.7622
```

Figura 5.5: Scores obtidos para o exemplo da seção 5.1.2 utilizando o Matlab.

A simples observação destes valores não ajuda na interpretação das informações obtidas com o PCA. Não existe uma interpretação padronizada para os componentes principais de dados. Cada conjunto de dados gerará componentes que devem ser analisados para se chegar a alguma interpretação. Porém, não existe garantia de que haverá uma interpretação plausível para qualquer conjunto de dados. Ainda assim, há pelo menos um procedimento que ajuda na interpretação dos dados. Ele será explicado utilizando-se os dados do exemplo da seção 5.1.2.

A ideia básica é associar cada um dos componentes principais (colunas da matriz *P*) a cada um dos *scores* (colunas da matriz *scores*). E isto deve ser feito utilizando

gráficos de barras. Então, para o primeiro componente principal, tem-se a figura 5.6. Nesta figura, o componente principal mais importante é chamado de PC1.

A análise consiste em verificar qual das variáveis no gráfico do componente se destaca, tanto positiva quanto negativamente. Neste caso, observa-se que a variável *Nota* tem maior destaque negativo. Não há valores positivos e os demais valores da componente são relativamente pequenos e iguais. Assim, pode-se dizer que este componente (o primeiro e mais importante) está relacionado com a nota dos alunos. O sinal apenas indica o sentido quando se compara com outros valores da componente e quando se analisa os *scores*.

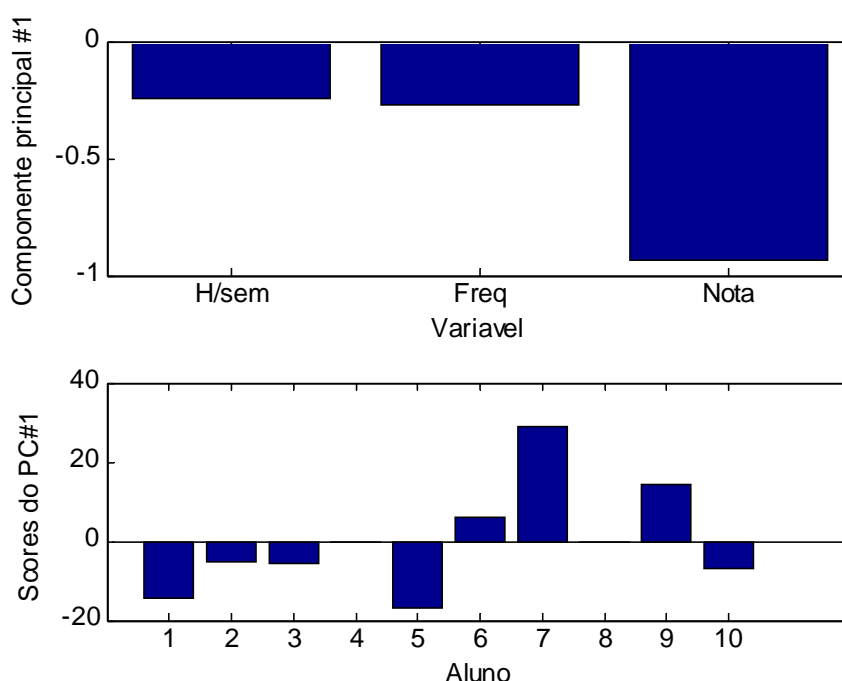


Figura 5.6. Análise do primeiro componente principal do exemplo da seção 5.1.2.

Ao se analisar os *scores* basta observar os itens de maior destaque. Neste caso, tem-se os alunos 7, 9, 1 e 5. O aluno 7 está em oposição ao componente ou seja, ele deve ter uma nota ruim. Pode-se confirmar isso observando a tabela 5.1. Realmente, este aluno possui a pior nota (60). Seguindo esta tendência de nota ruim está o aluno 9 que possui a segunda pior nota (70). Os alunos 1 e 5 são aqueles que possuem as melhores notas. Enfim, a análise dos *scores* serve para confirmar a interpretação do componente, que neste caso está intimamente relacionado com a variável *Nota*.

Este procedimento deve ser repetido para cada um dos componentes princi-

pais. Não há necessidade de se fazer para todos, mas só aqueles que forem considerados os mais importantes.

Seguindo o exemplo, a análise do segundo componente resulta no gráfico da figura 5.7. A variável *Frequência* parece ser a de maior destaque em oposição à variável *Horas de estudo por semana*, embora esta última tenha um valor não muito significativo. Para confirmar, analisam-se os *scores* e verifica-se que os alunos 9 e 10 se destacam neste componente. O aluno 9 deve possuir a melhor frequência, o que é confirmado observando-se a tabela 5.1: ele não tem nenhuma falta. Já o aluno 10 deve possuir a pior frequência, o que se confirma com o valor 140; ele não é o único com a pior frequência, mas as contribuições das demais variáveis neste componente o fazem se destacar.

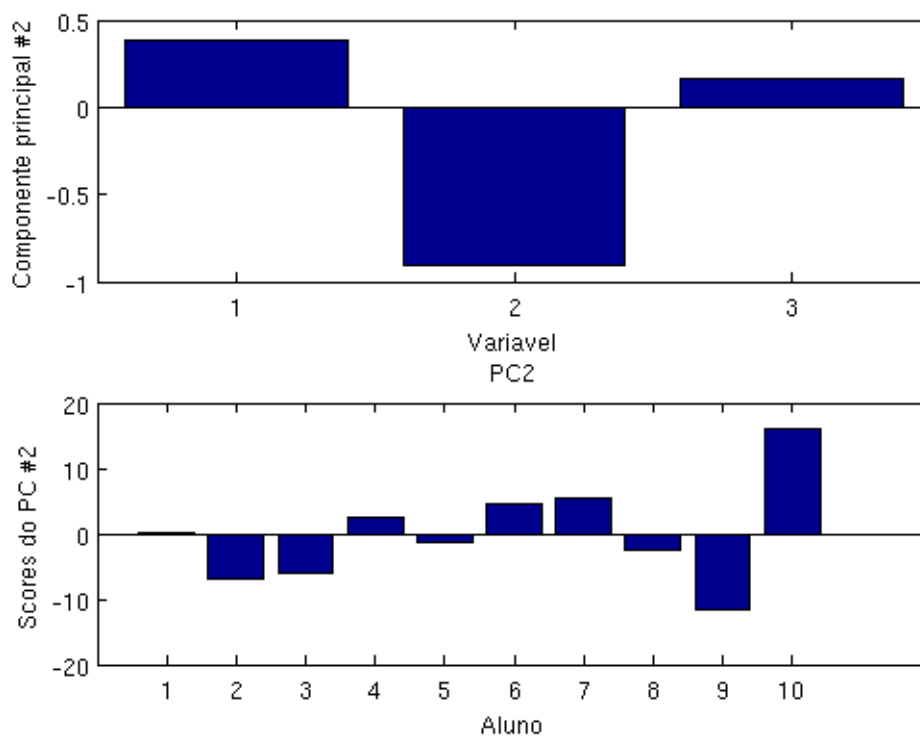


Figura 5.7. Análise do segundo componente principal do exemplo da seção 5.1.2.

A análise do terceiro componente resulta no gráfico da figura 5.8. Este é um componente relacionado com a quantidade de estudo fora da sala de aula. Observando os *scores* vê-se claramente quais alunos estudaram mais e quais alunos estudaram menos.

Apesar da simplicidade do exemplo, ele ilustra bem o procedimento de inter-



pretação das informações obtidas com a técnica PCA, pois os resultados obtidos podem ser facilmente confirmados através dos dados originais.

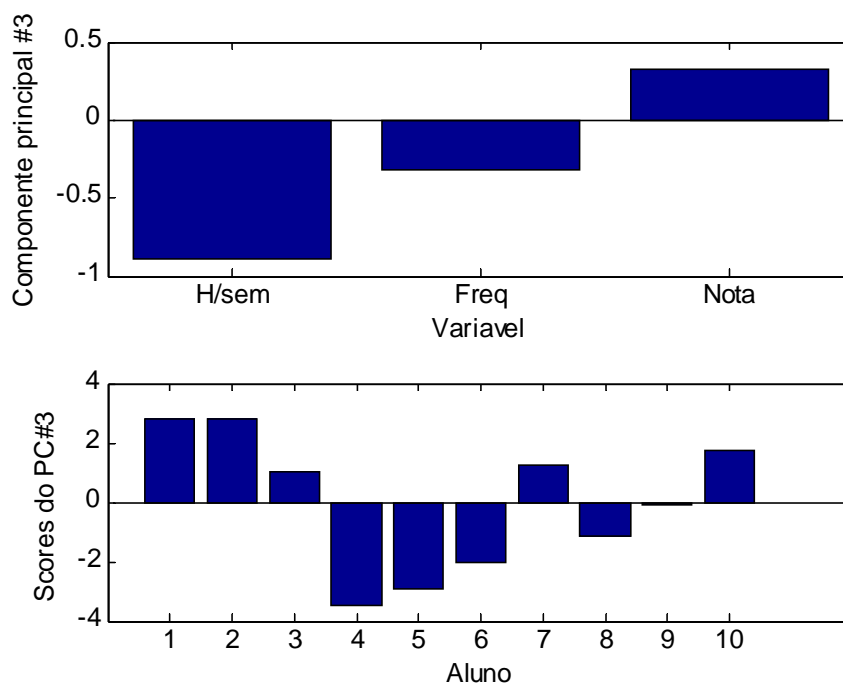


Figura 5.8. Análise do terceiro componente do exemplo da seção 5.1.2.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS DOS SINAIS ACÚSTICOS

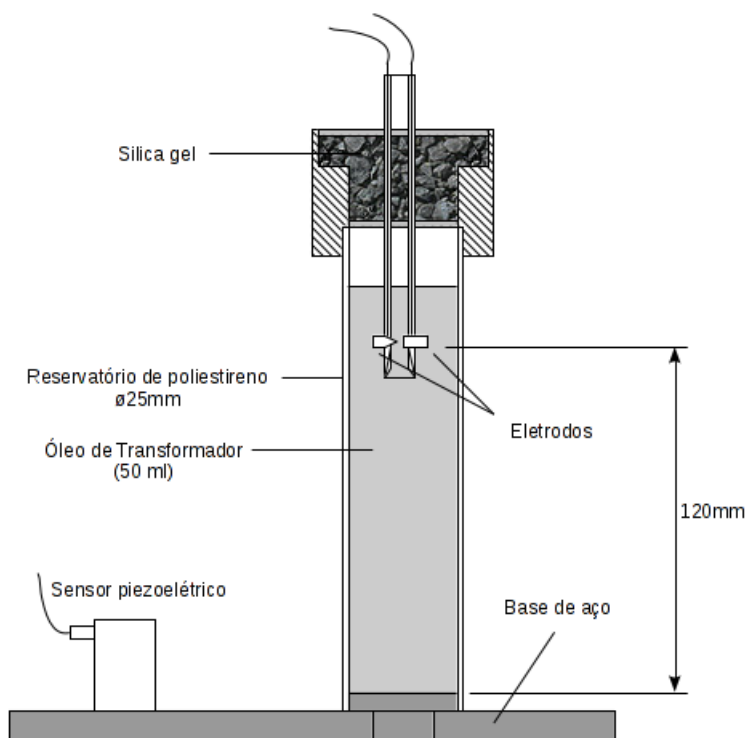
O volume de dados obtidos dos sinais acústicos é grande e de difícil interpretação, mesmo quando correlacionado diretamente com os resultados de análises de quantidade de umidade nos óleos testados. Várias tentativas de análises manuais foram feitas e nenhum resultado satisfatório obtido. A técnica PCA é a ferramenta escolhida para identificar os padrões de contaminação do óleo isolante utilizando-se os parâmetros obtidos com a Transformada Wavelet Discreta dos sinais acústicos de descargas parciais.

# 6

## *Experimentos e Resultados*

### **6.1 O APARATO EXPERIMENTAL**

Tendo-se em vista verificar a possibilidade de detecção da variação do teor de umidade no óleo isolante de transformadores de potência analisando-se sinais acústicos de descargas parciais, foi concebido um experimento que simula a situação em questão. O aparato consiste de um reservatório preparado para conter uma amostra de óleo sob estudo. Um dispositivo gerador de descargas elétricas é inserido no óleo e um sensor piezoelétrico montado do lado externo do reservatório tem a função de captar as ondas acústicas. A Fig. 6.1 mostra a montagem descrita.



*Figura 6.1: A montagem experimental.*

O sensor usado no experimento é do tipo banda larga, com resposta em fre-

quência aproximadamente plana chegando a 1MHz. A aquisição de sinais é feita pelo *National Instruments PXI-6133*, com 8 canais independentes e simultâneos, amostragem variável até 2,5MSamples/s e 14bits para quantização. Apenas dois canais são utilizados: um para o sinal acústico e outro para o sincronismo do disparo. A figura 6.2 mostra o equipamento de aquisição de sinais. A disposição do sensor, colocado na base e não em contato direto com o reservatório, foi escolhida de modo a minimizar ruídos eletromagnéticos causados pelas descargas, além de criar um caminho mais complexo para o sinal acústico.



Figura 6.2: Sistema de aquisição de sinais NI PXI-6133.

As amostras de óleo são testadas previamente pelo método de Karl Fischer, utilizando-se o equipamento *Mettler Toledo C20* (Fig. 6.3). Cada uma delas é exposta a 30 descargas cujos sinais acústicos são captados e armazenados para posterior análise. Todas as amostras são novas (sem uso em qualquer tipo de equipamento), do mesmo tipo de óleo, Nynas Nitro 4000A, fornecidas pela Divisão de Transformadores de Medidas da Alstom em Itajubá, MG, possuindo variados teores de umidade. No total, foram experimentadas 20 amostras de óleo, cujos teores de umidade estão indicados na Tabela 6.1.



Figura 6.3: Karl Fisher Mettler Toledo C20.

Tabela 6.1: Medidas de umidade nas amostras de óleos dos experimentos.

Amostra	Teor de umidade [ppm]
1	4,8
2	9,8
3	12,0
4	20,0
5	21,0
6	22,0
7	23,5
8	25,2
9	26,0
10	27,0
11	34,0
12	35,0
13	40,6
14	42,9
15	43,3
16	45,3
17	46,0
18	50,2
19	53,1
20	58,0

## 6.2 EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DOS SINAIS ACÚSTICOS

Em cada um dos 30 sinais acústicos obtidos de cada amostra de óleo, é feito um pré-processamento, cujo objetivo é reduzir a influência da intensidade das descargas elétricas, as quais variam muito. Cada descarga tem uma intensidade diferente e precisa ser normalizada em energia. Isto é feito calculando-se a energia total do sinal com a expressão (6.1):

$$E = \sum_i x^2(i) \quad (6.1)$$

onde  $x(i)$  é a amostra de índice  $i$ . Em seguida, cada amostra é dividida pela raiz quadrada da energia total. Com isto, a energia total do sinal normalizado será sempre unitária.

Uma vez normalizado, o sinal é dividido em 10 intervalos de tamanhos iguais (Fig. 6.4). Em cada intervalo é aplicada a Transformada Wavelet Discreta utilizando-se a *wavelet-mãe Daubechies-8* (db8) com 9 níveis de decomposição, o que produzirá 9 níveis de detalhe e um de aproximação. A *wavelet-mãe* db8 foi escolhida devido à sua boa correlação com as formas de ondas dos sinais acústicos das descargas parciais, o que minimiza o efeito dos coeficientes relacionados com ruídos e outros possíveis sinais espúrios.

Após a aplicação da Transformada Wavelet Discreta, é calculada a energia de cada um dos 10 níveis de decomposição de cada intervalo. Isto forma o conjunto de 100 parâmetros de um sinal. Uma característica importante é o fato de que a soma dos valores destes parâmetros devem resultar em 1, uma vez que o Teorema de Parseval se aplica à Transformada Wavelet Discreta e os sinais foram normalizados em energia.

## 6.3 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Como o objetivo dos experimentos é detectar as diferenças de umidade entre as amostras, os sinais são analisados dois a dois, sempre comparando um óleo mais seco com um mais úmido. Assim, para 20 amostras de óleo, quando combinadas duas a duas,

tem-se 190 experimentos. O resultado da análise para cada um deles deve indicar algum tipo de diferenciação, uma vez que todas são do mesmo tipo de óleo e a única diferença entre elas é o teor de umidade.

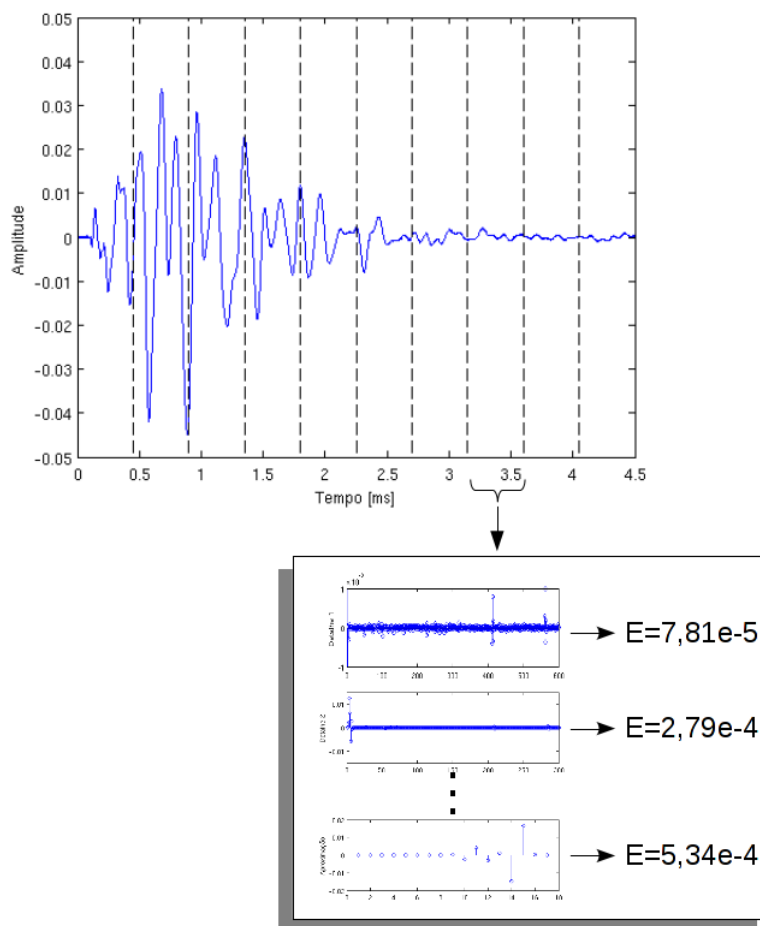


Figura 6.4: Ilustração do processo de extração de parâmetros de um sinal acústico de descarga parcial.

A análise segue a mesma rotina apresentada no capítulo 5, com a análise dos componentes principais e seus *scores*. Para isso, tomam-se os parâmetros extraídos dos sinais acústicos e montam-se matrizes usando sempre os dados de cada par de amostras de óleo. Isso deve resultar em 190 matrizes de dimensão 60x100. Elas são submetidas ao algoritmo do PCA para obtenção dos componentes principais e seus *scores* para, em seguida, serem analisados. Por exemplo, o vigésimo experimento testa amostras com 9,8ppm e 12,0ppm de teor de umidade. Tomando um componente qualquer dentre os 100 que foram obtidos, constrói-se os resultados apresentados na figura 6.5. Nota-se que os scores não indicam nenhuma tendência de separar as duas amostras. As amostras

de óleo seriam perfeitamente separadas (identificadas pelo seu teor de umidade) se os *scores* dos primeiros 30 sinais na figura 6.5 apresentassem um sinal (positivo ou negativo) oposto ao dos *scores* dos 30 sinais seguintes. Portanto, este não é um bom PC.

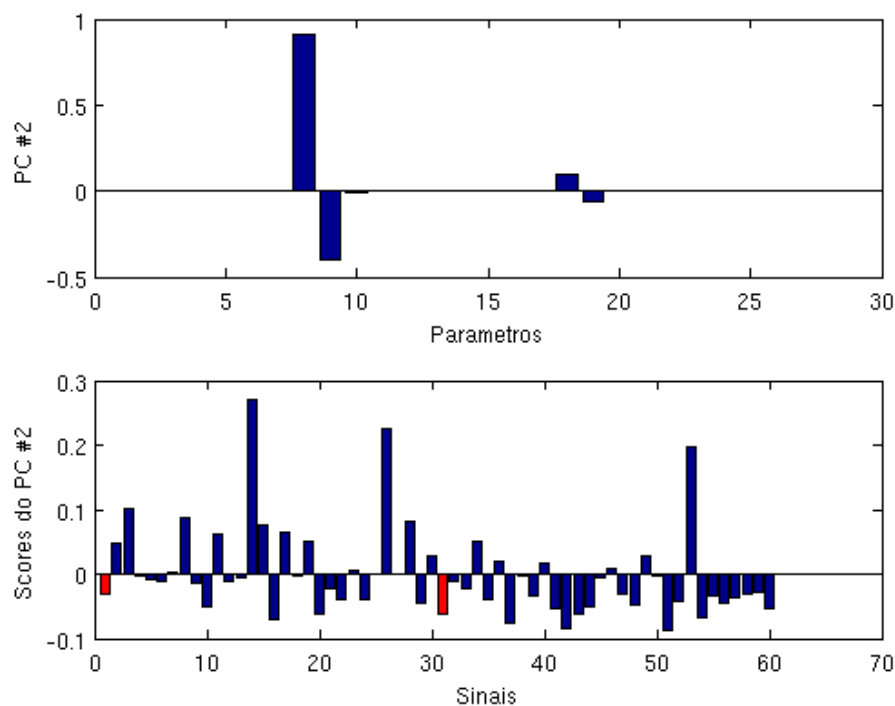


Figura 6.5: Análise de um PC qualquer.

O trabalho de análise consiste, então, em encontrar pelo menos um PC, com a maior contribuição possível, que permita identificar os dois grupos de 30 sinais das amostras de óleo. Um exemplo disso para as mesmas duas amostras de óleo aparece na figura 6.6. Nela, pode-se ver que há uma separação bem evidente entre os sinais das duas amostras de óleo ao se observar seus *scores*.

## 6.4 RESULTADOS

O gráfico que exhibe os *scores* na Fig. 6.6 mostra que a maioria dos primeiros 30 sinais possuem valores positivos. Estes sinais são provenientes da amostra de 9,8ppm de teor de umidade. Os 30 sinais seguintes, com *scores* negativos em sua maioria, foram obtidos do óleo com 12,0ppm de umidade. Pode-se dizer, então, que a análise através da metodologia apresentada foi capaz de detectar uma variação no teor de umidade des-

sas amostras. A análise dos outros 189 experimentos resultaram em gráficos muito semelhantes a este, mas não são exibidos aqui para não tornar este capítulo volumoso e enfadonho. Considerando-se 190 experimentos um número razoável, pode-se aceitar o resultado como prova da hipótese apresentada no capítulo 1.

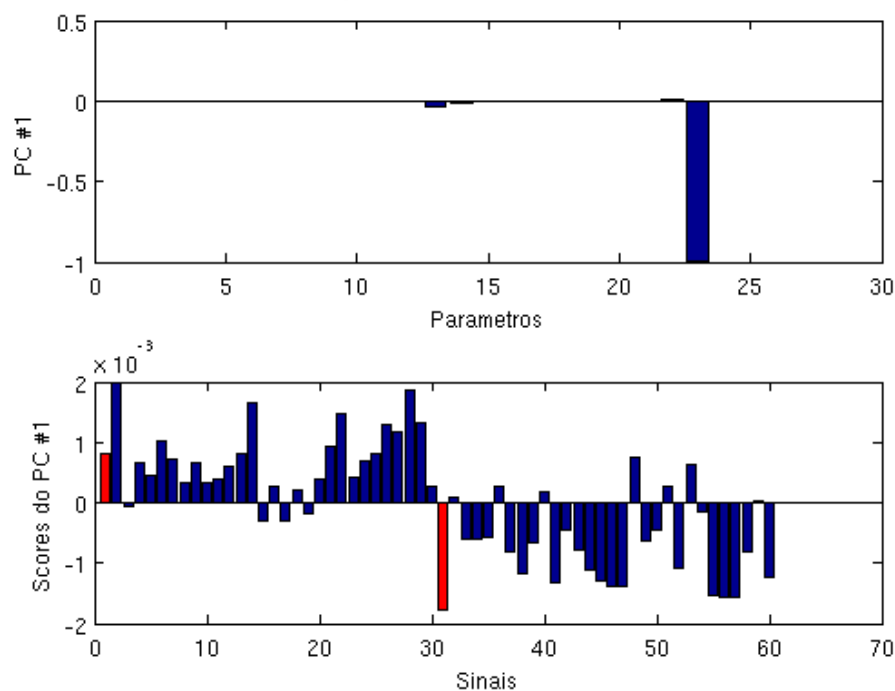


Figura 6.6: Análise de um PC satisfatório.

Porém, é possível observar na Fig. 6.6 que alguns sinais não seguem o mesmo padrão, o que pode ser considerada uma falsa identificação de variação. Assim, para medir a eficiência da metodologia, é feita uma contagem dentre os 60 sinais de cada experimento para verificar quantos correspondem ao padrão identificado, ou seja, quantos “acertam” a indicação de variação de umidade.

A Tabela A.1 do Apêndice A exibe os resultados dos 190 experimentos quanto à contagem do número de acertos na identificação da variação de umidade. A média de acertos é 51 em 60, ou seja 85% dos sinais, com um desvio-padrão de 5.

Um histograma desses dados é apresentado na figura 6.7. Ele representa a distribuição do número de acertos e confirma o valor mais frequente em torno de 51. Ele também apresenta um espalhamento dos resultados, dando uma ideia do desvio-padrão.



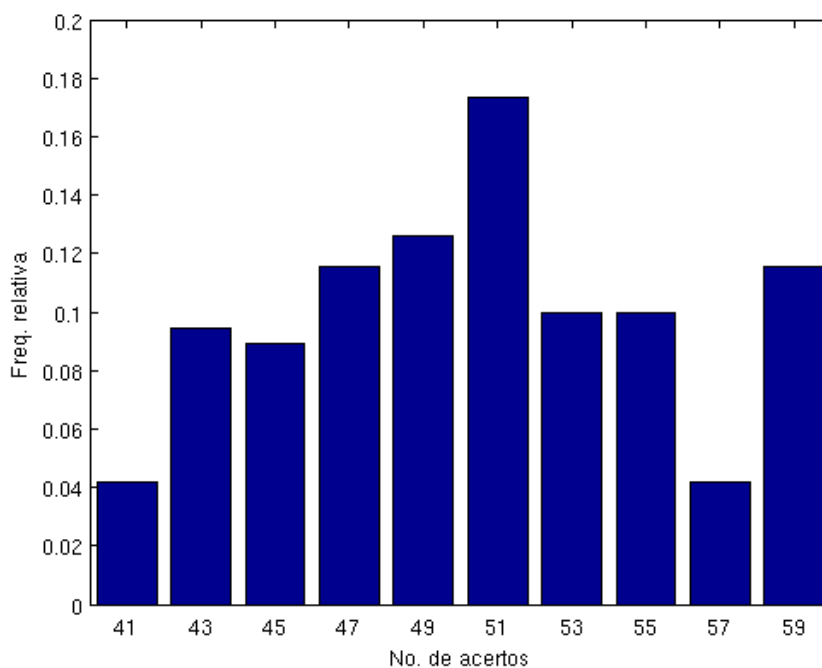


Figura 6.7: Histograma do número de sinais que confirmam a variação do teor de umidade nas amostras de óleo.

As descargas parciais não são iguais umas às outras, o que significa que os sinais acústicos podem possuir diferenças significativas entre si. Este pode ser o motivo de alguns sinais no conjunto dos 30, que foram coletados para cada amostra de óleo, não apresentarem as características indicativas de umidade detectadas nos outros.

Com uma taxa de 85% de acertos, pode-se dizer que a metodologia apresenta uma chance razoável de indicar corretamente uma variação de umidade. É importante destacar que em alguns experimentos, a diferença de teor de umidade entre as amostras foi de apenas 1ppm, como no experimento 55, com 46 acertos, ou ainda menor, como no experimento 113, também com 46 acertos.

# 7

## *Conclusões*

### **7.1 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES**

---

O principal tema deste trabalho é a contribuição no problema da detecção de variação do teor de umidade em óleo de transformador. A meta proposta era verificar esta possibilidade através do processamento dos sinais acústicos das descargas parciais, o que permitiria o desenvolvimento de uma metodologia totalmente não invasiva para monitoramento do isolamento dos transformadores de potência. Como discutido, este tipo de medição sempre é feito de forma invasiva, com coleta de amostras ou inserção de sensores. A técnica proposta contorna estes problemas.

Os dados e resultados de análise apresentados no capítulo 6 confirmam esta possibilidade, ou seja, a hipótese introduzida no capítulo 1 pode ser considerada confirmada. Apesar dos experimentos não terem sido feitos num transformador de potência, eles reproduziram as principais características do caso real, as quais são a produção da descarga no interior do isolamento, a propagação acústica pelo isolamento e por uma estrutura e, finalmente, a detecção do sinal pelo lado externo do equipamento. Então, é possível detectar a modificação da resposta dinâmica do sistema formado pela estrutura metálica do transformador e seu isolamento analisando-se os sinais de emissão acústica produzidos pelas descargas parciais, modificação esta causada especificamente pelo aumento do teor de umidade no óleo isolante. Como num curto espaço de tempo a estrutura metálica dificilmente irá apresentar modificações significativas, o que resta para ser detectado são modificações no isolamento.

Com a confirmação da hipótese, abre-se um novo caminho para monitorar outros problemas no isolamento, como gases dissolvidos ou partículas em suspensão no óleo isolante. Para isso, novos experimentos devem ser conduzidos de forma semelhante aos apresentados neste trabalho, trocando-se apenas o tipo de contaminação.

## **7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

---

Para a continuidade deste trabalho, uma tarefa importante ainda precisa ser feita, que é encontrar qual o parâmetro ou comportamento característico de algum parâmetro que indique especificamente a variação de umidade. Realizar isto permitirá quantificar a variação de umidade e, possivelmente, estimar seu teor. Este passo é imprescindível para detectar outros tipos de problemas (como gases dissolvidos) simultaneamente ao problema da umidade.

Durante os trabalhos de laboratório, uma dificuldade marcante permeou os experimentos: a grande variabilidade dos sinais de descargas parciais. Não existe muita uniformidade nas características destes sinais, ou seja, um sinal nunca é semelhante a outro, mesmo que aconteça alguns segundos depois. Este problema pode ser contornado se o uso dos sinais de descarga parcial for substituído por outra fonte de ondas acústicas. A proposta para esta nova abordagem é utilizar um outro elemento piezoelétrico, semelhante ao detector, que produza pulsos acústicos que atravessem algum local do transformador preenchido com o óleo isolante e seja detectado da mesma forma como se detecta as descargas parciais neste trabalho. Esta proposta já está em andamento e logo será apresentada.

# Referências

- ADAMO, F.; ANDRIA, G.; ATTIVISSIMO, F.; GIAQUINTO, N. An acoustic method for soil moisture measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, USA, v. 53, n. 4, agosto 2004.
- ARAKELIAN, V.G.; FOFANA, I. Water in oil-filled high-voltage equipment part I: states, solubility and equilibrium in insulating materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 23, n. 4, julho/agosto 2007.
- AUCKLAND, D.W.; HYDE, J.R.; MCGRAIL, A.J.; VARLOW, B.R. The ultrasonic location of discharges in transformers - a new approach. In: *Conference Record of 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1994, Pittsburgh, PA USA. *Anais...*, p. 77-78.
- BARTNIKAS, R. Partial discharge: their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, USA, v. 9, n. 5, outubro 2002.
- BEALS, R. *Advanced mathematical analysis*. New York: Springer-Verlag, 1973.
- BOGGS, S.A. Partial discharge: overview and signal generation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 6, n. 4, julho/agosto 1990.
- BUERSCHAPER, B.; KLEBOTH-LUGOVA, O.; LEIBFRIED, T. The electrical strength of transformer oil in a transformerboard-oil system during moisture non-equilibrium. In: *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2003, Albuquerque, NM, USA. *Anais...*, p. 269-272.
- BURRUS, C.S.; GOPINATH, R.A.; GUO, H. *Introduction to wavelets and wavelet transforms*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- CHAI, M.L.; THAYOON, Y.H.M.; GHOSH, P.S.; SHA'AMERI, A.Z.; TALIB, M.A. Identification of different types of partial discharge sources from acoustic emission signals in the time-frequency representation. In: *Proceedings of First International Power and Energy Conference - PECon*, 2006, Putrajaya, Malaysia. *Anais...*, p. .
- CHEN, L.J.; TSAO, T.P.; LIN, Y.H. New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, USA, v. 20, n. 4, outubro 2005.
- DU, Y.; MAMISHEV, A.V.; LESIEUTRE, B.C.; ZAHN, M.; KANG, S.H. Moisture solubility for differently conditioned transformer oils. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 8, n. 5, outubro 2001.

FERRARA, K.W.; ALGAZI, V.R.; LIU, J. The effect of frequency depend scattering and attenuation on the estimation of blood velocity using ultrasound. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, USA, v. 39, n. 6, novembro 1992.

GRAPS, A. An introduction to wavelets. *IEEE Computational Science and Engineering*, USA, v. 2, n. 2, 1995.

HASSAN, O.; SHYEGANI, A.A.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E.; ABU-ELZAHAB, E.M.; GILANY, M.I. Detection of oil-pressboard insulation aging with dielectric spectroscopy in time and frequency domain measurements. In: *Proceedings of 2004 International Conference on Solid Dielectrics*, 2004, Toulouse, França. *Anais...*, p. 665-668.

HUANG, N.E.; SHEN, Z.; LONG, S.R.; WU, M.L.; SHIH, H.H.; ZHENG, Q.; YEN, N.C.; TUNG, C.C.; LIU, H.H. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proc. Royal Society London*, London, UK, v. 454, n. , 1998.

JEONG, H.; JANG, Y. Fracture source location in thin plates using the wavelet transform of dispersive waves. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, USA, v. 47, n. 3, maio 2000.

JOLLIFE, I.T. *Principal component analysis*. New York: Springer, 2002.

KING, C.; HO, B. Simultaneous measurement of material characteristics of layered structures by a single acoustic interrogation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, USA, v. 42, n. 6, dezembro 1993.

LUNDGAARD, L.E. Partial discharge - parte XIII: acoustic partial discharge - fundamental considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 8, n. 4, julho/agosto 1992.

MARKALOUS, S.M.; FESER, K. All-acoustic pd measurements of oil/paper-insulated transformers for pd-localization. In: *Proceedings Second International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials (APTADM)*, 2004, USA. *Anais...*, p. 106-112.

MILASCH, M. *Manutenção de transformadores em líquido isolante*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

MOBLEY, R.K. *An introduction to predictive maintenance*. USA: Butterworth-Heinemann, 2002.

NATTRASS, D.A. Partial discharge XVII: the early history of partial discharge research. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 9, n. 4, julho/agosto 1993.

OOMMENT, T.V.; PREVOST, T.A. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II - maintaining insulation integrity and life. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 22, n. 2, março/abril 2006.

PAOLETTI, G.J.; GOLUBEV, A. Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, USA, v. 37, n. 1, janeiro/fevereiro 2001.

PEIRLINCKX, L.; PINTELON, R.; BIESEN, L.P.V. Identification of parametric models for ultrasonic wave propagation in the presence of absorption and dispersion. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, USA, v. 40, n. 4, julho 1993.

PERRISSIN-FABERT, I.; JAYET, Y.; GUERJOUA, R.E. Nondestructive evaluation of materials using an inserted piezoelectric sensor - correlation with hardness measurement. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, USA, v. 42, n. 4, julho 1995.

POMPILI, M.; MAZZETTI, C.; BARTNIKAS, R. Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under ac conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 12, n. 2, abril 2005.

PREVOST, T.A.; OOMMEN, T.V. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part I - history and development. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 22, n. 1, janeiro/fevereiro 2006.

ROUSE, T.O. Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 14, n. 3, maio/junho 1998.

SAKODA, T.; ARITA, T.; NIEDA, H.; ANDO, K.; OTSUB, M.; HONDA, C. Studies of elastic waves caused by corona dischargers in oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 6, n. 6, dezembro 1999.

SAKODA, T.; NIEDA, H.; ANDO, K. Characteristics of elastic waves caused by corona discharges in an oil-immersed pole transformer. *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, USA, v. 8, n. 2, abril 2001.

STRACHAN, S.M.; RUDD, S.; MCARTHUR, S.D.J.; JUDD, M.D.; MEIJER, S.; GULSKI, E. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 15, n. 1, fevereiro 2008.

VARLOW, B.R.; AUCKLAND, D.W.; SMITH, C.D.; ZHAO, J. Non-destructive diagnostics of insulating systems: acoustic emission analysis of high voltage insulation. *IEE Proc. Scie. Measurement Technologies*, USA, v. 146, n. 5, setembro 1999.

WATERS, K.R.; MOBLEY, J.; MILLER, J.G. Causality-imposed (Kramers-Kronig) relationships between attenuation and dispersion. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, USA, v. 52, n. 5, maio 2005.

WEAR, K.A. The effects of frequency-dependent attenuation and dispersion on sound speed measurements: applications in human trabecular bone. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, USA, v. 47, n. 1, janeiro 2000.

WEBB, M. Water in oils. In: *IEE Colloquium On An Engineering Review of Liquid Insulation*, 1997, London, UK. *Anais...* The Institution of Electrical Engineers, p. 2/1-2/6.

Xin-gang, C.; Wei-gen, C.; Liang-ling, G. Research of on-line monitoring of moisture content in transformer oil. In: *China International Conference on Electricity Distribution - CIGRE 2008*, 2008, Guangzhou. *Anais...* , p. 1-4.

YANG, L.; JUDD, M.D. Recognizing multiple partial discharge sources in power transformers by wavelet analysis of UHF signals. *IEE Proceedings Sci. Meas. Technol.*, USA, v. 150, n. 3, maio 2003.

SENSORES.GIF, 2011. Altura: 485 pixels. Largura: 148 pixels. 10,8kb. Formato: GIFF. Disponível em <<http://www.fujicera.co.jp/product/e/05/image/p29.gif>>. Acesso em: 24 fev. 2011.

# Apêndice A

## A.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM ÓLEO DE TRANSFORMADOR

---

Tabela A.1: Resultados dos experimentos com óleo de transformador.

Experimento	Amostras	No. de Acertos
1	4,8ppm/9,8ppm	52
2	4,8ppm/12,0ppm	59
3	4,8ppm/20,0ppm	60
4	4,8ppm/21,0ppm	51
5	4,8ppm/22,0ppm	52
6	4,8ppm/23,5ppm	50
7	4,8ppm/25,2ppm	48
8	4,8ppm/26,0ppm	46
9	4,8ppm/27,0ppm	51
10	4,8ppm/34,0ppm	53
11	4,8ppm/35,0ppm	53
12	4,8ppm/40,6ppm	60
13	4,8ppm/42,9ppm	48
14	4,8ppm/43,3ppm	58
15	4,8ppm/45,3ppm	54
16	4,8ppm/46,0ppm	48
17	4,8ppm/50,2ppm	44
18	4,8ppm/53,1ppm	53
19	4,8ppm/58,0ppm	48
20	9,8ppm/12,0ppm	57
21	9,8ppm/20,0ppm	55
22	9,8ppm/21,0ppm	50
23	9,8ppm/22,0ppm	41



24	9,8ppm/23,5ppm	47
25	9,8ppm/25,2ppm	51
26	9,8ppm/26,0ppm	57
27	9,8ppm/27,0ppm	54
28	9,8ppm/34,0ppm	43
29	9,8ppm/35,0ppm	52
30	9,8ppm/40,6ppm	60
31	9,8ppm/42,9ppm	42
32	9,8ppm/43,3ppm	50
33	9,8ppm/45,3ppm	48
34	9,8ppm/46,0ppm	51
35	9,8ppm/50,2ppm	52
36	9,8ppm/53,1ppm	50
37	9,8ppm/58,0ppm	43
38	12,0ppm/20,0ppm	44
39	12,0ppm/21,0ppm	59
40	12,0ppm/22,0ppm	44
41	12,0ppm/23,5ppm	47
42	12,0ppm/25,2ppm	52
43	12,0ppm/26,0ppm	42
44	12,0ppm/27,0ppm	44
45	12,0ppm/34,0ppm	50
46	12,0ppm/35,0ppm	55
47	12,0ppm/40,6ppm	60
48	12,0ppm/42,9ppm	54
49	12,0ppm/43,3ppm	56
50	12,0ppm/45,3ppm	48
51	12,0ppm/46,0ppm	52
52	12,0ppm/50,2ppm	43
53	12,0ppm/53,1ppm	46
54	12,0ppm/58,0ppm	57
55	20,0ppm/21,0ppm	46
56	20,0ppm/22,0ppm	49
57	20,0ppm/23,5ppm	48
58	20,0ppm/25,2ppm	45

59	20,0ppm/26,0ppm	48
60	20,0ppm/27,0ppm	48
61	20,0ppm/34,0ppm	44
62	20,0ppm/35,0ppm	50
63	20,0ppm/40,6ppm	59
64	20,0ppm/42,9ppm	57
65	20,0ppm/43,3ppm	51
66	20,0ppm/45,3ppm	55
67	20,0ppm/46,0ppm	44
68	20,0ppm/50,2ppm	55
69	20,0ppm/53,1ppm	60
70	20,0ppm/58,0ppm	51
71	21,0ppm/22,0ppm	50
72	21,0ppm/23,5ppm	51
73	21,0ppm/25,2ppm	42
74	21,0ppm/26,0ppm	49
75	21,0ppm/27,0ppm	44
76	21,0ppm/34,0ppm	41
77	21,0ppm/35,0ppm	47
78	21,0ppm/40,6ppm	60
79	21,0ppm/42,9ppm	56
80	21,0ppm/43,3ppm	50
81	21,0ppm/45,3ppm	55
82	21,0ppm/46,0ppm	55
83	21,0ppm/50,2ppm	55
84	21,0ppm/53,1ppm	45
85	21,0ppm/58,0ppm	51
86	22,0ppm/23,5ppm	59
87	22,0ppm/25,2ppm	43
88	22,0ppm/26,0ppm	49
89	22,0ppm/27,0ppm	43
90	22,0ppm/34,0ppm	46
91	22,0ppm/35,0ppm	53
92	22,0ppm/40,6ppm	60
93	22,0ppm/42,9ppm	52

94	22,0ppm/43,3ppm	46
95	22,0ppm/45,3ppm	48
96	22,0ppm/46,0ppm	44
97	22,0ppm/50,2ppm	45
98	22,0ppm/53,1ppm	51
99	22,0ppm/58,0ppm	47
100	23,5ppm/25,2ppm	49
101	23,5ppm/26,0ppm	44
102	23,5ppm/27,0ppm	46
103	23,5ppm/34,0ppm	52
104	23,5ppm/35,0ppm	53
105	23,5ppm/40,6ppm	58
106	23,5ppm/42,9ppm	52
107	23,5ppm/43,3ppm	42
108	23,5ppm/45,3ppm	52
109	23,5ppm/46,0ppm	54
110	23,5ppm/50,2ppm	52
111	23,5ppm/53,1ppm	59
112	23,5ppm/58,0ppm	50
113	25,2ppm/26,0ppm	46
114	25,2ppm/27,0ppm	48
115	25,2ppm/34,0ppm	46
116	25,2ppm/35,0ppm	50
117	25,2ppm/40,6ppm	60
118	25,2ppm/42,9ppm	59
119	25,2ppm/43,3ppm	52
120	25,2ppm/45,3ppm	54
121	25,2ppm/46,0ppm	53
122	25,2ppm/50,2ppm	53
123	25,2ppm/53,1ppm	59
124	25,2ppm/58,0ppm	49
125	26,0ppm/27,0ppm	47
126	26,0ppm/34,0ppm	47
127	26,0ppm/35,0ppm	49
128	26,0ppm/40,6ppm	60

129	26,0ppm/42,9ppm	53
130	26,0ppm/43,3ppm	50
131	26,0ppm/45,3ppm	60
132	26,0ppm/46,0ppm	56
133	26,0ppm/50,2ppm	46
134	26,0ppm/53,1ppm	46
135	26,0ppm/58,0ppm	46
136	27,0ppm/34,0ppm	40
137	27,0ppm/35,0ppm	43
138	27,0ppm/40,6ppm	59
139	27,0ppm/42,9ppm	43
140	27,0ppm/43,3ppm	50
141	27,0ppm/45,3ppm	55
142	27,0ppm/46,0ppm	47
143	27,0ppm/50,2ppm	55
144	27,0ppm/53,1ppm	60
145	27,0ppm/58,0ppm	51
146	34,0ppm/35,0ppm	52
147	34,0ppm/40,6ppm	60
148	34,0ppm/42,9ppm	52
149	34,0ppm/43,3ppm	51
150	34,0ppm/45,3ppm	54
151	34,0ppm/46,0ppm	52
152	34,0ppm/50,2ppm	49
153	34,0ppm/53,1ppm	58
154	34,0ppm/58,0ppm	40
155	35,0ppm/40,6ppm	55
156	35,0ppm/42,9ppm	51
157	35,0ppm/43,3ppm	49
158	35,0ppm/45,3ppm	51
159	35,0ppm/46,0ppm	50
160	35,0ppm/50,2ppm	49
161	35,0ppm/53,1ppm	55
162	35,0ppm/58,0ppm	54
163	40,6ppm/42,9ppm	46

164	40,6ppm/43,3ppm	60
165	40,6ppm/45,3ppm	60
166	40,6ppm/46,0ppm	58
167	40,6ppm/50,2ppm	43
168	40,6ppm/53,1ppm	51
169	40,6ppm/58,0ppm	48
170	42,9ppm/43,3ppm	55
171	42,9ppm/45,3ppm	54
172	42,9ppm/46,0ppm	47
173	42,9ppm/50,2ppm	52
174	42,9ppm/53,1ppm	52
175	42,9ppm/58,0ppm	52
176	43,3ppm/45,3ppm	56
177	43,3ppm/46,0ppm	55
178	43,3ppm/50,2ppm	56
179	43,3ppm/53,1ppm	54
180	43,3ppm/58,0ppm	51
181	45,3ppm/46ppm	50
182	45,3ppm/50,2ppm	49
183	45,3ppm/53,1ppm	55
184	45,3ppm/58,0ppm	54
185	46,0ppm/50,2ppm	53
186	46,0ppm/53,1ppm	48
187	46,0ppm/58,0ppm	48
188	50,2ppm/53,1ppm	45
189	50,2ppm/58,0ppm	44
190	53,1ppm/58,0ppm	45
<b>Média:</b>		51

# *Apêndice* **B**

## **B.1 PUBLICAÇÕES**

---

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; LAMBERT-TORRES, Germano. A Strategy to Locate Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic Emission. In: International Conference on Renewable Energy and Power Quality, ICREPQ'07, 2007, Sevilla. Proceedings of International Conference on Renewable Energy and Power Quality, 2007.

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; NORONHA, I. ; LAMBERT-TORRES, G. . Identification of wavefronts in partial discharge acoustic signals using discrete wavelet transform. In: 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008, Cambridge. Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, 2008.

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; NORONHA, I. ; LAMBERT-TORRES, G. ; SANTO JUNIOR, D. E. . Detecção de descargas parciais em transformadores de potência utilizando transformada wavelet. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008, Poços de Caldas. Anais da VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008.

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; NORONHA, I. ; LAMBERT-TORRES, G. . 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.

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; NORONHA, I. ; LAMBERT-TORRES, G. ; Haddad, J. ; Pereira, R. R. ; Ahn, S. U. . 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 CD-ROM, 2009.

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; NORONHA, I. ; LAMBERT-TORRES, G. . 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.

VELOSO, G. F. C. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; NORONHA, I. ; LAMBERT-TORRES, G. . 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.

NORONHA, I.; VELOSO, G. F. C.; SILVA, Luiz Eduardo Borges da; LAMBERT-TORRES, G. 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.

VELOSO, G. F. C. ; NORONHA, I. ; SILVA, Luiz Eduardo Borges da ; LAMBERT-TORRES, G. . 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.*