

**Felipe Nóbrega de Castro**

**Aplicação da Transformada *Wavelet* na Classificação do Estado Operacional de Câmaras de Disjuntores**

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:  
Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Julho de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- C355a Castro, Felipe Nóbrega de.  
Aplicação da transformada *wavelet* na classificação do estado operacional de câmaras de disjuntores / Felipe Nóbrega de Castro. – Campina Grande, 2012.  
58f. : il., color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.  
Orientador: Prof. D.Sc. Edson Guedes da Costa.  
Referências.
1. Disjuntores. 2. Medição da Resistência Dinâmica de Contato. 3. Resistência de Contato. 4. Transformada *Wavelet*. I. Título.

CDU 621.316.57 (043)

**APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA *WAVELET* NA CLASSIFICAÇÃO DO  
ESTADO OPERACIONAL DE CÂMARAS DE DISJUNTORES**

**FELIPE NÓBREGA DE CASTRO**

Dissertação Aprovada em 03.07.2012



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca



**BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca



**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
JULHO - 2012

Aos meus pais, irmãos e irmã.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de estar neste mundo e por todas as graças concedidas ao longo de minha caminhada terrena.

Aos meus pais e irmãos pelo apoio e motivação nos momentos difíceis da vida e principalmente pela educação a mim dada. Agradecimentos também pela compreensão da ausência em vários momentos de convívio familiar.

À Vanessa por estar ao meu lado, dando-me apoio nas horas de dificuldade, por compreender os momentos ausentes e pelos incentivos de todas as horas.

À Ronimack, com quem realizei alguns experimentos e ajudou a mim com ideias e material na elaboração desta dissertação. À Malone que ajudou com várias contribuições ao texto. E a todos que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração desta dissertação.

Aos amigos de várias conversas, de vários divertimentos, de apoio nas dificuldades e obstáculos da vida, de conselhos e de compreensão.

Aos professores que contribuíram em minha formação acadêmica, principalmente, ao professor Edson Guedes, que se dispôs a me orientar.

Aos professores da banca pelas significativas contribuições ao trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) e do Laboratório de Alta Tensão (LAT).

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

Aos engenheiros da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) Vladimir Cesarino de Souza e Tereza Cristina Leite Galindo.

## RESUMO

Um método de análise de curvas de Resistência Dinâmica de Contato (RDC) utilizando a transformada *wavelet* é proposto. O método consiste na aplicação da transformada *wavelet* à curva de RDC e cálculo da energia do coeficiente de detalhe. Foram usadas as *wavelets* ortogonais Haar, Daubechies 4, Daubechies 6, Daubechies 8, Coiflet 6, Coiflet 12 e Symlet 8. As análises foram feitas até o terceiro nível da decomposição. A classificação do nível de degradação das câmaras de extinção de disjuntores de alta tensão é realizada por meio da energia do coeficiente de detalhe associada à curva em cada nível. Todos os testes realizados para esta dissertação utilizaram curvas de RDC sintéticas (geradas computacionalmente). Inicialmente, duas curvas RDC foram usadas para gerar outras curvas. A primeira curva representava a RDC de um disjuntor em bom estado. A segunda representava a RDC de um disjuntor com contatos de arco em estado de degradação avançado. As curvas geradas apresentam estados de degradação intermediários entre a primeira e a segunda curva, totalizando nove curvas. Um conjunto composto por 809 curvas foi criado por meio da adição de ruído aleatório as nove curvas. O ruído adicionado possuía distribuição normal. Pesquisadores utilizam o valor da área abaixo da curva para classificar o grau de degradação da câmara de extinção de arco. Um processo de classificação foi feito utilizando transformada *wavelet* neste trabalho. Os resultados obtidos com uso da transformada *wavelet* foram comparados àqueles utilizando como critério o valor da área abaixo da curva. Pela análise dos resultados obtidos, evidencia-se a *wavelet* Coiflet 12 como a mais adequada para a classificação do estado de degradação das câmaras de extinção de disjuntores de alta tensão. O terceiro nível da decomposição da *wavelet* apresentou melhores resultados.

**Palavras chaves:** Disjuntores, medição da resistência dinâmica de contato, resistência de contato, transformada *wavelet*.

## ABSTRACT

A method for analysis of Dynamic Contact Resistance (DCR) curves using the wavelet transform is proposed. The method consists in applying the wavelet transform to the DCR curve and detail coefficient energy calculation. Haar, Daubechies 4, Daubechies 6, Daubechies 8, Coiflet 6, Coiflet 12 and Symlet 8 orthogonal wavelets were used. The analyses were made until the third level of decomposition. The degradation level classification of the high voltage circuit breakers extinction chambers is carried out through the detail coefficient energy associated to the curve at each level. All tests for this dissertation used synthetic DCR curves (computationally generated). Initially, two DCR curves were used to generate other curves. The first curve represents the DCR of a circuit breaker in good condition. The second represented the DCR circuit breaker with arcing contact in an advanced deterioration state. The generated curves show intermediate degradation states between the first and second curves, totaling nine curves. A set composed of 809 curves were created by adding random noise to the nine curves. The added noise had a normal distribution. Researchers use the value of area under the curve for classifying the degradation degree of the arcing extinction chamber. A classification process was done using wavelet transform in this work. The results obtained using the wavelet transform have been compared with those using as criterion the value of area under the curve. Analyzing the results, the wavelet Coiflet 12 highlights as the most suitable for the classification of the extinction chambers degradation state of high voltage circuit breakers. The third level of wavelet decomposition showed better results.

**Keywords:** Circuit breaker, contact resistance, dynamic contact resistance measurement, wavelet transform.

**SUMÁRIO**

Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xi
Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Organização do Texto .....	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 Medição da Resistência Dinâmica de Conato – MRDC .....	6
2.2 Sistemas de Diagnóstico das Condições de Disjuntores .....	8
2.3 Uso da Transformada <i>Wavelet</i> no Diagnóstico de Disjuntores .....	10
2.4 Resumo do Capítulo .....	12
Capítulo 3 – Disjuntores de Potência .....	14
3.1 Técnicas de Interrupção .....	16
3.2 Medição da Resistência Dinâmica de Contato .....	20
2.3 Resumo do Capítulo .....	22
Capítulo 4 – Transformada <i>Wavelet</i> .....	23
4.1 Transformada <i>Wavelet</i> Discreta – TWD .....	25
4.2 TWD e Banco de Filtros .....	27
4.3 Forma Matricial Para Cálculo da TWD Ortogonal .....	29
4.4 Propriedades da Transformada <i>Wavelet</i> .....	32
4.4 Resumo do Capítulo .....	33
Capítulo 5 – Simulações e Análises .....	34
5.1 Geração do Banco de Dados .....	36
5.2 Método de Análise .....	39
5.3 Resultados Obtidos .....	41
5.4 Resumo do Capítulo .....	49
Capítulo 6 – Conclusões .....	50
Referências .....	52
Anexos .....	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de Bloco de um Medidor para Baixa Resistência Elétrica .....	7
Figura 3.1: Representação dos Contatos Principal e de Arco .....	15
Figura 3.2: Câmaras de Interrupção de Disjuntores a Óleo. (a) Sopros Transversal. (b) Sopros Axial .....	18
Figura 3.3: Curva de Resistência Dinâmica em Função da Distância entre os Contatos .....	22
Figura 4.1: Sequência para Cálculo da TWC. (a) Cálculo da TWC para a Primeira Seção do Sinal; (b) Deslocamento da <i>Wavelet</i> e Cálculo da TWC. (c) Escalonamento da <i>Wavelet</i> e Cálculo da TWC .....	25
Figura 4.2: Esquema de Banco de Filtros para Cálculo do Primeiro Nível da TWD .....	28
Figura 4.3: Esquema de Banco de Filtros para Cálculo do Segundo Nível da TWD .....	28
Figura 4.4: Esquema de Banco de Filtros para Reconstrução do Sinal a partir do Segundo Nível da TWD .....	29
Figura 5.1: Curva de Medição de Resistência Dinâmica para a Câmara de Interrupção com Anomalia .....	35
Figura 5.2: Curva de Medição de Resistência Dinâmica para a Câmara de Interrupção sem Anomalia .....	35
Figura 5.3: Foto dos Contatos da Câmara com Anomalia.....	36
Figura 5.4: Diagrama de Bloco do Esquema de Geração de Curvas de Estados Intermediários .....	37
Figura 5.5: Indicação dos Momentos de Separação dos Contatos .....	38
Figura 5.6. Curvas de Estados Intermediários .....	38
Figura 5.7. Diagrama de Bloco Esquemático da Adição do Ruído Aleatório às Curvas Intermediárias .....	39
Figura 5.8: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Haar .....	41
Figura 5.9: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Daubechies 4 ...	42
Figura 5.10: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Daubechies 6 .	42
Figura 5.11: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Daubechies 8 .	43
Figura 5.12: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Coiflet 6 .....	44
Figura 5.13: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Coiflet 12 .....	45
Figura 5.14: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a <i>Wavelet</i> Symlet 8 .....	45
Figura 5.15: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos Total de Classificação para cada Nível .....	48
Figura A.1: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Haar .....	56

Figura A.2: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Daubechies 4 .....	56
Figura A.3: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Daubechies 6 .....	56
Figura A.4: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Daubechies 8.....	56
Figura A.5: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Coiflet 6 .....	57
Figura A.6: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Coiflet 12 .....	57
Figura A.7: Função Escala e Função <i>Wavelet</i> da <i>Wavelet</i> Mãe Symlet 8 .....	57

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 2.1: Síntese da Revisão Bibliográfica .....	13
TABELA 2.2: Aplicação da Transformada <i>Wavelet</i> em Sistemas de Potência .....	13
TABELA 4.1: Exemplos de Valores dos Coeficientes para as <i>Wavelets</i> Haar, Daubechies 4, Daubechies 6 e Coiflet 6 .....	32
TABELA 5.1: Intervalo de Confiança para cada <i>Wavelet</i> em cada Nível .....	46
TABELA 5.2: Total de Acertos para cada Nível .....	47

## INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A confiabilidade dos sistemas elétricos depende em grande parte da operação correta dos equipamentos de chaveamento, tanto por questões de proteção quanto por questões de operação e estabilidade do sistema.

Operações incorretas de chaveamento podem ocasionar desde desligamentos impróprios e/ou desnecessários, acarretando em perda de faturamento e/ou em multas pesadíssimas, até danos aos equipamentos e às partes do sistema protegidas por estes elementos de chaveamento.

Os disjuntores de potência são equipamentos de altíssima importância para o funcionamento correto dos sistemas de potência e para a prevenção de possíveis danos causados por faltas. O conhecimento das suas condições operacionais é fundamental para a determinação da necessidade de intervenção, por parte da equipe de manutenção, no equipamento e/ou sua retirada do sistema.

As exigências operacionais de disjuntores implicam em severos esforços em seus componentes, tanto elétricos quanto mecânicos, e degradação dos mesmos. A degradação da câmara de interrupção ou dos elementos de condução acarreta diminuição dos valores nominais do equipamento e pode inclusive levar à explosão do mesmo no caso de sobreaquecimento excessivo.

A verificação das condições de um disjuntor é realizada submetendo-o a diferentes tipos de ensaios cujas instruções são estabelecidas em padronizações nacionais e internacionais com propósito de cobrir todas as especificações técnicas destes equipamentos.

Quando detectada alguma característica nominal alterada, para restabelecer as condições normais de operação dos disjuntores, procedimentos de manutenção devem ser seguidos. Estes procedimentos, comumente, são padronizados pelas empresas. A manutenção dos equipamentos é, frequentemente, planejada e programada com certa periodicidade, podendo sofrer alterações quando da ocorrência de falhas.

CARVALHO *et al.* (1995) afirmaram que a periodicidade da manutenção é função das condições de operação do disjuntor (tipo do circuito a ser chaveado, frequência com que são operados e intensidade das correntes interrompidas), condições climáticas, histórico do equipamento, recomendações dos fabricantes e número de interrupções de curto circuito. Outros fatores que influenciam na periodicidade são: a experiência dos usuários, procedimentos e periodicidades já estabelecidos para outros equipamentos similares e intercâmbio das informações entre usuários.

No caso de avaliação das características de condução, o principal parâmetro de avaliação da condição de operacionalidade da câmara de interrupção é a resistência dos contatos principais, que pode ser medida utilizando um medidor de micro-ohms.

Contudo, a resistência medida quando o disjuntor permanece fechado fornece pouca indicação da condição dos contatos de arco. Assim, para avaliar a condição dos contatos de arco, uma inspeção interna deve ser feita, mas os procedimentos de manutenção exigem muito tempo, alto custo e envolvimento e deslocamento de equipe especializada.

Com a evolução da manutenção, os requisitos têm sido alterados, bem como a periodicidade. Nesta linha, vários métodos de análise e de monitoramento continuam a ser propostos. Um método de análise das condições dos contatos, tanto principal quanto de arco, de um disjuntor é a Medição de Resistência Dinâmica de Contato (MRDC).

O uso da MRDC possibilita uma melhor avaliação das condições da câmara e uma maior previsibilidade do tempo ótimo para abertura e manutenção da câmara. Apesar das vantagens da MRDC, as curvas obtidas pela MRDC são, muitas vezes, de difícil interpretação e, em alguns casos, pode levar a conclusões equivocadas. Por isto, diversos aprimoramentos continuam a ser propostos para executar esta interpretação. A MRDC em baixa velocidade se destaca entre as contribuições já propostas.

Na medição em baixa velocidade, a interpretação das curvas torna-se uma tarefa menos árdua e aumenta a probabilidade de diagnóstico correto. Utilizando-se as curvas de

Resistência Dinâmica de Contato (RDC) obtidas na medição em baixa velocidade, neste trabalho, é proposto um método de interpretação das curvas que se fundamenta na aplicação da transformada *wavelet* às curvas.

Busca-se, então, por meio do uso do método proposto, facilitar a interpretação das curvas de RDC e determinar de forma mais confiável a necessidade de inspeção e manutenção da câmara de disjuntores de potência.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho de dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de um método de análise das curvas de resistência dinâmica de contato de disjuntores de alta tensão. O método é baseado no uso da transformada *wavelet* para determinação das condições operacionais de câmaras de extinção de disjuntores sem a necessidade da sua abertura.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Criar um banco de dados com curvas de RDC para realização de análises;
- Analisar as curvas geradas a partir da aplicação da Transformada Wavelet (TW) com algumas famílias de *wavelets*;
- Investigar a família *wavelet* mais adequada à análise das curvas de RDC;
- Investigar o nível da decomposição *wavelet* é mais eficiente;
- Avaliar a viabilidade técnicas do uso de TW na análise das curvas de RDC.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Após o primeiro capítulo, introdutório, nos próximos cinco capítulos são apresentados as ideias, conceitos, análises e os resultados.

A revisão bibliográfica das principais publicações sobre os temas abordados no texto é apresentada no Capítulo 2, fazendo uma caracterização do estado da arte do monitoramento de disjuntores e do uso da Transformada *Wavelet*.

Uma introdução dos principais aspectos de disjuntores é apresentada no Capítulo 3. São abordados tópicos sobre os meios de extinção do arco elétrico, os ensaios realizados para avaliação das condições operacionais da câmara de interrupção e as vantagens do uso da MRDC sobre o ensaio convencional de verificação da resistência de contato.

A base teórica da Transformada *Wavelet* é apresentada no Capítulo 4, as propriedades que justificam sua aplicação à análise proposta e as forma de implementação computacional.

Simulações, análises e os resultados são apresentados no Capítulo 5, no qual são discutidos detalhadamente os resultados.

As considerações finais com as conclusões e as propostas de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os resultados das pesquisas mais relevantes sobre diagnóstico de disjuntores e avaliação das suas condições operacionais utilizando medição da resistência dinâmica de contato (MRDC). Também serão relatadas pesquisas sobre o uso da transformada *wavelet* (TW) e de sistemas de monitoramento na avaliação de disjuntores de potência.

Diagnósticos e monitoramento podem ser usados para otimizar práticas de manutenção, substituição e permanência de disjuntores instalados no sistema (SWEETSER *et al.*, 2002). Diversas técnicas de diagnóstico e monitoramento foram propostas ao longo do tempo para avaliação dos equipamentos dos sistemas de potência. Especificamente para disjuntores, o guia mais atual, do *IEEE*, para seleção do sistema de monitoramento mais adequado é o “*IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers*”, publicado em 2001.

O diagnóstico das condições operacionais de disjuntores, sem a necessidade da sua abertura, pode ser feito com a medição da resistência dinâmica de contato. As primeiras descrições e comentários sobre a MRDC datam do final da década de 1980 e alguns aprimoramentos da técnica foram propostos para facilitação das interpretações, bem como diversos sistemas e equipamentos para realização das medições.

Na análise dos resultados das MRDC, podem ser empregadas ferramentas matemáticas, entre elas a TW. A TW tem maiores aplicações na área de processamento de sinais de áudio e processamento de imagens com muitas aplicações de compactação e filtragem de ruído. A habilidade da TW de lidar com sinais não estacionários impulsionou a disseminação da TW em diversas outras áreas. Em seu trabalho, BRITO (1996) afirma que a primeira proposta de utilização das *wavelets* em sistemas de energia elétrica foi feita por Paulo F. Ribeiro, em 1994, com o trabalho intitulado “*Wavelet Transform: An Advanced Tool For Analyzing Non-Stationary Harmonic Distortions in Power Systems*”. Desde então,

diversos trabalhos têm sido propostos na detecção e classificação de faltas, detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia elétrica e monitoramento de equipamentos.

## 2.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO - MRDC

LANDRY *et al.* (2006) propuseram um novo método para medição da resistência dinâmica de contato. O método é um aprimoramento da clássica MRDC pela diminuição da velocidade de abertura dos contatos. Como explicado pelos autores ao longo do trabalho, a MRDC na velocidade nominal de abertura resulta em curvas não reproduzíveis para diferentes medições, além disso, as curvas obtidas possuem muitos picos que dificultam a interpretação.

Alguns estudos de caso foram feitos para a nova metodologia com quatro conjuntos de contatos em diferentes níveis de desgaste. Os autores utilizaram um sistema de aquisição de dados juntamente com sensores e uma rotina computacional para gravação dos sinais extraídos, cálculo da resistência dinâmica e interpretação das curvas. Eles também desenvolveram um algoritmo de avaliação do desgaste dos contatos que se baseia no cálculo da área cumulativa sob a curva de MRDC (integral da curva) e os testes evidenciaram que à medida que os contatos estão mais desgastados, maior é o valor da área abaixo da curva de RDC.

LANDRY *et al.* (2008) propuseram vários procedimentos a serem seguidos durante a MRDC de acordo com as condições encontradas e disponíveis. Os procedimentos são determinados com base em três importantes parâmetros: a velocidade de abertura dos contatos, o valor da corrente injetada e a presença de fluoretos metálicos depositados nos contatos. A presença dos fluoretos metálicos pode ocorrer em disjuntores a SF<sub>6</sub>.

Os resultados dos testes conduziram à formulação dos três seguintes procedimentos: (1) para disjuntores que podem ser afetados pelos fluoretos metálicos, o valor real da resistência de contato principal deverá ser medido após o contato ser aquecido pela passagem de uma corrente de 2800 A por pelo menos 15 minutos. Para medir o valor real da resistência do contato de arco, várias MRDC devem ser executadas durante operações de abertura. Estes procedimentos são necessários para evaporação dos fluoretos metálicos depositados na superfície dos contatos; (2) para disjuntores não afetados pelos fluoretos metálicos e para os quais operação em baixa velocidade de contato pode ser facilmente

executada, a MRDC deve ser executada em baixa velocidade, como explicado por LANDRY *et al.* (2006); e (3) para disjuntores não afetados pelos fluoretos metálicos e para os quais operação em baixa velocidade de contato não pode ser executada, a MRDC deve ser executada na velocidade nominal com uma corrente injetada de pelo menos 700 A.

STANISIC & NEIMANIS (2010) propuseram um sistema eletrônico leve e portátil para medição da resistência de contato estática ou dinâmica em substituição aos convencionais equipamentos com fontes de alta corrente grandes e pesadas. Usualmente, micro-ohmímetros são baseados no uso de fontes de corrente CC, baterias ou conversores CC/CC são usados como fontes de alta corrente, capazes de gerar mais de 100 A.

Os autores destacam que o uso de baterias torna o medidor bastante pesado e a desvantagem dos conversores CC/CC é o alto nível de ruído de chaveamento, que necessita ser filtrado, aumentando a complexidade do sistema de medição. A solução proposta pelos autores é o uso de um capacitor de valor muito grande, na faixa de algumas centenas de Faradays, como fonte de corrente. O alto valor da capacitância dominará a constante de tempo do circuito e a inclinação da corrente descarregada durante a medição é de 10 – 100 A/s, dependendo da resistência série equivalente. Assim, o medidor de baixa resistência proposto é baseado no uso de um capacitor de valor alto e com resistência interna ultrabaixa, permitindo uma alta corrente CC (250 A) ser gerada. Além disso, uma chave de corrente, um carregador para controle adicional do capacitor e um circuito de medição são necessários. Na Figura 2.1, é mostrado o diagrama de bloco do medidor.

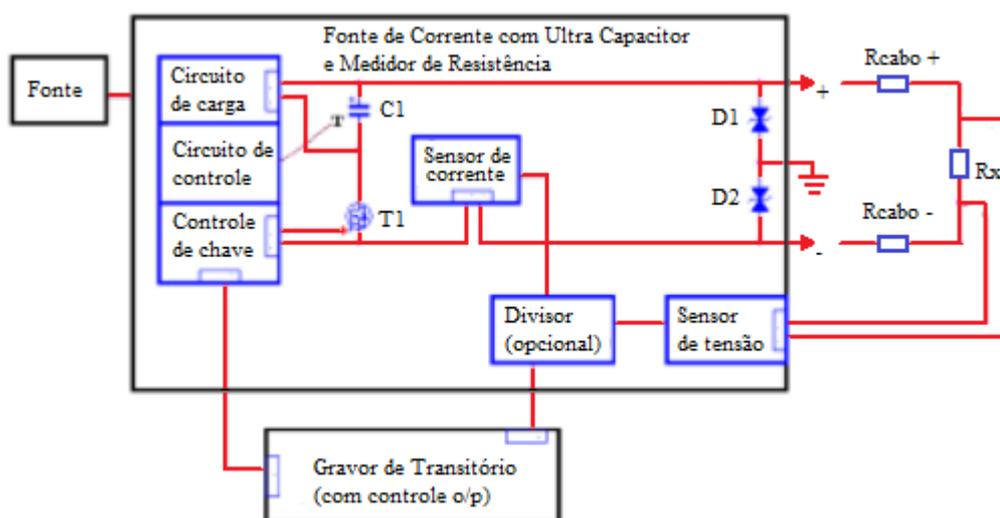


Figura 2.1: Diagrama de Bloco de um Medidor para Baixa Resistência Elétrica. Adaptado (STANISIC & NEIMANIS, 2010).

## 2.2 SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO DAS CONDIÇÕES DE DISJUNTORES

SWEETSER *et al.* (2002) apresentaram uma síntese do “*IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers*” publicado no ano 2001. Nesta síntese, os autores destacam que o disjuntor deve ser visto como um sistema mais complexo devido aos seus vários componentes. Estes são classificados como componentes em tensão de serviço, circuitos elétricos auxiliares e de controles e mecanismo de operação. Os autores relatam a utilização da técnica Modo de Falha e Análises de Efeitos (do inglês, *Failure Mode Effect Analysis – FMEA*) para análise dos componentes e subsistemas do disjuntor e determinação das opções de monitoramento disponíveis.

A FMEA estabelece a relação entre como a falha se manifesta, a(s) causa(s) da falha e os efeitos resultantes. Assim, o monitoramento apropriado pode ser selecionado considerando modos de falha e seus efeitos no disjuntor e no sistema de potência, o grau de risco ou crítico associado com a falha e a economia associada com cada tipo de falha. Com base no guia proposto pelo *IEEE*, os autores apresentam uma metodologia para determinação da seleção de monitoramento. A base para esta metodologia é comparar falhas e os seus riscos ao valor de custo-benefício introduzido pela aplicação do monitoramento. Os autores apresentam dois exemplos práticos do uso do guia para ilustrar sua funcionalidade, são usados um disjuntor a SF<sub>6</sub> tipo *puffer* e um disjuntor a grande volume de óleo de tanque morto e mostrados os respectivos componentes passíveis de monitoramento viável. Os exemplos práticos também evidenciam as diferenças de monitoramento para cada tipo construtivo de disjuntor.

GALATI *et al.* (2009) apresentaram os estudos de viabilidade da implantação de sistemas de monitoramento contínuo de disjuntores de média tensão realizados pela *Enel Distribuzione*, uma das maiores distribuidoras de energia elétrica da Itália. As vantagens do monitoramento contínuo dos disjuntores são a otimização de intervenções, a redução de interrupções de fornecimento e o conhecimento maior de seu comportamento.

Com o intuito de aplicar o monitoramento contínuo, os autores utilizaram a ferramenta FMEA e determinaram o tipo de sensores para a configuração teste e o tipo de degradação do sistema a ser simulado. Assim, os parâmetros a serem gravados em todas as operações de chaveamento e o tipo de sensores apropriado foram selecionados com base nos

componentes do sistema, nos quais os modos de falha tipicamente se originam, e na simplicidade e baixo custo do sistema de medição.

Com o objetivo de desenvolver um sistema de monitoramento para aplicação industrial, o requisito foi então a utilização de uma técnica não invasiva que possa ser aplicável (alto custo/benefício) apesar de perda de informação, se comparada com testes mais sofisticados. Assim, o sistema de monitoramento necessita como entrada os parâmetros medidos: (1) amplitude da corrente da bobina absorvida no primeiro pico (fácil de determinar por meio de um sensor de corrente efeito hall e tratamento de dados simples nos dispositivos eletrônicos de proteção); e (2) tempos de operação a partir dos contatos auxiliares.

POIRIER *et al.* (2010) apresentaram um método de diagnóstico em tempo real para prevenção de falhas críticas em disjuntores. O método baseia-se na captação de emissões eletromagnéticas transitórias (EET) geradas durante as operações do disjuntor. O sistema de diagnóstico é composto por quatro antenas UHF unidirecionais idênticas. As EET são analisadas por um método preciso de detecção de *steep-front* e uma técnica de localização de Diferença de Tempo de Chegada (do inglês *Time Difference of Arrival* – TDOA), para determinação da fonte da emissão. Os autores mostram que a partir das EET é possível detectar a presença de defeitos de pré-acendimento, reacendimento e reignição e determinar com precisão em qual câmara ocorreu a falha.

NIKOLIC *et al.* (2011) propuseram a predição do material do bocal injetor e dos contatos de um disjuntor de alta tensão que sofreu ablação a partir do valor da corrente manobrada por meio de simulações de Dinâmica de Fluido Computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics* – CFD). Como explicado pelos autores, a ablação do material do bocal injetor aumenta seu diâmetro, diminuindo a capacidade de geração de pressão do disjuntor tipo *puffer* e, conseqüentemente, menor capacidade de interrupção do disjuntor.

Os autores relatam que uma série de experimentos foi realizada e os resultados experimentais foram comparados com os resultados das simulações apresentando uma boa concordância. Eles descrevem que é possível, baseado nos resultados das simulações CFD, realizar um prognóstico do comportamento de um disjuntor. As simulações CFD são realizadas utilizando um modelo de desgaste derivado das características da corrente e do instante de separação dos contatos obtidos nas interrupções anteriores. Desde modo, os autores afirmam que as simulações CFD podem prever o desgaste da câmara de interrupção, sendo possível determinar se é necessária a manutenção interna da câmara. Um prognóstico

confiável do tempo de vida, segundo os autores, pode levar a intervalos de manutenção estendidos, os quais são objetivados por muitos operadores de sistemas elétricos.

ZANG & GOCKENBACH (2011) propuseram, a partir de dados operacionais de uma população de disjuntores a SF<sub>6</sub> de 550 kV e dos dados de falhas ocorridas, estimar o tempo de vida restante a partir da probabilidade de falha. Os autores explicam no trabalho que a distribuição de Weibull é um modelo adequado para avaliação estatística das condições operacionais de disjuntores. Os seus estudos se basearam em dados de falhas obtidos de disjuntores a SF<sub>6</sub> de 550 kV. A distribuição de probabilidade é simulada para estimar a taxa de falha, o tempo de vida restante e o número de falhas ao longo dos anos. Os autores estudaram os defeitos de vazamento na chave de controle de pressão, falha da bomba do compressor de ar, vazamento de SF<sub>6</sub> e sobreaquecimento do terminal primário do disjuntor e estimaram o tempo de vida restante dos disjuntores para cada uma destas falhas. De acordo com ele, métodos estatísticos podem ser aplicados como suporte de importantes decisões de manutenção, usando dados obtidos a partir de levantamento de falha.

### **2.3 USO DA TRANSFORMADA *WAVELET* NO DIAGNÓSTICO DE DISJUNTORES**

A análise de sinais de vibração adquiridos durante as operações do disjuntor utilizando a TW contínua foi realizada por FAZIO *et al.* (2003). No citado trabalho, os dados coletados foram analisados e comparados com um conjunto de anomalias (defeitos) previamente estabelecido, apresentando preciso diagnóstico dos equipamentos monitorados e informações sobre o tipo de defeito relacionado.

A captação dos sinais de vibração foi realizada utilizando sensores localizados em vários pontos da estrutura do disjuntor. Por meio de procedimentos estatísticos, o método de diagnóstico usado estabelece a “distância” mínima do caso examinado a um caso referência contido em um conjunto predefinido.

O processo de treinamento, e criação do conjunto de dados de defeitos, foi realizado utilizando disjuntores novos e disjuntores já instalados. Nos disjuntores novos, os sinais de vibração são armazenados e relacionados aos valores de corrente medidos durante a execução das operações. Nos disjuntores em uso, devem ser armazenadas as características

das operações, tipo, número e data da operação e características da carga. Nesse trabalho, os autores relatam que foram usadas as famílias *wavelets Mexican hat*, *Meyr* e *Morlet* para análise de sinais armazenados a serem processados com relação a disjuntores de alta tensão novos e defeituosos, do mesmo tipo. Examinando os resultados, os autores perceberam que as famílias *Mexican hat* e *Morlet* tiveram desempenho melhor que a *Meyr*.

CHARBKEAW *et al.* (2008) realizaram medições dos sinais de vibração de um disjuntor a SF<sub>6</sub> de 100 kV de única pressão e com mecanismo de operação hidráulico. Eles tiveram o auxílio de acelerômetros fixados na estrutura de fechamento do disjuntor, para capturar os sinais, durante operações de chaveamento sem carga. O objetivo principal da análise dos sinais de vibração é a detecção de defeitos mecânicos. Os autores mostraram que a análise no domínio do tempo dos sinais de vibração não é elucidativa. A análise dos sinais de vibração foi feita pelo uso da TW. A *wavelet* escolhida foi a *Complex Morlet* e foram analisados os gráficos escala  $x$  tempo para os seguintes defeitos introduzidos: defeito na bucha, defeito no contato, defeito na haste e disjuntor sem haste. A análise foi feita pela comparação dos gráficos escala  $x$  tempo de defeitos em relação ao gráfico do sinal de vibração de referência, para um disjuntor sem defeitos. É possível observar a diferença entre os vários gráficos de defeitos e de referência, e a utilidade da TW na distinção dos sinais.

KAN *et al.* (2011) propuseram um algoritmo em tempo real e não invasivo de detecção de reacendimentos em disjuntores utilizando a TW a partir de dados simulados no ATP (*Alternative Transients Program*) para chaveamento monofásico de banco de capacitor. Um modelo de um disjuntor é utilizado no ATP para gerar assinaturas de formas de onda de reacendimento com características selecionadas que são detectadas com TW.

Após uma forma de onda ser simulada e gravada, executa-se a TW discreta e é verificado se algum dos termos internos do primeiro coeficiente de detalhe (os termos das extremidades são excluídos da análise) excede um determinado valor limite, simbolizado por  $\gamma$ . Se algum dos termos exceder o valor de  $\gamma$ , é calculada a energia dos próximos 160 termos, a partir do termo que excedeu  $\gamma$ , para o primeiro coeficiente de detalhe. Se a energia calculada exceder o valor limite, definido como  $E_{th}$ , aconteceu um reacendimento, caso contrário, o termo que excedeu  $\gamma$  não indica um reacendimento.

Inicialmente, foram feitos testes para a determinação da *wavelet* que melhor se adéque a detecção de reacendimento para os dados simulados, as famílias testadas foram Daubechies, Symlet, Coiflet, Biorthogonal e Reverse Biorthogonal. A *wavelet* Daubechies 5

foi escolhida por apresentar o melhor desempenho entre todas as *wavelets* testadas. Seleccionada a *wavelet*, os valores de  $\gamma$  e  $E_{th}$  foram escolhidos, respectivamente, iguais a 0,15 e 10 após alguns testes. Com estes valores limites e com a *wavelet* db5, a probabilidade de diagnósticos corretos foi de 92%.

SUN *et al.* (2011) propuseram um método de diagnóstico de falhas mecânicas a partir da decomposição do sinal de vibração de disjuntores de alta tensão usando a Transformada *Wavelet Packet* (TWP) até o seu terceiro nível. Para cada nó da decomposição, os sinais são reconstruídos e calcula-se a entropia característica da envoltória de cada sinal reconstruído. Com os valores da entropia característica em cada nó, é construído o vetor entropia  $T = [H_0, H_1, \dots, H_{(2^k)-1}]$ , com  $k$  igual ao nível da decomposição. O critério de determinação de falha mecânica é a distância Euclidiana entre o vetor entropia de um estado sob análise e o vetor entropia de um estado normal de funcionamento.

Os sinais de vibração foram capturados utilizando acelerômetros fixados na base de cada fase do disjuntor trifásico. Nos estudos de caso realizados pelos autores, foram introduzidos e detectados o defeito por atraso, devido a pouca lubrificação, e o defeito de perda do parafuso de base, na fase A. Os testes relatados no artigo evidenciam que o uso da entropia característica da TWP é um parâmetro de diagnóstico efetivo para detecção de falhas mecânicas.

## 2.4 RESUMO DO CAPÍTULO

As referências que tratam do monitoramento ou ensaio de disjuntores são listadas na Tabela 2.1. As referências estão agrupadas de acordo com a técnica empregada nos trabalhos.

Algumas aplicações da transformada *wavelet* em sistemas de potência estão indicadas na Tabela 2.2. Como não são de interesse direto para a aplicação nesta dissertação, as pesquisas da Tabela 2.2 não foram detalhadas no texto, mas serviram de base teórica para os estudos.

TABELA 2.1: Síntese da Revisão Bibliográfica

Referência	Técnica Empregada	Sinal Analisado
FAZIO <i>et al.</i> (2003) CHARBKEAW <i>et al.</i> (2008) SUN <i>et al.</i> (2011) KAN <i>et al.</i> (2011)	TW	Vibração Acústica Vibração Acústica Vibração Acústica TRT
LANDRY <i>et al.</i> (2006) LANDRY <i>et al.</i> (2008) STANISIC & NEIMANIS (2010)	MRDC	RDC RDC RDC
GALATI <i>et al.</i> (2009)	MBC	-
POIRIER <i>et al.</i> (2010)	TDOA	EET
NIKOLIC <i>et al.</i> (2011)	Simulação CFD	-
ZANG & GOCKENBACH (2011)	Estimativa estatística da vida útil	-

Legenda:

CFD: Dinâmica de Fluido Computacional

EET: Emissões Eletromagnéticas Transitórias

MBC: Manutenção Baseada na Condição

MRDC: Medição da Resistência Dinâmica de Contato

RDC: Resistência Dinâmica de Contato

TDOA: Diferença de Tempo de Chegada

TRT: Tensão de Restabelecimento Transitória

TW: Transformada *Wavelet*

TABELA 2.2: Aplicação da Transformada *Wavelet* em Sistemas de Potência

Referência	Área de Aplicação
PARSONS <i>et al.</i> (1999)	Detecção de Afundamento
BRITO (2001)	Análise de Transitórios
COSTA (2006) SILVA (2005)	Detecção e Classificação de Faltas em Linha de Transmissão
SILVA (2009)	Proteção de Linha de Transmissão
COSTA (2010)	Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios

### DISJUNTORES DE POTÊNCIA

A principal função dos disjuntores é a interrupção de correntes de falta tão rapidamente quanto possível, de forma a limitar a um mínimo os possíveis danos causados aos equipamentos pelos curtos-circuitos (D'AJUZ *et al.*, 1985). Os disjuntores são também utilizados com funções de manobra do sistema como chaveamento de banco de capacitores, de linhas em vazio, de transformadores e de reatores.

Em estado normal de funcionamento do sistema, os disjuntores devem conduzir a corrente de carga sem se aquecerem demasiadamente, tal exigência é cumprida pelo projeto adequado dos contatos principais do disjuntor. Os contatos principais dos disjuntores são construídos de material de baixa resistividade. Segundo BHEL (2006), os mais comuns são CuBi, CuCr ou CuAg, sendo CuCr o que fornece a solução mais ideal para todos os interruptores entre 8 e 64 kA.

A função de proteção do sistema exercida pelos disjuntores implica em altos esforços mecânicos e elétricos durante suas operações de abertura e fechamento. A separação física dos contatos principais, durante uma operação de abertura para interrupção de corrente, faz surgir um arco no espaço entre os contatos. Os contatos responsáveis pela condução de corrente durante o arco são os contatos de arco que são feitos de materiais resistentes ao arco. De acordo com BHEL (2006), os materiais usados na confecção do contato de arco são tungstênio ou molibdênio, que têm condutividades muito menores que a dos materiais usados no contato principal. Na Figura 3.1, estão representados os contatos principais e de arco de um disjuntor de alta tensão a sopro de ar.

Quando dois contatos condutores de corrente se abrem, um arco surge no espaço entre os contatos e previne uma interrupção abrupta da corrente. Esse arco é útil pelo fato de fornecer um caminho de baixa resistência para a corrente após a separação dos contatos, com isso, prevenindo um corte do pico de corrente e uma sobretensão de manobra anormal,

associada no sistema. No caso CA, o arco é momentaneamente extinto quando a corrente zera. Para fazer a interrupção completa e bem sucedida, a reignição do arco entre os contatos deve ser prevenida depois de a corrente zerar (BHEL, 2006).



Figura 3.1: Representação dos Contatos Principal e de Arco. Adaptado (LANDRY *et al.*, 2006).

A operação de um disjuntor se resume, em última análise, à extinção de um arco elétrico em determinadas condições estabelecidas pelo tipo de manobra que se está perfazendo e também pelas características da câmara de interrupção do equipamento (CARVALHO *et al.*, 1995).

O processo de extinção do arco é um tanto quanto complexo. Basicamente, a extinção acontecerá se o meio extintor entre os contatos suportar os esforços elétricos e térmicos aplicados a ele, após a corrente zerar em sistemas CA. Durante a existência do arco, o meio extintor torna-se condutor devido à ionização provocada pelo arco, então, para extinguir o arco, com consequente interrupção da corrente, é necessário restabelecer as propriedades isolantes do meio. Quando a corrente passa por zero, a energia do arco diminui e caso o meio extintor seja desionizado e os contatos estejam suficientemente separados, o arco será extinto. Caso não haja a desionização completa do meio, poderá ocorrer a reignição térmica do arco. Após a interrupção térmica, uma tensão aparece entre os contatos, a chamada tensão de restabelecimento transitória (TRT). Caso a TRT alcance pico maior que a suportabilidade elétrica do meio para um determinado espaçamento, haverá a ruptura elétrica e o arco será novamente acendido.

### 3.1 TÉCNICAS DE INTERRUPÇÃO

Com o passar do tempo e aumento das redes de energia elétrica, e conseqüente aumento do consumo de energia, equipamentos mais potentes passaram a ser necessários. O crescimento dos requisitos dos disjuntores aliado aos melhores conhecimentos a respeito da extinção do arco levou ao desenvolvimento de novas técnicas de interrupção.

Historicamente, os primeiros disjuntores a serem usados foram os de interrupção ao ar livre (CARVALHO *et al.*,1995). Em ordem cronológica, as técnicas de interrupção são as seguintes: ar livre, óleo, ar comprimido, SF<sub>6</sub> e vácuo. A seguir, explica-se resumidamente o modo de operação de cada uma das técnicas.

#### DISJUNTORES A AR

Em disjuntores a ar, os contatos operam no ar à pressão atmosférica. Em geral, suas aplicações se restringem à baixa tensão ou instalações onde risco de incêndio ou contaminação por óleo é muito alto. O desenvolvimento dos disjuntores a óleo levou a uma substituição quase completa da técnica de interrupção a ar para aplicações em média tensão em vários países (BHEL, 2006).

Os princípios da interrupção do arco seguidos em um disjuntor a ar são particularmente diferentes daqueles de qualquer outro tipo de disjuntor. Enquanto o objetivo de todos os tipos de disjuntores é o mesmo, isto é, prevenir a reignição do arco, após o zero da corrente, criando uma situação na qual o espaçamento entre os contatos irá suportar a tensão de restabelecimento do sistema. O disjuntor a ar faz isto criando uma tensão de arco acima da tensão fornecida de três maneiras, como explicado por BHEL (2006): intensificando o esfriamento do plasma do arco, de modo que a tensão de manutenção do arco seja muito alta; alongando o caminho de arco para aumentar a tensão de manutenção do arco; e dividindo-se o arco em vários arcos em série.

Uma característica importante do disjuntor a ar é ser a única técnica que independe da presença de um zero da corrente para interrupção do arco. Se a tensão do arco pode ser feita excedendo a tensão da fonte, o arco será extinto, independente se a corrente é CA ou CC, o que faz ele adequado para o controle e a proteção de sistemas de corrente contínua (BHEL, 2006).

## DISJUNTORES A ÓLEO

Nos disjuntores a óleo, os contatos encontram-se emersos em óleo mineral isolante. Há dois projetos básicos de disjuntores a óleo, o disjuntor a grande volume de óleo (GVO) e o disjuntor a pequeno volume de óleo (PVO). Nos disjuntores GVO, o óleo é usado tanto como meio isolante entre as partes energizadas e o tanque metálico aterrado e também como meio extintor. Nos disjuntores PVO, as partes energizadas são isoladas com a ajuda de colunas de isoladores de porcelana e o óleo é utilizado apenas como meio extintor dentro da câmara de interrupção.

A extinção do arco se dá através da geração de gases, principalmente hidrogênio, em virtude da decomposição das moléculas de óleo devido às altas temperaturas desenvolvidas na região do arco. O aumento da pressão interna nas câmaras de interrupção cria um fluxo de óleo que irá desionizar o dielétrico, resfriar e alongar o arco. São utilizados dois tipos de câmaras de extinção: câmaras de sopro transversal e câmaras de sopro axial, como mostrado na Figura 3.2 (CARVALHO *et al.*, 1995). A quantidade de gás liberada é dependente da magnitude da corrente e da duração do arco (D'AJUZ *et al.*, 1975). Quanto maior a corrente a ser interrompida, maior é a pressão exercida sobre o arco devido à maior quantidade de gás liberada, mantendo a capacidade de extinção do equipamento.

Os disjuntores GVO são limitados à classe de 330 kV e as limitações são principalmente devido ao uso de uma grande quantidade de óleo, à velocidade de separação dos contatos muito alta e ao uso de muita energia mecânica. O projeto de disjuntores PVO com tecnologia *multi-break* está disponível nas tensões de 1 a 765 kV (BHEL, 2006).

## DISJUNTORES A AR COMPRIMIDO

Nos disjuntores a ar comprimido, a pressão do ar na câmara de extinção está entre 25 e 35 bar. CARVALHO *et al.* (1995) afirmaram que eles também utilizam o ar comprimido para isolamento e acionamento mecânico dos contatos. A aplicação de disjuntores a ar comprimido em tensões de 245 kV e de 400 a 750 kV se tornou necessária quando a adoção de disjuntores com característica de abertura em alta velocidade era essencial. Projetos com operações de dois ciclos já foram alcançados, a operação mecânica é de 12 ms e o tempo máximo de arco em torno de 8 ms (BHEL, 2006).

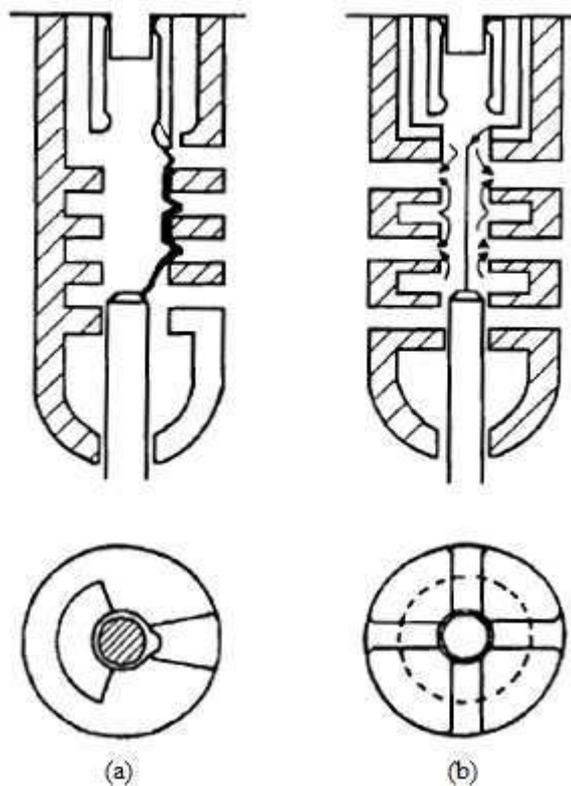


Figura 3.2: Câmaras de Interrupção de Disjuntores a Óleo. (a) Sopros Transversal. (b) Sopros Axial. Adaptado: (CARVALHO *et al.*, 1995).

A extinção do arco é obtida a partir da admissão, nas câmaras, de ar comprimido (armazenado num reservatório pressurizado entre 150 e 200 bar) que, soprando sobre a região entre os contatos, determina o resfriamento do arco e sua compressão. A reignição do arco, em seguida à ocorrência de um zero de corrente, é prevenida pela exaustão dos produtos ionizados do arco da região entre os contatos. A exaustão é decorrente da ação do sopro de ar comprimido. A intensidade e a rapidez do sopro de ar garantem o sucesso do disjuntor (D'AJUZ *et al.*, 1975).

Há dois tipos de câmaras de interrupção: as câmaras de sopro axial numa única direção e as de sopro axial em duas direções. Nos disjuntores de sopro numa única direção, o fluxo de ar comprimido para a atmosfera se dá através do contato móvel. Já nos de sopro em duas direções, uma válvula de sopro principal e uma auxiliar são abertas para a atmosfera, dando origem a um fluxo de ar através dos contatos móvel e fixo (CARVALHO *et al.*, 1995).

### DISJUNTORES A SF<sub>6</sub>

O SF<sub>6</sub>, à pressão atmosférica, apresenta uma rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que a do ar. No início, ele foi utilizado para isolamento em transformadores. A sua rigidez dielétrica aumenta

com o aumento da pressão. Segundo CARVALHO *et al.* (1995), comparado com o ar, possui uma eficiência para suprimir arcos cerca de 10 vezes maior e o tempo de extinção do arco é 100 vezes menor sob as mesmas condições. Os disjuntores a SF<sub>6</sub> possuem dois projetos: os disjuntores de dupla pressão e os de única pressão ou *puffer type*. BHEL (2006) relata que os disjuntores a SF<sub>6</sub> estão disponíveis para toda faixa de média tensão e para alta tensão acima de 800 kV.

Os disjuntores de única pressão substituíram os de dupla pressão. O princípio de funcionamento do disjuntor de dupla pressão é baseado no do disjuntor a ar comprimido. O SF<sub>6</sub> é armazenado num recipiente de alta pressão (aproximadamente 16 bar) e liberado sobre a região entre os contatos. A principal diferença com relação ao disjuntor a ar comprimido consiste na não liberação do SF<sub>6</sub> para a atmosfera e sim para um tanque de baixa pressão (em torno de 3 bar). Assim, o gás a alta pressão é utilizado para interrupção do arco e o a baixa pressão, para manutenção do isolamento entre as partes energizadas e a terra. Após a interrupção, o gás descarregado no tanque de baixa pressão é bombeado para o reservatório de alta pressão através de filtros de alumina ativada para remoção dos produtos da decomposição do SF<sub>6</sub> (D'AJUZ *et al.*, 1975).

Segundo D'AJUZ *et al.* (1975), os disjuntores de única pressão são assim chamados porque o SF<sub>6</sub> permanece no disjuntor, durante a maior parte do tempo, a uma pressão constante. O valor da pressão está entre 3 e 7 bar. A pressão requerida para o sopro, e consequente extinção do arco, é produzida durante a operação de abertura do disjuntor por meio de um pistão solidário à haste do contato móvel que, ao se movimentar, comprime o gás dentro de uma câmara (CARVALHO *et al.*, 1995). A compressão do SF<sub>6</sub> no processo produz pressões de duas a seis vezes a pressão original e, no intervalo entre a separação dos contatos e o fim do movimento, o gás é forçado a fluir entre os contatos e através de uma ou duas passagens (D'AJUZ *et al.*, 1975).

### **DISJUNTORES A VÁCUO**

O arco a vácuo difere das classes gerais de arcos de alta e baixa pressão, pois no arco a vácuo, os elétrons, íons e átomos neutros são todos derivados dos eletrodos. A pressão base do gás é tão baixa que ela não exerce papel significativo no processo de condução. Nesse sentido, o arco a vácuo é, consequentemente, uma descarga de vapor metálico (BHEL, 2006). O vácuo é de ordem de 10<sup>-8</sup> a 10<sup>-6</sup> bar.

Em princípio, um interruptor a vácuo tem uma câmara de extinção de aço no centro e isoladores cerâmicos simetricamente arranjados. Construções mais novas têm uma cobertura metálica que cerca os contatos de arco. Os diâmetros dos contatos e suas hastes são combinados com os da câmara de extinção e dos isoladores. A câmara de extinção é soldada às bordas da carcaça, que, por sua vez, é ligada aos isoladores cerâmicos metalizados, que dão um interruptor hermeticamente fechado (BHEL, 2006).

Em BHEL (2006), afirma-se que todo o desenvolvimento da tecnologia a vácuo é centrado em torno do uso das propriedades materiais e geométricas dos contatos. Apesar da diferente natureza, o processo de interrupção é garantir, como nas demais tecnologias, a extinção do arco na passagem da corrente por zero. O arco será extinto se a energia do sistema for menor que a dissipada no processo de desionização, e assim permanecerá se o restabelecimento da suportabilidade elétrica entre os contatos for suficientemente rápido para suportar a TRT. Segundo CARVALHO *et al.* (1995), a eficiência do processo de interrupção é determinada pela rapidez da condensação do vapor metálico nas superfícies dos contatos e barreiras de proteção.

### **3.2 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO**

Embora a medição da resistência de contato principal seja o ensaio mais utilizado para avaliação das condições dos contatos principais do disjuntor, este parâmetro pouco informa sobre as condições dos contatos de arco.

Na prática, a resistência de contato do disjuntor é verificada com um medidor de resistência na faixa de micro-ohms, que apresenta o seguinte princípio de funcionamento: uma fonte de corrente faz circular um valor conhecido de corrente através dos contatos do disjuntor e mede-se a queda de tensão sobre estes contatos. Fazendo-se a relação entre a queda de tensão medida e o valor da corrente injetada, calcula-se o valor da resistência dos contatos. Como os valores de resistência de contato são da ordem de micro-ohms, quanto maior for o valor da corrente elétrica estabelecida pela fonte no circuito, maior precisão será obtida na leitura.

Para efetuar a medição, uma corrente de pelo menos 100 A deve ser injetada no disjuntor com os contatos fechados. O valor da resistência pode ter um valor até 20% maior

que o valor da resistência do disjuntor protótipo. Um valor excessivamente alto da resistência implicará em um aumento de temperatura além do qual o disjuntor foi projetado para suportar.

Apesar de a facilidade de se medir a resistência de contato principal, não é possível obter informações acerca das condições dos contatos de arco do disjuntor com este ensaio.

O método de medição da resistência dinâmica de contato é o método mais promissor para determinação das condições dos contatos de disjuntores, tanto dos contatos principais quanto dos contatos de arco, entretanto, ainda não está consolidada sua aplicação pelas empresas do setor de energia elétrica devido às dificuldades de interpretação dos resultados.

As primeiras descrições e comentários sobre a MRDC datam do final do decênio de 1980. A MRDC foi desenvolvida para avaliar as condições dos contatos de arco sem desmontar o disjuntor. Este método não é tão largamente usado, pois a interpretação da curva de resistência permanece ambígua. Resultados de testes anteriormente publicados apresentam usualmente muitos picos na curva de resistência que poderiam ser o resultado de separação parcial do contato durante o movimento do contato (LANDRY *et al.*, 2006). Devido a estas dificuldades, os autores propuseram a realização da MRDC em baixa velocidade.

A MRDC é executada de maneira semelhante à medição de resistência estática: injeta-se corrente no elemento de interesse e mede-se a queda de tensão sobre o elemento. A diferença entre a MRDC e a medição de resistência do contato principal é o fato de a MRDC ser feita durante uma operação de abertura dos contatos do disjuntor.

Para realização da MRDC, são necessários os seguintes sinais: corrente injetada, queda de tensão entre os contatos e deslocamento dos contatos, no tempo. Com estes sinais, é possível traçar o gráfico da resistência dinâmica de contato em função do deslocamento dos contatos, como visto na Figura 3.3.

LANDRY *et al.* (2006) explicaram que a curva deve ser traçada em função da distância entre os contatos já que é possível realizar a MRDC em velocidades diferentes da velocidade nominal de abertura. Ainda, no mesmo trabalho, os autores comprovaram que as dificuldades de interpretação das curvas de RDC podem ser atenuadas e a probabilidade de diagnóstico correto aumenta no caso de a medição ser realizada em baixa velocidade.

O uso da MRDC possibilita uma melhor avaliação das condições da câmara e uma maior previsibilidade do tempo ótimo de manutenção com a abertura da câmara.

A partir da análise dos resultados dos ensaios aplicados aos equipamentos sob observação, é possível determinar se há a necessidade de intervenção por parte da equipe de manutenção.

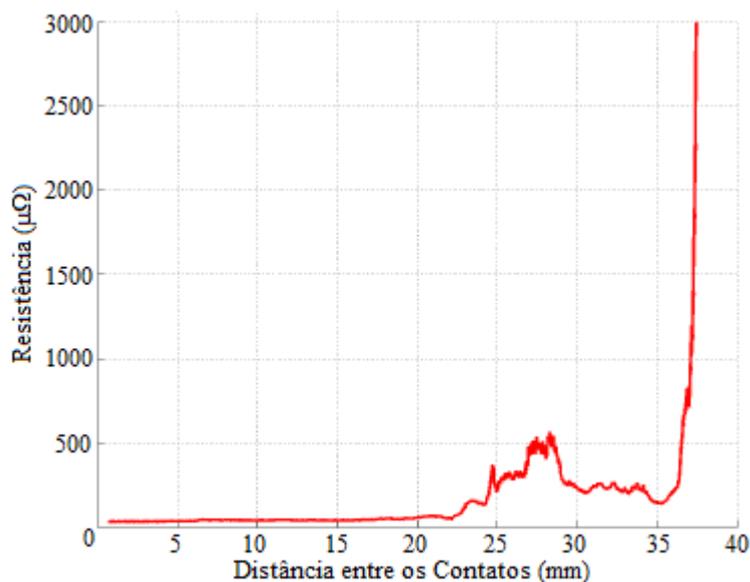


Figura 3.3: Curva de Resistência Dinâmica em Função da Distância entre os Contatos. Adaptado (LANDRY *et al.*, 2006).

### 3.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os aspectos do mecanismo de extinção do arco para as várias técnicas de interrupção existentes e a importância dos disjuntores para o sistema elétrico.

Os ensaios de medição de resistência dos contatos principais e de medição de resistência dinâmica de contato foram discutidos e as vantagens do uso da MRDC foram citadas.

### TRANSFORMADA *WAVELET*

O conceito de *wavelets* é resultado de uma síntese de ideias originadas independentemente em diversas áreas, como matemática, geologia e engenharia. Embora seus princípios básicos sejam considerados como oriundos da transformada de Haar, proposta em 1910, apenas na década de 1980 é que eles foram matematicamente formulados. Em 1984, Grossman e Morlet propuseram a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) que foi considerada o marco decisivo na história das *wavelets* (SILVA, 2009).

Atualmente, diversos trabalhos na área de sistemas de potência utilizando a Transformada *Wavelet* (TW) são propostos com sucesso. Como exemplo, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), BRITO (2001) propôs o uso da TW para análise de transitórios; SILVA (2005), COSTA (2006) e SILVA (2009) propuseram métodos de diagnóstico de faltas em linhas de transmissão usando a TW; e COSTA (2010) propôs o diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios.

De modo geral, a TW é uma operação linear que mapeia um sinal (ou função) de seu domínio original para outro mais conveniente. A TW mapeia um sinal unidimensional (tempo) em um domínio bidimensional (tempo – frequência). A TW decompõe o sinal em termo de *wavelets* filhas que são funções geradas a partir de operações de escalonamento e translação da função base, a *wavelet* mãe.

Uma *wavelet* tem sua energia concentrada no tempo possibilitando o seu uso como uma ferramenta poderosa de análise de fenômenos transitórios, não-estacionários ou variantes no tempo. BURRUS *et al.* (1998) afirmaram que é a propriedade de localização das *wavelets* que permite uma expansão *wavelet* de um evento transitório ser modelada com um pequeno número de coeficientes. Uma *wavelet* mãe deve satisfazer as seguintes propriedades (BURRUS *et al.*, 1998):

1.  $\psi(t) \in L^2(\mathcal{R})$ ;
2.  $C_{\psi(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty$ , onde  $\Psi(\omega)$  é a Transformada de Fourier de  $\psi(t)$ .

A primeira condição exige que a *wavelet* pertença ao espaço dos sinais de energia finita. A segunda condição é chamada condição de admissibilidade. A partir da análise das condições 1 e 2, vê-se que uma *wavelet*, no contexto de processamento de sinais, pode ser definida como um filtro passa faixa, pois:

$$\lim_{\omega \rightarrow \pm\infty} \Psi(\omega) = 0 \text{ e } \lim_{\omega \rightarrow 0} \Psi(\omega) = 0.$$

As *wavelets*, no domínio da frequência, possuem componente nula na frequência zero (são, inerentemente, filtros passa-faixa) e, no domínio do tempo, são oscilatórias e com valor médio nulo (DAUBECHIES, 1988; BRITO, 2001).

A definição matemática da Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) é dada por (4.1). A TWC é definida como o produto interno entre a função original, diga-se  $f(t)$ , e as *wavelets* filhas,  $\psi_{a,b}(t)$ , e pode, também, ser vista como uma medida de semelhança entre os sinais.

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt, \quad (4.1)$$

onde,  $f(t)$  é o sinal,  $\psi_{a,b}(t)$  é a *wavelet* filha,  $a$  e  $b \in \mathcal{R}$ ,  $a$  é o fator de escala,  $b$  é o fator de translação e  $W_f(a, b)$  são os coeficientes *wavelet* contínuos.

As *wavelets* filhas são definidas a partir da *wavelet* mãe pela equação (4.2):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (4.2)$$

O termo  $1/\sqrt{a}$  assegura que energia é mantida em todas as escalas.

Na Figura 4.1, está mostrada a sequência para o cálculo da TWC. O processo de cálculo da TWC pode ser executado seguindo os passos seguintes (FAZIO *et al.*, 2003):

1. Escolher a *wavelet* e comparar com uma seção inicial do sinal original;
2. Calcular os coeficientes  $W_f(a, b)$  representando a semelhança entre a *wavelet* e a seção do sinal (Figura 4.1(a));

3. Deslocar a *wavelet* ao longo do eixo tempo, repetindo os passos 1 e 2, até que o sinal inteiro seja analisado (Figura 4.1(b));
4. Escalonar a *wavelet* e repetir os passos de 1 a 3 (Figura 4.1(c));
5. Repetir os passos de 1 a 4 para cada escala.

A TWC inversa sempre existe e é definida por (4.3), como:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi(t)}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a, b) \cdot \psi_{a,b}(t) \frac{dad b}{a^2}, \quad (4.3)$$

onde,  $C_{\psi(t)}$  é a constante de admissibilidade,  $W_f(a, b)$  são os coeficientes *wavelets* contínuos e,  $a$  e  $b \in \mathcal{R}$ ,  $a$  é o fator de escala,  $b$  é o fator de translação.

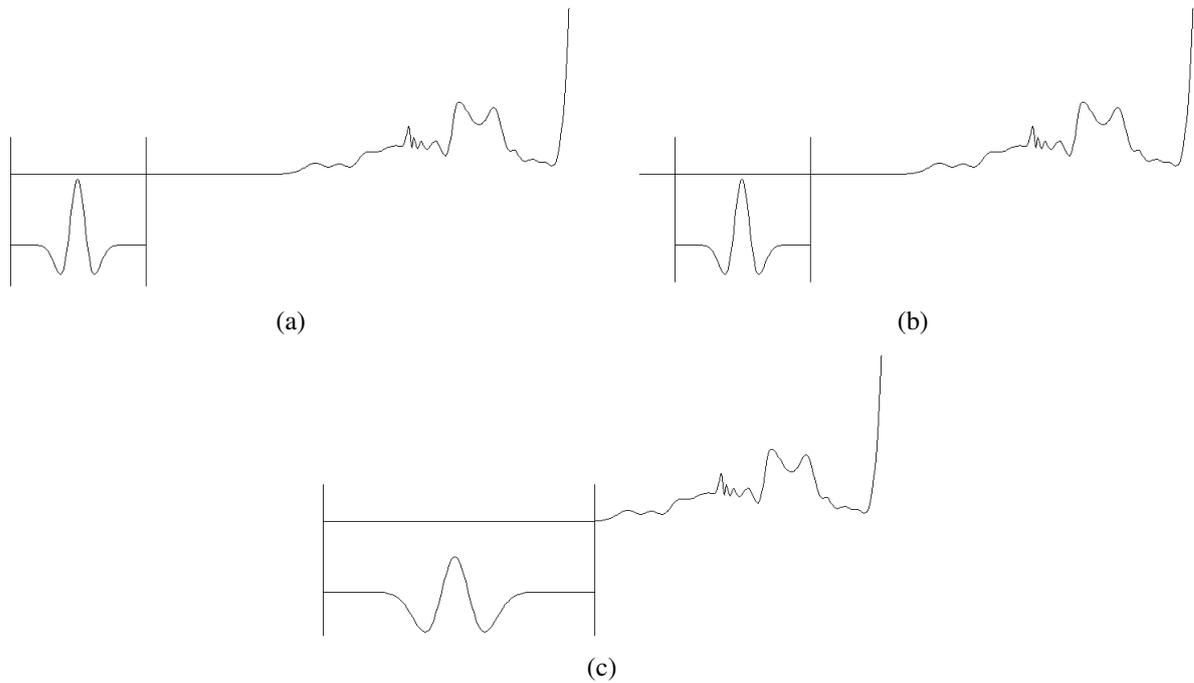


Figura 4.1: Sequência para Cálculo da TWC. (a) Cálculo da TWC para a Primeira Seção do Sinal; (b) Deslocamento da *Wavelet* e Cálculo da TWC. (c) Escalonamento da *Wavelet* e Cálculo da TWC.

## 4.1 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA - TWD

Como o processo de cálculo da TWC é altamente redundante, requer tempo de processamento e recursos computacionais elevados para realizar as operações de translações e escalonamentos contínuos (COSTA, 2006). Em seu trabalho, SILVA (2005) afirma que o cálculo de todos os coeficientes, no caso contínuo, é impraticável computacionalmente.

BRITO (2001) afirmou que a TWC é de grande interesse teórico, principalmente para a derivação e compreensão das propriedades matemáticas da teoria das *wavelets*, contudo, a sua discretização é necessária para aplicações práticas.

Uma alternativa é fazer os fatores de translação e escalonamento discretos, originando a TWD. Uma discretização típica é:

$$a = a_0^j \text{ e } b = ka_0^j b_0, \quad (4.4)$$

com  $j \text{ e } k \in \mathbf{Z}$ ,  $a_0 > 1$  e  $b_0 > 0$ .

Assim, tem-se a TWD definida por (4.5)

$$W_f(j, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) dt, \quad (4.5)$$

A partir da análise de (4.5), obtém-se as seguintes observações (BRITO, 1996):

- A TWD é definida apenas para valores de escala positivos;
- O passo de translação é proporcional a escala;
- A TWD produz um conjunto finito de coeficientes *wavelet*;
- O processo é realizado sobre tempo contínuo.

A escolha de  $a_0 = 2$  e  $b_0 = 1$  implica que as *wavelets* filhas formarão uma base ortonormal. Neste caso, como explicado por BRITO (2001), o objetivo é eliminar a redundância presente na forma contínua e garantir que a TWC possua inversa. Para esta escolha de  $a_0$  e  $b_0$ , a TWD é dada por (4.6):

$$W_f(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi(2^{-j}t - k) dt \quad (4.6)$$

A construção de bases ortonormais e a implementação da TWD para este tipo de *wavelet* são baseadas em uma técnica oriunda da área de processamentos de sinais, denominada de Análise Multiresolucional (AM). Assim como a TW, a AM possibilita a decomposição de um sinal em diferentes resoluções no tempo e na frequência (SILVA, 2005).

A AM é uma técnica utilizada na análise de sinais em bandas de frequências múltiplas. No contexto da *wavelet*, é uma forma padrão de construção de bases ortonormais e de implementação da TW ortonormal (BRITO, 2001).

A partir das propriedades da AM, pode-se definir a TWD inversa por (4.7):

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \langle \psi_{j,k}(t), f(t) \rangle \psi_{j,k}(t), \quad (4.7)$$

onde  $\psi_{j,k}(t) = 1/\sqrt{2^j} \psi(2^{-j}t - k)$  e  $\langle \psi_{j,k}(t), f(t) \rangle$ , que indica o produto interno entre  $\psi_{j,k}(t)$  e  $f(t)$ , são os coeficientes *wavelet* discretos.

Para sinais discretos ou sinais contínuos amostrados, a integral torna-se uma soma e a variável independente,  $t$ , será discreta, podendo ser substituída por  $n$ . Assim, a Série *Wavelet* Discreta no Tempo (SWDT) surge e é definida matematicamente por (4.8):

$$W_f(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \psi(2^{-j}n - k). \quad (4.8)$$

## 4.2 TWD E BANCO DE FILTROS

Em 1989, baseado na análise multiresolucional, Stéphane Mallat desenvolveu um algoritmo rápido e eficiente para o cálculo da TWD, estruturado em árvore e interpretado como um banco de filtro. BURRUS *et al.* (1998) afirmaram que bancos de filtros são estruturas que permitem um sinal ser decomposto em subsinais – tipicamente em uma taxa de amostragem mais baixa. Se o sinal original pode ser reconstruído a partir de subsinais, o banco de filtro é dito ser um banco de filtro de reconstrução perfeita. Matematicamente, tem-se:

$$c_{j+1}(k) = \sum_n h(n - 2k)c_j(n) \quad (4.9a)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_n g(n - 2k)c_j(n) \quad (4.9b)$$

onde,  $n = 2k + l$ ,  $l \in \mathbf{Z}$ ,  $c_{j+1}$  e  $d_{j+1}$  são os coeficientes de aproximação e de detalhe na escala  $j+1$ , respectivamente, e  $h(k)$  e  $g(k)$  caracterizam-se, no contexto de processamentos de sinais, como filtros passa-baixa e passa-alta, chamados filtro escala e filtro *wavelet*, respectivamente.

As equações (4.9) representam um processo de filtragem digital seguido por uma subamostragem por 2 (bloco  $[\downarrow 2]$ ). Para a escala  $j = 0$ ,  $c_0(k)$  são as amostras do sinal original e os coeficientes de aproximação e de detalhe para a primeira escala,  $j = 1$ , são obtidos pela convolução do sinal com os filtros  $h(k)$  e  $g(k)$ , respectivamente, seguidos da dizimação por 2.

Na Figura 4.2, é apresentado o esquema de banco de filtros para cálculo do primeiro nível da TWD.

Os filtros  $h(k)$  e  $g(k)$  são filtros digitais espalhados em quadratura, isto é,  $g(k) = (-1)^{k+1}h(L - 1 - k)$ , com  $L$  sendo o número de coeficientes dos filtros. O número de coeficientes dos filtros e seus valores são determinados de acordo com a *wavelet* mãe escolhida e satisfazem as seguintes propriedades:

$$\sum_{k=1}^L h(k) = \sqrt{2}, \quad \sum_{k=1}^L h^2(k) = 1, \quad \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) h(k + 2n) = 0. \quad (4.10a)$$

$$\sum_{k=1}^L g(k) = 0, \quad \sum_{k=1}^L g^2(k) = 1, \quad \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) g(k + 2n) = 0. \quad (4.10b)$$

Com  $n \in \mathbf{N}$  e  $k = 1, 2, \dots, L$ .

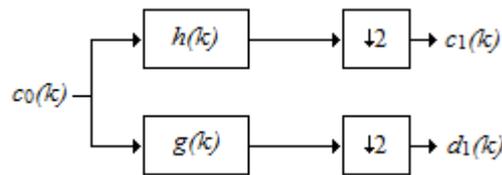


Figura 4.2: Esquema de Banco de Filtros para Cálculo do Primeiro Nível da TWD.

O segundo nível da TWD pode ser alcançado pela aplicação do primeiro nível da TWD ao coeficiente de aproximação do primeiro nível. Este processo está mostrado na Figura 4.3.

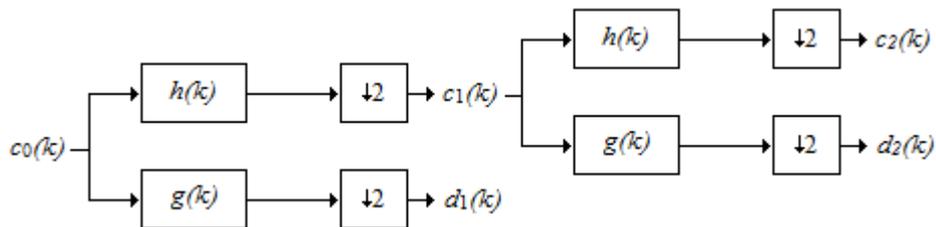


Figura 4.3: Esquema de Banco de Filtros para Cálculo do Segundo Nível da TWD.

Devido à subamostragem, a cada nível da decomposição, o comprimento dos sinais de saída é reduzido à metade. No primeiro nível (ou escala), os sinais de aproximação e de detalhe têm metade do comprimento do sinal original. No segundo nível, os sinais terão metade do comprimento do sinal de aproximação do primeiro nível, ou um quarto em relação ao sinal original. Com o raciocínio, o número máximo de níveis,  $J_{máx}$ , do sinal de comprimento  $N$  é dado por (COSTA, 2006):

$$N = 2^{J_{\text{máx}}} - 1. \quad (4.11)$$

O algoritmo apresentado acima também se presta para o cálculo da TWD inversa. Para isto, é necessário fazer o processo inverso ao apresentado na Figura 4.2 e na Figura 4.3. Para a TWD inversa, os coeficientes de aproximação e de detalhe no nível  $j$ ,  $c_j(k)$  e  $d_j(k)$ , são sobreamostrados (bloco  $[\uparrow 2]$ ), convoluídos com os filtros  $h(k)$  e  $g(k)$ , respectivamente, e somados resultando no coeficiente de aproximação no nível  $j-1$ ,  $c_{j-1}(k)$ . Este processo pode ser repetido recursivamente até que o sinal original seja reconstruído a partir do coeficiente de aproximação do nível  $j$  e dos coeficientes de detalhe do nível  $j$  até o nível 1. Na Figura 4.4, está ilustrada a reconstrução do sinal original a partir do segundo nível da TWD.

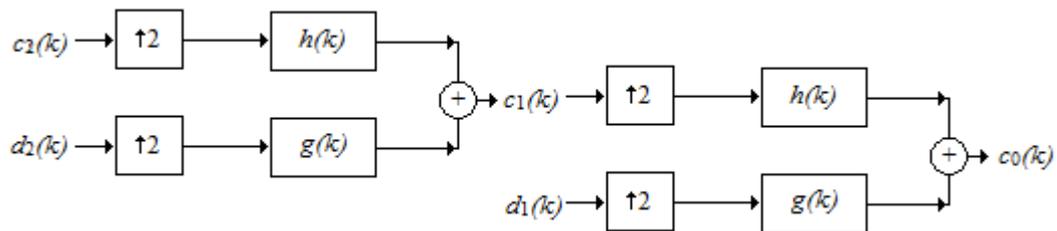


Figura 4.4: Esquema de Banco de Filtros para Reconstrução do Sinal a partir do Segundo Nível da TWD.

### 4.3 FORMA MATRICIAL PARA CÁLCULO DA TWD ORTOGONAL

Para se definir a forma matricial de cálculo da TWD de sinais (ou funções) discretos ou discretizados, é necessário introduzir dois vetores básicos para análise *wavelet* dos sinais. O primeiro deles é o Vetor Escala do 1º nível da TWD definido por (4.12a):

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1(1) &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_L, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{V}_1(2) &= (0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_L, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{V}_1(3) &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_L, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ \mathbf{V}_1(N/2) &= (\alpha_3, \dots, \alpha_L, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2). \end{aligned} \quad (4.12a)$$

O segundo vetor é o Vetor *Wavelet* do 1º nível da TWD definido por (4.12b):

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_1(1) &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_L, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{W}_1(2) &= (0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_L, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{W}_1(3) &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_L, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ \mathbf{W}_1(N/2) &= (\beta_3, \dots, \beta_L, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2), \end{aligned} \quad (4.12b)$$

onde,  $L$  é o número de coeficientes dos filtros definidos nas equações (4.10) e  $N$  é o número de amostras do sinal analisado. Os comprimentos do Vetor Escala e do Vetor *Wavelet* são iguais ao comprimento do sinal analisado. Os valores dos coeficientes  $\alpha_k$  satisfazem as propriedades da equação (4.10a) e os coeficientes  $\beta_k$ , as propriedades da equação (4.10b). É importante explicitar que os coeficientes  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  satisfazem a equação (4.13) (WALKER, 2008):

$$\beta_1 = \alpha_L, \beta_2 = -\alpha_{L-1}, \beta_3 = \alpha_{L-2}, \dots, \beta_{L-1} = \alpha_2, \beta_L = -\alpha_1. \quad (4.13)$$

É possível observar a partir da equação (4.12a) que o Vetor Escala  $V_1(2)$  é formado a partir do deslocamento de duas unidades de tempo de  $V_1(1)$ . Também, o Vetor Escala  $V_1(3)$  é o vetor  $V_1(2)$  deslocado duas unidades de tempo, ou ainda, o vetor  $V_1(1)$  deslocado quatro unidades de tempo e que os coeficientes que extrapolam o comprimento de vetor  $V_1(k)$  são colocados no início do vetor  $V_1(k+1)$ . Pode-se concluir que o vetor  $V_1(n)$  é produzido pelo deslocamento circular do vetor  $V_1(1)$  por  $2(n-1)$  unidades de tempo. A mesma conclusão pode ser feita pela análise de (4.12b), onde se nota que o vetor  $W_1(n)$  é produzido pelo deslocamento circular do vetor  $W_1(1)$  por  $2(n-1)$  unidades de tempo.

Conforme COSTA (2010), o deslocamento circular do vetor  $V_1(1)$  por múltiplos de 2 é o responsável pela subamostragem e dependendo do número de coeficientes  $\alpha_k$  e  $\beta_k$ , poder-se-á aparecer o chamado efeito de borda em alguns valores dos coeficientes de aproximação e de detalhe, que ocorre devido ao processo de realimentação do início do  $V_1(k+1)$  com os coeficientes  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  que extrapolam o comprimento do vetor  $V_1(k)$ . O efeito de borda é caracterizado pela consideração de amostras nas extremidades do sinal (ou função) no cálculo do coeficiente de aproximação (e de detalhe), em oposição ao que ocorre convencionalmente, quando amostras adjacentes do sinal são utilizadas para o cálculo do coeficiente de aproximação (e de detalhe)

Com a definição do Vetor Escala e do Vetor *Wavelet*, pode-se definir os coeficientes de aproximação,  $c_1(k)$ , e de detalhe,  $c_1(k)$ , do primeiro nível como nas equações (4.14) (WALKER, 2008):

$$c_1(k) = \mathbf{f} \cdot \mathbf{V}_1(k), \quad (4.14a)$$

$$c_1(k) = \mathbf{f} \cdot \mathbf{W}_1(k), \quad (4.14b)$$

para o índice  $k = 1, 2, \dots, N/2$ .

Nas equações (4.14), estão expressos os produtos escalares entre o vetor  $\mathbf{f}$ , sinal analisado, e o Vetor Escala e o Vetor *Wavelet*. Estas equações podem, ainda, ser expressas na forma matricial como em (4.15a) e (4.15b).

$$\mathbf{c}_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_L & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_L & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_L & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & & & \\ \alpha_3 & \dots & \alpha_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix} \mathbf{f}, \quad (4.15a)$$

$$\mathbf{d}_1 = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \beta_L & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \beta_L & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \beta_L & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & & & \\ \beta_3 & \dots & \beta_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix} \mathbf{f}, \quad (4.15b)$$

em que,  $\mathbf{c}_1$  e  $\mathbf{d}_1$  são os vetores coeficiente de aproximação e de detalhe do primeiro nível, respectivamente, e  $\mathbf{f}^T = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots \ f_N]$  é o vetor transposto do sinal analisado. As equações (4.15) podem ser expressas de forma compacta como em (4.16).

$$\mathbf{c}_{1N/2x1} = A_{1N/2xN} \cdot \mathbf{f}_{Nx1}, \quad (4.16a)$$

$$\mathbf{d}_{1N/2x1} = B_{1N/2xN} \cdot \mathbf{f}_{Nx1}. \quad (4.16b)$$

O sinal  $\mathbf{f}$  é um vetor coluna contendo N amostras, podendo ser expresso como uma matriz Nx1. As matrizes  $A_1$  e  $B_1$  têm dimensão N/2xN e os vetores  $\mathbf{c}_1$  e  $\mathbf{d}_1$  têm dimensão N/2x1.

Desse modo, novas matrizes podem ser deduzidas para cada um dos demais níveis da TWD, porém, é sabido que os coeficientes de aproximação e de detalhe do segundo nível,  $\mathbf{c}_2$  e  $\mathbf{d}_2$ , são obtidos pela aplicação do primeiro nível da TWD ao coeficiente de aproximação do primeiro nível,  $\mathbf{c}_1$ . Os coeficientes de aproximação e de detalhe do terceiro nível,  $\mathbf{c}_3$  e  $\mathbf{d}_3$ , são encontrados pela aplicação do primeiro nível da TWD ao coeficiente de aproximação do segundo nível,  $\mathbf{c}_2$ , e assim por diante, como mostrando na Figura 4.3. Desta forma, não será necessária a dedução das outras equações matriciais para obtenção de outros níveis da TWD.

Para ilustrar os valores dos coeficientes  $\alpha_k$  e  $\beta_k$ , na Tabela 4.1, estão apresentados alguns valores dos coeficientes para as *wavelets* Haar (também conhecida como Daubechies 2), Daubechies 4 e Daubechies 6 e para Coiflet 6.

TABELA 4.1: Exemplos de Valores dos Coeficientes para as *Wavelets* Haar, Daubechies 4, Daubechies 6 e Coiflet 6

<i>Wavelet</i>	Haar		Daubechies 4		Daubechies 6		Coiflet 6	
Posição	$\alpha_k$	$\beta_k$	$\alpha_k$	$\beta_k$	$\alpha_k$	$\beta_k$	$\alpha_k$	$\beta_k$
1	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$\frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	0,33267	0,03523	$\frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$	$\frac{-3+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$
2	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}}$	0,80689	0,08544	$\frac{5+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{7}-1}{16\sqrt{2}}$
3	-	-	$\frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$\frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	0,45988	-0,13501	$\frac{14+2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$	$\frac{14-2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$
4	-	-	$\frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$\frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	-0,13501	-0,45988	$\frac{14-2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$	$\frac{-14-2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$
5	-	-	-	-	-0,08544	0,80689	$\frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$	$\frac{14+2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$
6	-	-	-	-	0,03523	-0,33267	$\frac{-3+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{7}-1}{16\sqrt{2}}$

#### 4.4 PROPRIEDADES DA TRANSFORMADA WAVELET

O Teorema de Parseval (BURRUS *et al.*, 1998) estabelece que a energia do sinal original é igual a soma das energias dos coeficientes da TW nos vários níveis. Assim, a TW conserva a energia do sinal independente do nível da decomposição. Matematicamente, o teorema de Parseval é expresso por (4.17):

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_j(k)|^2 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2, \quad (4.17)$$

sendo a integral do lado esquerdo a energia do sinal original, o primeiro termo do lado direito da igualdade a energia do coeficiente de aproximação do nível  $j$  e o segundo termo a energia dos coeficientes de detalhe até o nível  $j$ .

Outra importante propriedade da TW é a Característica de Pequenos Detalhes (WALKER, 2008): as magnitudes dos valores do coeficiente de detalhe são, com frequência, significativamente menores que as magnitudes dos valores do sinal original.

A explicação da característica é feita a partir da definição do coeficiente de detalhe, que é a diferença contínua entre valores consecutivos do sinal. Como os sinais discretos são amostras de um sinal contínuo com intervalo de amostragem relativamente pequeno, os valores das amostras serão próximos e a diferença entre eles será muito pequena.

A partir da Característica de Pequenos Detalhes fica evidente que a energia do sinal original ficará significativamente concentrada no coeficiente de aproximação. À medida que se aumenta o nível da TW, menor será o comprimento dos coeficientes e nota-se uma diminuição da percentagem da energia do sinal original concentrada no coeficiente de aproximação. WALKER (2008) explicou pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg o motivo da diminuição do valor da energia do coeficiente: enquanto se tenta comprimir a energia em intervalos de tempo cada vez menores, é inevitável que alguma energia não seja considerada na análise.

É evidente que para sinais pouco comportados, com muitas descontinuidades ou com muitas variações, maior será o valor da energia dos coeficientes de detalhe. Relacionando ao estudo das curvas de RDC, que são bem comportadas, a característica de pequenos detalhes pode ser útil na determinação das condições de um disjuntor a partir da análise das curvas de RDC.

## **4.5 RESUMO DO CAPÍTULO**

Neste capítulo, foram apresentadas as noções básicas da TW e de sua versão discreta, a TWD. Foram mostradas as formas de cálculo da TWD utilizando a analogia com banco de filtros e utilizando a formulação matricial. No final do capítulo, foram apresentadas a propriedade de conservação e compactação da energia e a característica de pequenos detalhes que serão utilizadas para implementação das análises a serem feitas nesta dissertação.

### SIMULAÇÕES E ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados o banco de dados e os algoritmos de sua geração, bem como os algoritmos de análise, as análises e os resultados obtidos. Todas as rotinas computacionais foram elaboradas no ambiente MATLAB<sup>®</sup>.

A obtenção experimental da curva de resistência dinâmica de contato (RDC) exige um equipamento chamado analisador de disjuntores. O analisador faz a medição de sincronismo dos contatos principais e auxiliares, traça a curva de movimento dos contatos, além de efetuar a medição da resistência estática e dinâmica. O analisador tem custo alto e não foi possível sua utilização durante esta pesquisa. Uma alternativa ao uso do analisador é projetar um sistema de aquisição de dados para medição da corrente injetada, da queda de tensão entre os contatos do disjuntor e do deslocamento dos contatos durante uma operação de abertura. Com estes sinais capturados, é possível elaborar uma rotina computacional para desenhar o gráfico da resistência de contato em função da distância entre os contatos.

Devido à indisponibilidade de disjuntores para realização dos testes e do analisador de disjuntores, o banco de dados teve de ser gerado a partir de alguns testes experimentais realizados por LANDRY *et al.* (2006). As curvas de RDC mostradas na Figura 5.1 e na Figura 5.2 foram obtidas para uma mesma câmara de um disjuntor a SF<sub>6</sub> responsável pela manobra de um banco de capacitor de 120 kV. A curva da Figura 5.1 foi obtida quando a câmara estava com uma anomalia nos contatos de arco como mostrada na Figura 5.3. Na Figura 5.2, está apresentada a curva de RDC após a anomalia ter sido solucionada, isto é, a equipe manutenção ter atuado.

No trabalho publicado em 2006, LANDRY *et al.* afirmam que o valor da área cumulativa abaixo da curva de RDC é uma excelente avaliação da real condição dos conjuntos de contato e que este valor cresce à medida que o desgaste do contato cresce.

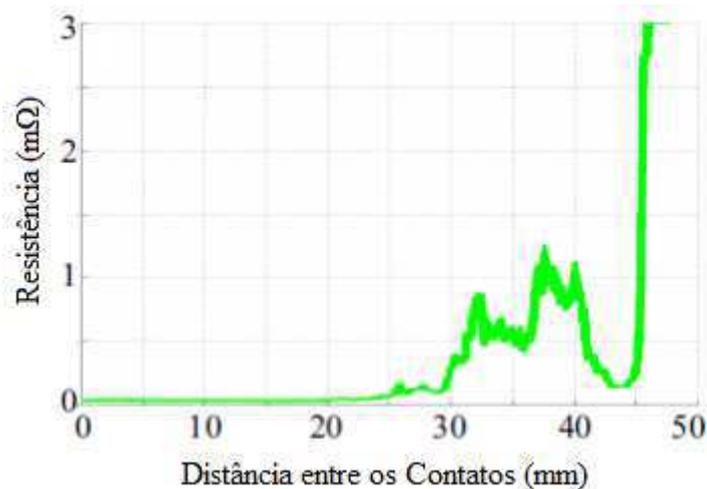


Figura 5.1: Curva de Medição de Resistência Dinâmica para a Câmara de Interrupção com Anomalia. Adaptado (LANDRY, 2006).



Figura 5.2: Curva de Medição de Resistência Dinâmica para a Câmara de Interrupção sem Anomalia. Adaptado (LANDRY, 2006).

Tomando como referência o critério da área abaixo da curva, será avaliado o critério de análise das curvas de RDC utilizando a TWD proposto nesta dissertação. O método proposto é baseado no cálculo da energia do coeficiente de detalhe após aplicar a TWD ao sinal a ser analisado. Será também avaliada a família *wavelet* que apresenta o melhor desempenho na caracterização das condições operacionais das câmaras a partir da curva de RDC.



Figura 5.3: Foto dos Contatos da Câmara com Anomalia. Adaptado (LANDRY, 2006).

## 5.1 GERAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Para a geração do banco de dados, foram usadas as curvas mostradas na Figura 5.1 e na Figura 5.2. Considerando-se que elas representam, respectivamente, câmaras degradadas naturalmente nas operações de abertura e fechamento dos contatos, e câmaras em bom estado, é necessário criar curvas para representar estados de degradação intermediários para realização das análises.

A forma escolhida para geração das curvas de estados intermediários foi o cálculo de uma curva média a partir da soma e divisão por dois de duas curvas consecutivas. De posse das duas curvas bases, foi possível criar uma terceira curva somando-se as curvas bases e dividindo-se o resultado por dois. Desta forma, gerou-se uma curva que é exatamente a curva média entre as duas primeiras curvas.

Após a geração da terceira curva, é possível gerar duas novas curvas. Uma situada entre a curva representativa de uma câmara em bom estado e a terceira curva e outra situada entre a terceira curva e a curva que representa uma câmara degradada. Este processo seguiu até que se tenha criado um número de curvas desejado para representar o número de estados de degradação.

Na Figura 5.4, é ilustrado graficamente o processo de geração das curvas de estados intermediários de degradação. Nesta figura, a curva da extremidade inferior é a curva

referente à câmara em bom estado e a curva do topo é a curva relacionada à câmara defeituosa ou degradada. As curvas estão numeradas em ordem crescente de desgaste.

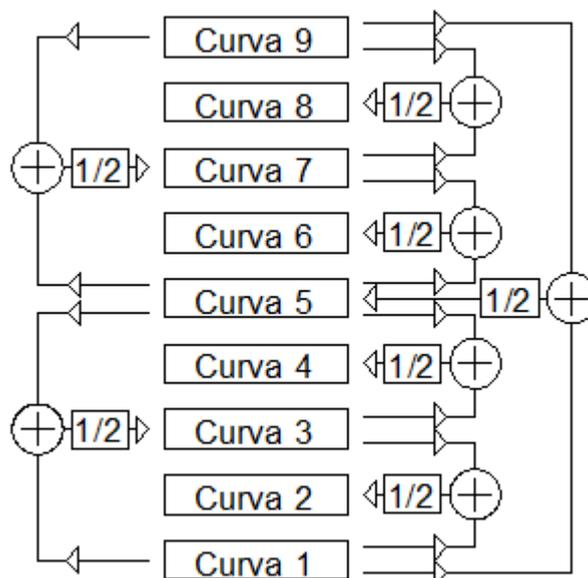


Figura 5.4: Diagrama de Bloco do Esquema de Geração de Curvas de Estados Intermediários.

Para que fossem possíveis as operações de soma e divisão por dois, cada curva base foi tratada como um vetor de 640 elementos. As duas curvas foram digitalizadas utilizando uma rotina de captação das coordenadas a partir da análise da imagem.

O número de elementos dos vetores foi escolhido de forma a satisfazer as condições de número par de amostras para todos os níveis *wavelet* analisados, de número de pontos necessários para aplicação do método de integração numérica de Simpson 3/8 e de ter uma quantidade suficiente de pontos para representar adequadamente as características das curvas de RDC.

A parte mais importante da curva para a análise proposta está situada antes da separação dos contatos de arco, indicada na Figura 5.5. Por esta razão, os dados utilizados para geração do conjunto de dados foram truncados e o sinal passou a ser representado pelos 592 primeiros pontos. Desta forma, a parte final da curva, quando a resistência de contatos tende ao infinito, foi desconsiderada nas análises. Aqui, novamente, o número de pontos foi escolhido para satisfazer as condições já expostas. Na Figura 5.6, estão mostradas as nove curvas intermediárias geradas com o truncamento.

O truncamento foi necessário porque, além de representar a região da extinção do arco (não essencial para a análise), a parcela da curva após a separação do arco armazena a

maior parte da energia, tornando as demais oscilações do sinal portadoras de um valor de energia relativamente baixo.

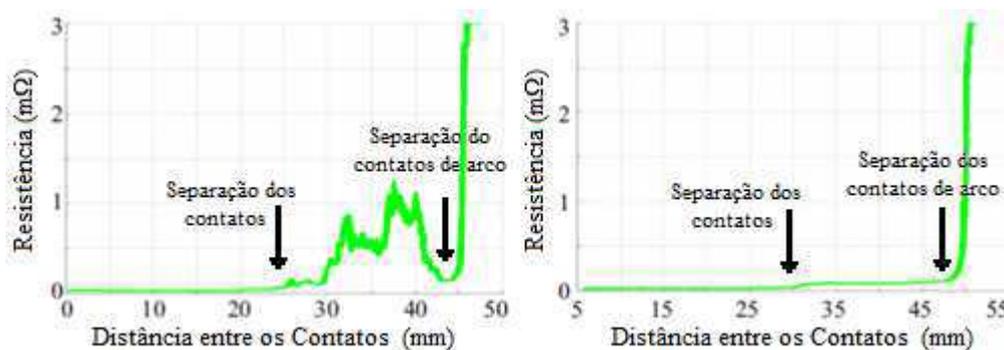


Figura 5.5: Indicação dos Momentos de Separação dos Contatos.

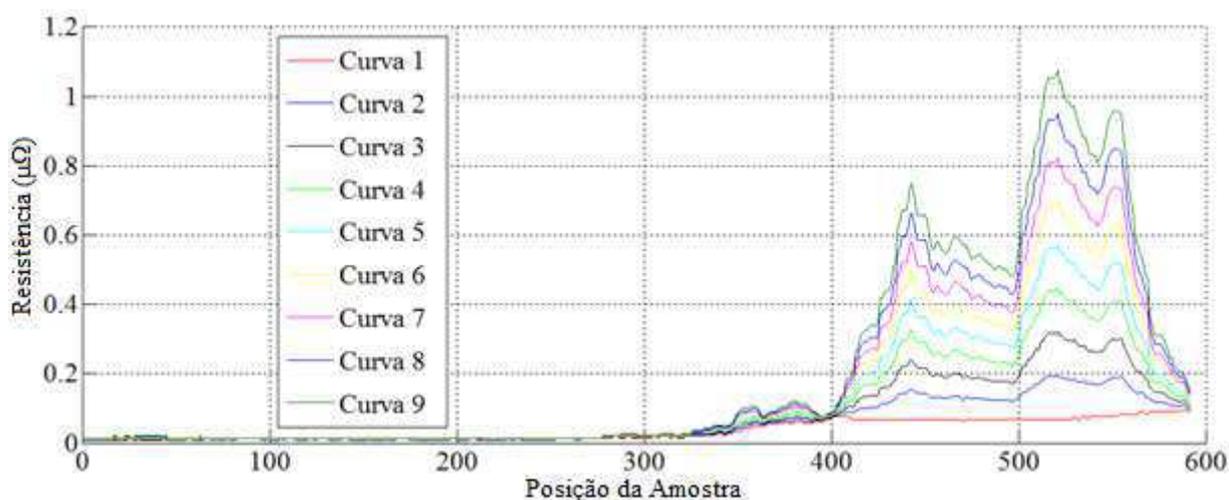


Figura 5.6: Curvas de Estados Intermediários.

Como se pode observar, os picos da Curva 9 da Figura 5.6 não possuem os mesmo valores que os picos da curva da Figura 5.1, isto deve-se ao fato de a rotina de análise de imagens utilizada para captação das coordenadas fazer a média das coordenadas dos vários pontos captados em uma mesma coluna da matriz da imagem. É possível notar a partir da Figura 5.1, que mais de um ponto é tomado para cada coluna da imagem, pois o traço da curva é bastante espesso.

Com o objetivo de gerar várias curvas em um mesmo nível de desgastes, a cada uma das nove curvas foi acrescido ruído aleatório com distribuição normal cujo nível variou de 1 a 10% em valores inteiros. O valor do ruído foi aplicado a cada ponto da curva de forma que o valor original do ponto pôde aumentar até 10%. O ruído foi implementado de forma aditiva.

Na Figura 5.7, está mostrado o diagrama de blocos do esquema de adição de ruído. Os blocos *Nível de Ruído* e *CURVA* são as entradas da função de adição de ruído. Os blocos internos *Valor Aleatório*, *Normalização*, *RUÍDO* e *Multiplicação Termo a Termo* aplicam as operações necessárias de geração e adição do ruído com a forma desejada às curvas indicadas na Figura 5.4. Os dados de saída estão representados pelo bloco *CURVA COM RUÍDO*. No total, o banco de dados passa a ser composto por 900 curvas com ruído e pelas 9 curvas intermediárias.

O seguinte exemplo ilustra o funcionamento da função de adição de ruído. Dadas as entradas *Nível do Ruído* = 5% e *CURVA* = Curva 5, será gerado um *Vetor Aleatório* com 592 elementos com valores no intervalo (0, 1) que será normalizado e um vetor *RUÍDO* com 592 elementos com valores no intervalo [1, 1,05] será gerado. Cada termo do vetor *RUÍDO* é multiplicado pelo termo correspondente do vetor *CURVA*, produzindo o vetor *CURVA COM RUÍDO*. Para cada conjunto de entrada, são geradas 10 (dez) saídas.

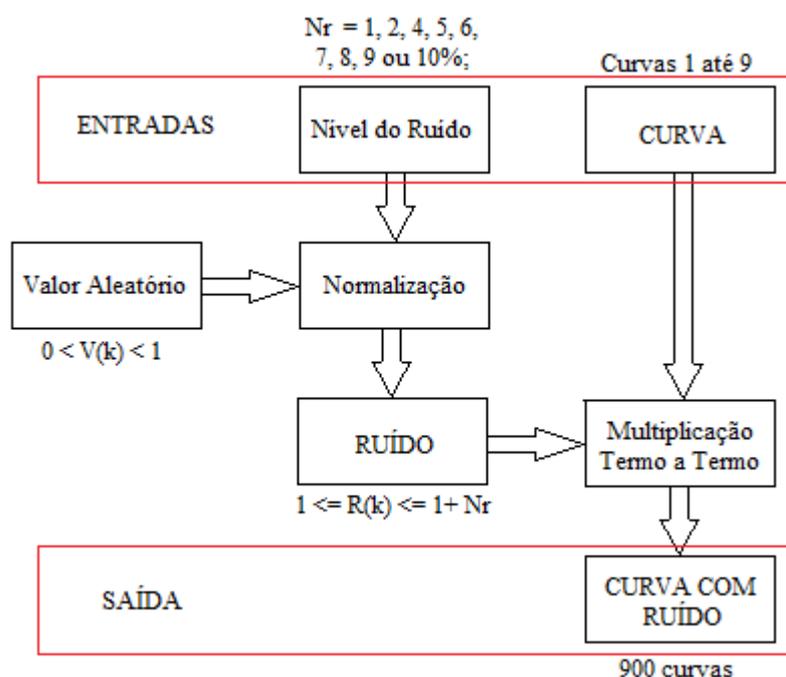


Figura 5.7. Diagrama de Bloco Esquemático da Adição do Ruído Aleatório às Curvas Intermediárias.

## 5.2 MÉTODO DE ANÁLISE

Após a geração do banco de dados, é a vez de analisar as curvas e avaliar o método proposto. Para classificar as curvas do banco de dados em ordem crescente de desgaste, a área sob cada

uma delas foi calculada, conforme indicado por LANDRY *et al.* (2006). O método de integração numérica escolhido foi o método de Simpson 3/8 por ser mais exato que o método de Simpson 1/3 e o método Trapezoidal.

Por meio da classificação das curvas pelo valor da área sob a curva, foram delimitadas oito classes de desgaste com extremos impostos pelas nove curvas intermediárias. Cada classe é composta por 100 curvas. Como o valor do ruído em cada ponto da curva só pode fazer o valor original aumentar, não houve nenhuma curva com área menor que a área da Curva 1 da Figura 5.4, relacionada ao disjuntor com os seus contatos em perfeito estado. As curvas classificadas com área maior que a área abaixo da Curva 9 da Figura 5.4, relacionada ao disjuntor com os seus contatos em estado de degradação máxima, foram descartadas por se apresentarem em um estado de degradação não definido para a análise. Assim, o total de curvas disponíveis foi reduzido a 800. Totalizando 809 quando se somam as nove curvas intermediárias.

A TWD foi aplicada a cada uma das 800 (oitocentas) curvas com ruído e a cada uma das 9 (nove) curvas intermediárias. Cada curva foi decomposta até o terceiro nível da TWD. As famílias *wavelets* utilizadas foram a Haar, Daubechies 4, 6 e 8, Coiflet 6 e 12 e Symlet 8. Como a Symlet 4 e a Symlet 6 são idênticas as Daubechies 4 e Daubechies 6, elas são aplicadas por consequência. O número que segue o nome da família indica o número de coeficientes dos filtros da TW.

A escolha da aplicação da TW até o terceiro nível foi baseada na característica de pequenos detalhes explicada na Seção 4.4. Níveis maiores de decomposição implicarão em maiores valores de energia desconsiderada na análise, devido à diminuição do valor da energia do coeficiente de detalhe do sinal analisado.

É evidente, a partir da definição do coeficiente de detalhe, que para sinais pouco comportados, com muitas discontinuidades ou com muitas variações, maior será o valor da energia dos coeficientes de detalhe. Assim, a classificação do nível de degradação da câmara de extinção de disjuntores deve ser feita utilizando-se a energia do coeficiente de detalhe.

Após a aplicação da TWD a cada uma das 809 curvas, calculou-se a energia dos coeficientes de detalhe em cada nível e as curvas foram classificadas em ordem crescente do valor da energia do coeficiente de detalhe. Novamente, as curvas intermediárias delimitaram oito classes de desgastes.

Na análise proposta, considerou-se que o nível de degradação da câmara de disjuntores está relacionado diretamente ao valor do coeficiente de detalhe e da energia do coeficiente de detalhe. Considerou-se que quanto maior o valor da energia do coeficiente de detalhe da curva, maior será o desgaste da câmara.

### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS

Como já dito, a classificação realizada de acordo com o critério da área abaixo da curva será considerada como a referência do grau do desgaste ou da degradação da câmara de extinção de disjuntores. Assim, para verificar qual das *wavelets* testadas é a mais adequada para a análise proposta, será computado o número de acertos de classificação das curvas para cada nível da TWD de cada família. Um acerto consiste em indicar corretamente a classe à qual a curva pertence, isto é, verificar se as curvas classificadas usando a TWD correspondem a classificação por área abaixo da curva. Por exemplo, considerando-se um desgaste classificado como pertencente à classe 3 pelo critério da área abaixo da curva, a TWD acertará se também classificar o desgaste como na classe 3.

Na Figura 5.8, está apresentado o gráfico em forma de coluna com os resultados percentuais de acerto utilizando-se a *wavelet* Haar. As oito classes estão representadas por colunas que indicam os seus percentuais de acertos, como visto na legenda do gráfico. Como dito na proposta, três níveis de decomposição dos sinais gerados foram utilizados e estão representados como três séries ou conjuntos.

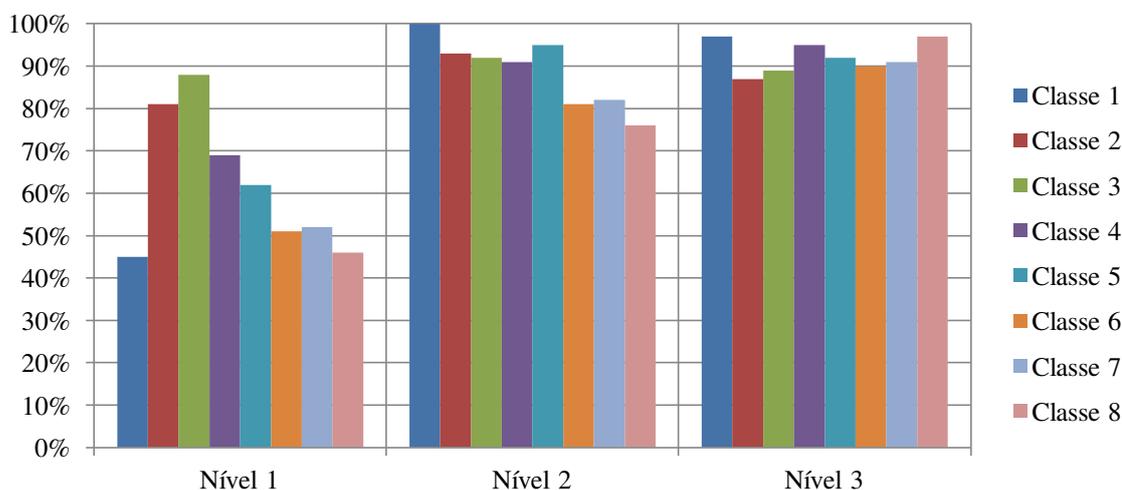


Figura 5.8: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet* Haar.

A partir análise da Figura 5.8, é possível observar que no primeiro nível, o percentual de acerto de cada classe variou bastante de uma classe para outra, tendo o mínimo de 45% para a classe 1 e o máximo de 88% para a classe 3. No segundo nível, os valores de acerto de cada classe foram maiores que os apresentados no primeiro nível e situados em uma faixa mais estreita, entre 76% e 100%. No terceiro nível, a faixa de variação de percentual de acerto ficou ainda mais estreita, entre 87% e 97%. Se a comparação for feita entre os três níveis, observa-se que o terceiro nível de decomposição apresenta, para a maioria das classes, uma quantidade de acerto maior que para os outros dois níveis.

Da Figura 5.9 à Figura 5.11, são apresentados, respectivamente, os resultados obtidos para as *wavelets* Daubechies 4, Daubechies 6 e Daubechies 8.

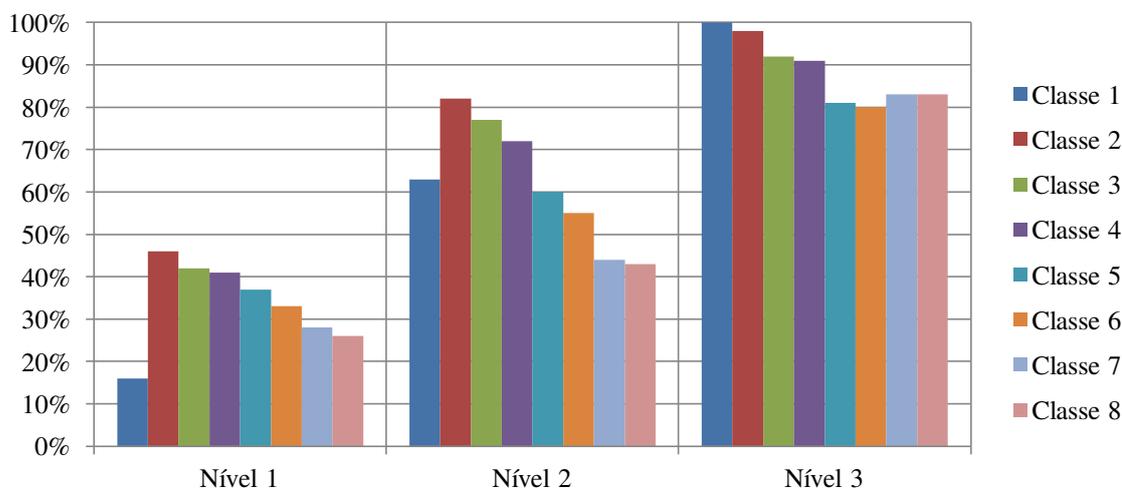


Figura 5.9: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet* Daubechies 4.

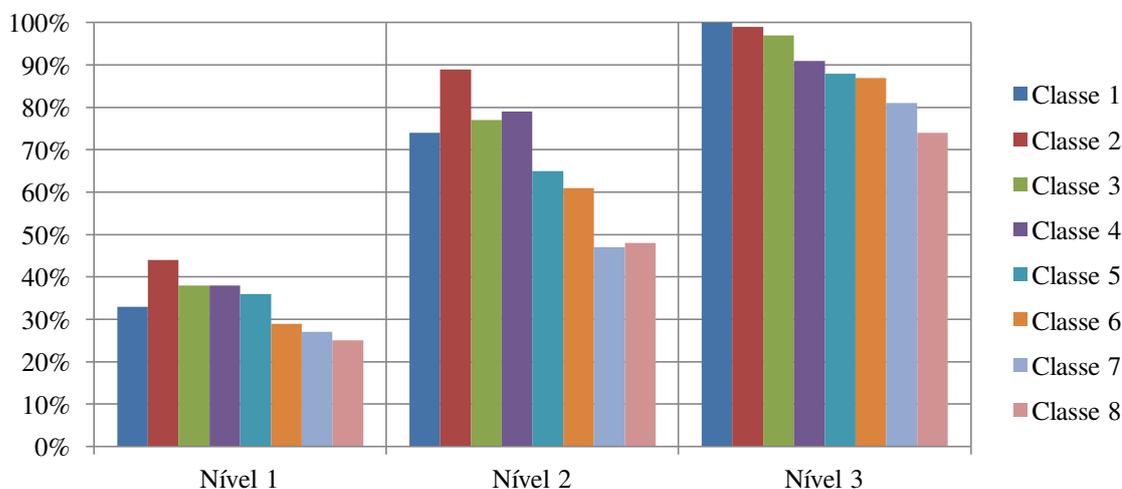


Figura 5.10: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet* Daubechies 6.

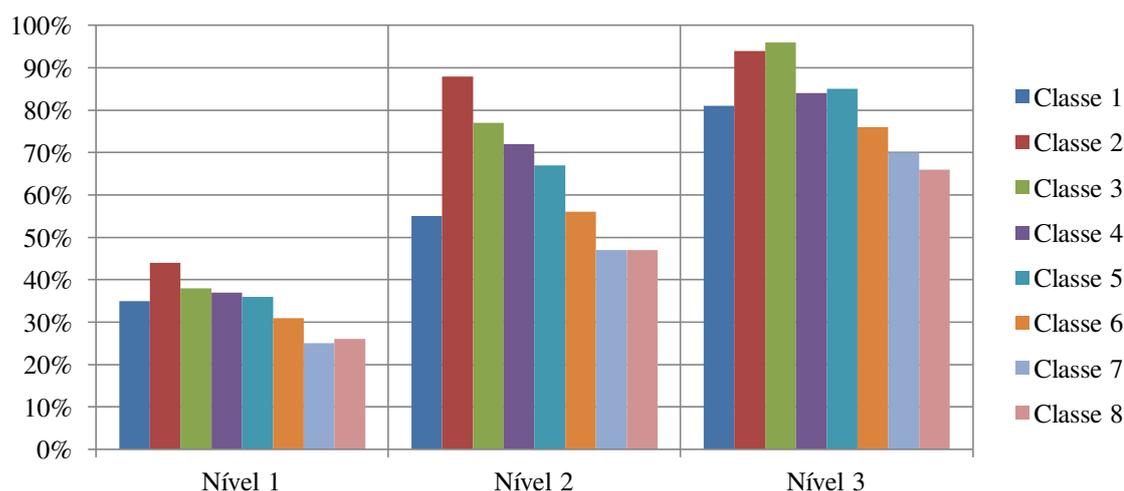


Figura 5.11: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet* Daubechies 8.

A partir análise da Figura 5.9, é possível observar que no primeiro nível, o percentual de acerto de cada classe variou bastante de uma classe para outra, tendo o mínimo de 16% para a classe 1 e o máximo de 46% para a classe 2. No segundo nível, os valores de acerto de cada classe foram maiores que os apresentados no primeiro nível e situados em uma faixa mais larga, entre 43% e 82%, porém em patamar mais elevado. No terceiro nível, a faixa de variação de percentual de acerto ficou mais estreita, entre 80% e 100%. Se a comparação for feita entre os três níveis, observa-se que o terceiro nível de decomposição apresenta, para a maioria das classes, uma quantidade de acerto maior que para os outros dois níveis.

A partir de análise semelhante para a Figura 5.10, chega-se aos seguintes resultados: para o primeiro nível, a faixa de variação do nível de acerto é de 33% a 44%; para o segundo nível, 47% a 89%; e para o terceiro nível, 74% a 100%. Constata-se também que o terceiro nível possui os melhores resultados.

Para a Figura 5.11, por meio da análise dos resultados, destaca-se o terceiro nível como o nível de maior número de acertos. Vê-se ainda que as faixas de variação das quantidades de acerto são: para o primeiro nível, 25% a 44%; para o segundo nível, 47% a 88%; e para o terceiro nível, 66% a 96%.

A partir da análise da conjunta da Figura 5.9 à Figura 5.11, observa-se que à medida que se aumentou o nível da decomposição, os resultados obtidos tornam-se cada vez melhores e que o terceiro nível destaca-se com uma quantidade de acerto maior para todas as classes.

Na Figura 5.12, são apresentados os resultados obtidos para a *wavelet* Coiflet 6. A partir análise da Figura 5.12, é possível observar que no primeiro nível, o percentual de acerto de cada classe variou bastante de uma classe para outra, tendo o mínimo de 28% para a classe 1 e o máximo de 44% para a classe 2 e a classe 3. No segundo nível, os valores de acerto de cada classe foram maiores que os apresentados no primeiro nível e situados em uma faixa mais larga, entre 54% e 96%, porém em patamar mais elevado. No terceiro nível, a faixa de variação de percentual de acerto ficou mais larga que no primeiro nível, entre 75% e 99%, porém em patamar mais elevado. Se a comparação for feita entre os três níveis, observa-se que o terceiro nível de decomposição apresenta, para todas as classes, uma quantidade de acerto maior que para os outros dois níveis.

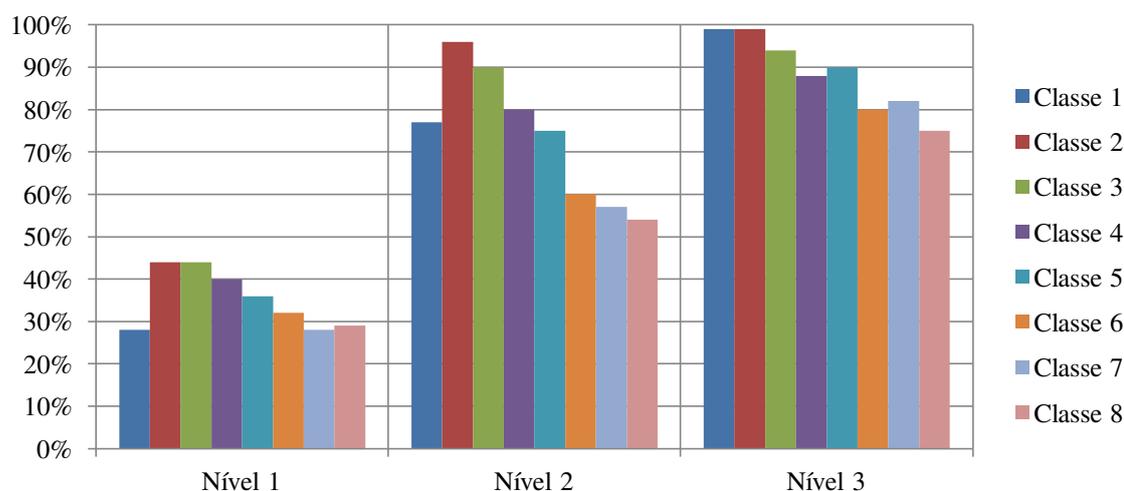


Figura 5.12: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet* Coiflet 6.

Na Figura 5.13, estão apresentados os resultados para a *wavelet* Coiflet 12. Observa-se que os resultados de todos os níveis são iguais e que houve 100% de acerto em todas as classes.

Deve-se destacar aqui que estes resultados nem sempre deverão ser iguais e que são frutos do conjunto de dados analisado. É possível que para outro conjunto de dados, os valores não sejam todos iguais a 100% e que se assemelhem aos resultados já mostrados para outras *wavelets*.

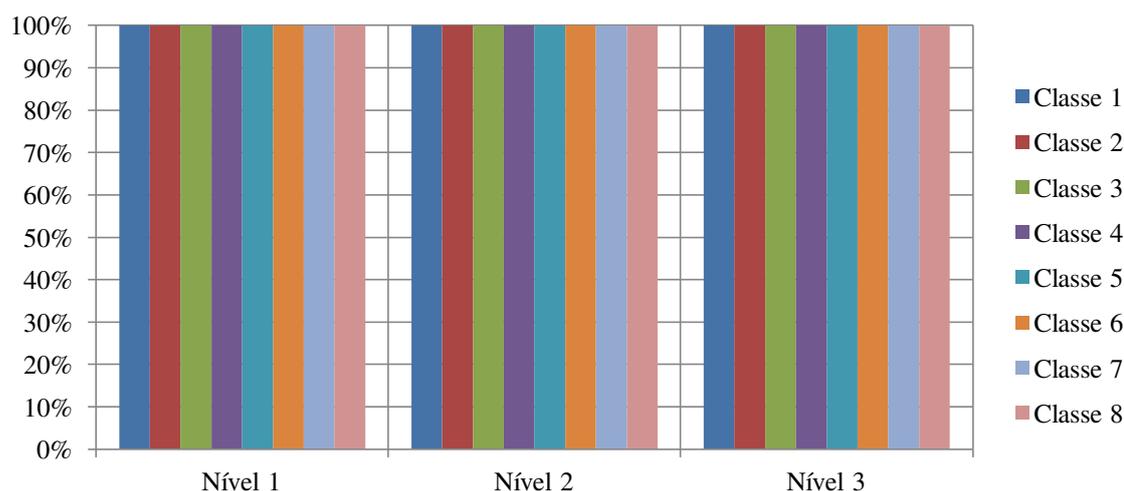


Figura 5.13: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet Coiflet 12*.

Na Figura 5.14, apresentam-se os resultados obtidos para a *wavelet Symlet 8*. Como já dito na seção anterior, as transformadas *wavelets* Daubechies 4 e Daubechies 6 são idênticas as transformadas *wavelets* Symlet 4 e Symlet 6, daí, os resultados apresentados na Figura 5.9 e na Figura 5.10 representam também os resultados para as Symlet 4 e Symlet 6.

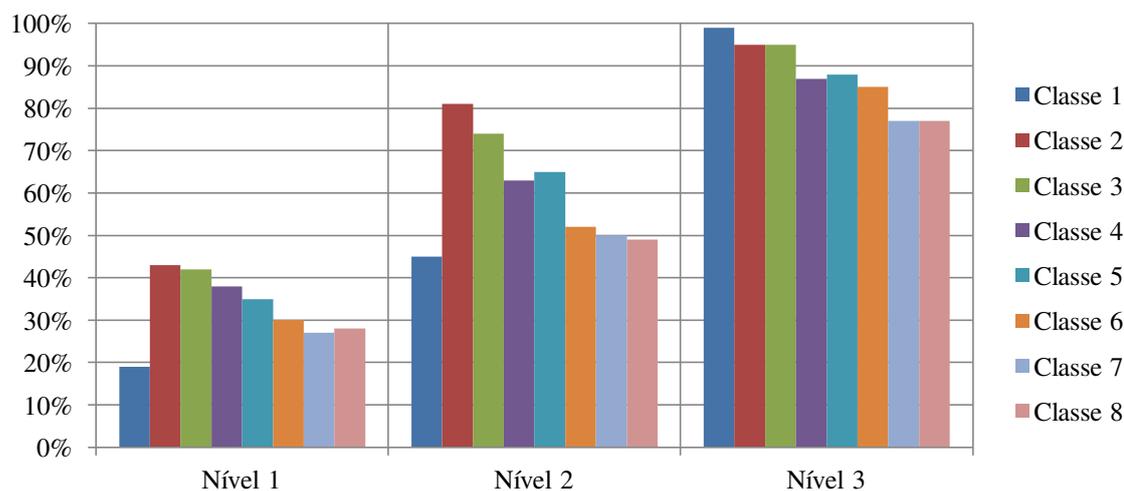


Figura 5.14: Gráfico de Coluna com o Percentual de Acertos para a *Wavelet Symlet 8*.

Na Figura 5.14, observam-se resultados semelhantes aos apresentados nos demais casos, com o terceiro nível sendo capaz de fazer uma classificação melhor dos dados analisados. No primeiro nível, o valor de acerto situa-se entre 19% e 43%. No segundo, a faixa de variação dos valores de acerto é mais larga e está entre 45% e 81% e em torno de uma média maior. No terceiro nível, os valores de acerto estão entre 77% e 99%, que é mais estreita que as faixas de variação do primeiro nível e do segundo nível.

As *wavelets* Daubechies 12 e Symlet 12 também foram testadas, mas as duas transformadas não apresentaram resultados úteis. Nos dois casos, as curvas intermediárias (ver Figura 5.4) que definem as classes de desgaste não foram ordenadas corretamente, impossibilitando as análises.

A partir da interpretação de todos os gráficos mostrados da Figura 5.8 a Figura 5.14, observa-se que a *wavelet* Coiflet 12 apresentou o melhor resultado, com acerto completo de todas as classes, para o conjunto de dados analisados. Também pelos gráficos, observa-se o terceiro nível da decomposição das transformadas apresenta os melhores resultados para todas as famílias testadas, caracterizando-se assim, como o mais adequado para a classificação dos sinais analisados.

Se a análise for feita por classes, observa-se que, para o primeiro nível, a classe 2 e a classe 3 se destacam como as que possuem os maiores percentuais de acerto em todas as *wavelets* testadas. Também, se a análise for feita com o segundo nível, o comportamento continua aproximadamente igual. No caso do terceiro nível, vê-se, agora, que a classe 1 também destaca-se com valores de acerto maiores que os valores para a classe 3, exceto para a *wavelet* Daubechies 8.

Com o objetivo de avaliar a consistência dos resultados, utilizando-se plataforma Excel, calculou-se o valor do intervalo de confiança com nível de 90% para cada uma das famílias em cada nível da decomposição *wavelet*, com 100 amostras e assumida uma distribuição de probabilidade normal. Na Tabela 5.1, estão apresentados todos os valores dos intervalos de confiança.

TABELA 5.1: Intervalo de Confiança para cada *Wavelet* em cada Nível

<b>Família Wavelet</b>	<b>Haar</b>	<b>Db4</b>	<b>Db6</b>	<b>Db8</b>	<b>Coif6</b>	<b>Coif12</b>	<b>Sym8</b>
<b>1º Nível</b>							
Intervalo de Confiança	2,68%	1,63%	1,06%	1,05%	1,13%	0,00%	1,36%
<b>2º Nível</b>							
Intervalo de Confiança	1,34%	2,38%	2,47%	2,44%	3,65%	0,00%	2,14%
<b>3º Nível</b>							
Intervalo de Confiança	0,61%	1,29%	1,50%	1,75%	1,46%	0,00%	1,35%

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 5.1, nota-se que os resultados obtidos são consistentes, pois os intervalos de confiança são pequenos. Note que para as *wavelets* Haar, Daubechies 4 e Symlet 8 o intervalo de confiança do terceiro nível é menor que o intervalo dos outros dois níveis, indicando uma maior confiabilidade nos resultados.

Para as *wavelets* Daubechies 6, Daubechies 8 e Coiflet 6, no primeiro nível, os intervalos de confiança são menores, mostrando que os resultados no primeiro nível são menos dispersos que os resultados dos demais níveis. Para os outros níveis, os resultados também se mostram aceitáveis.

Na Tabela 5.2, são mostrados os valores percentuais do total de curvas corretamente classificadas para cada um das *wavelet*. Também podem ser vistos os resultados das curvas classificadas incorretamente, isto é, classificada em uma classe diferente da esperada, e os resultados de curvas classificadas fora das classes possíveis para cada nível.

TABELA 5.2: Total de Acertos para cada Nível

<b>Família Wavelet</b>	<b>Haar</b>	<b>Db4</b>	<b>Db6</b>	<b>Db8</b>	<b>Coif6</b>	<b>Coif12</b>	<b>Sym8</b>
<b>1º Nível</b>							
Corretamente Classificada	61,75%	33,62%	33,75%	34,00%	35,12%	100,00%	32,75%
Erroneamente Classificada	29,00%	46,50%	44,25%	43,62%	44,76%	0,00%	45,50%
Sem Classe Definida	9,25%	19,88%	22,00%	22,38%	20,12%	0,00%	21,25%
<b>2º Nível</b>							
Corretamente Classificada	88,75%	62,00%	67,50%	63,62%	73,62%	100,00%	59,88%
Erroneamente Classificada	8,50%	29,12%	24,50%	28,50%	19,88%	0,00%	32,00%
Sem Classe Definida	2,75%	8,88%	8,00%	7,88%	6,50%	0,00%	8,12%
<b>3º Nível</b>							
Corretamente Classificada	92,25%	88,50%	89,62%	81,50%	88,38%	100,00%	87,88%
Erroneamente Classificada	7,37%	11,38%	8,26%	15,12%	9,87%	0,00%	11,50%
Sem Classe Definida	0,38%	0,12%	2,12%	3,38%	1,75%	0,00%	0,62%

Na Figura 5.15, é mostrado o gráfico do valor percentual de curvas corretamente classificadas para o primeiro, o segundo e o terceiro níveis de cada uma das famílias testadas.

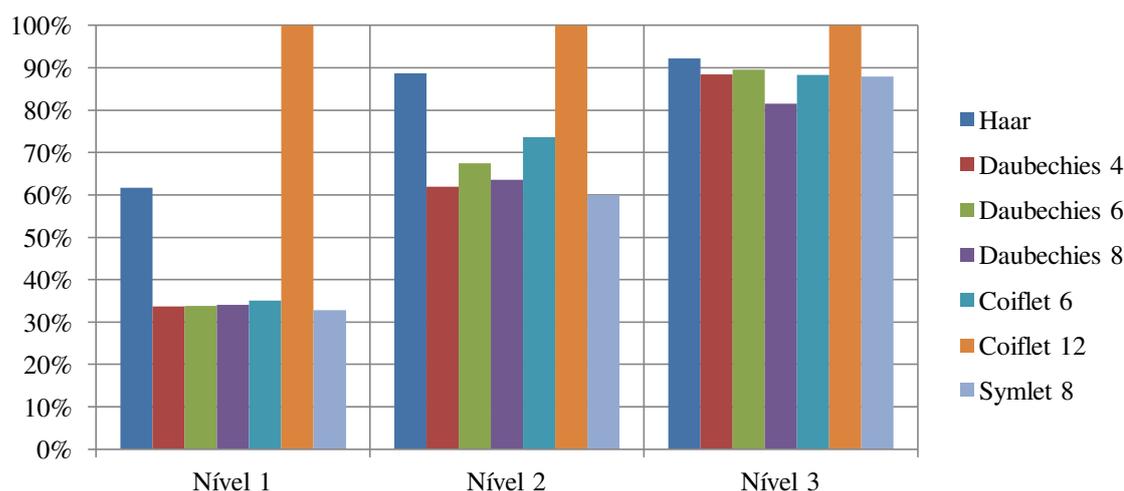


Figura 5.15: Gráfico de Coluna com o Percentual de Curvas Corretamente Classificadas para cada Nível.

Pela análise do gráfico da Figura 5.15 é possível ver uma evolução dos resultados a cada nível da decomposição, excetuando-se a *wavelet* Coiflet 12. A *wavelet* Haar apresenta um percentual total de acerto de 61,75% no primeiro nível, valor que aumenta para 88,75%, no segundo nível, e se torna 92,25% no terceiro nível. As demais *wavelets* apresentam valores em torno de 30%, no primeiro nível, estes valores aumentam para a faixa de 60% a 73%, aproximadamente, no segundo nível e, finalmente, situam-se, no terceiro nível, entre 81% e 93%.

A partir dos resultados apresentados, nota-se que a transformada *wavelet* é uma ferramenta adequada para a análise proposta, isto é, a transformada *wavelet* pode ser utilizada como método de avaliação de câmaras de disjuntores, tornando-se assim, mais um critério para estimação do tempo ótimo para a manutenção com a abertura da câmara de extinção de disjuntores.

Para as curvas analisadas com as transformadas *wavelets*, a interpretação dos resultados conduz à conclusão de que a *wavelet* Coiflet 12 é a mais adequada para a análise das curvas de RDC. E que o terceiro nível da TW é o nível com maior capacidade de análise das curvas de RDC para avaliação das condições de câmaras de disjuntores.

## 5.4 RESUMO DO CAPÍTULO

O método de geração de curvas sintéticas (curvas geradas computacionalmente) para avaliação das condições de câmaras de disjuntores foi apresentado neste capítulo, bem como, a formação de um banco curvas a serem analisadas. A metodologia de análise das curvas e os resultados obtidos também foram mostrados.

Testes com curvas experimentais devem ser conduzidos para análise dos resultados da avaliação das câmaras de disjuntores. Os resultados experimentais podem indicar uma nova família de *wavelet* adequada para a avaliação das câmaras de disjuntores. Contudo, com os resultados aqui apresentados o método proposto é testado e validado.

### CONCLUSÃO

Um método para diagnosticar o estado de degradação dos contatos no interior de câmaras de extinção de disjuntores de potência e o classificar, por nível de desgaste foi apresentado. Transformadas *wavelet* foram aplicadas a curvas sintéticas geradas e utilizadas na pesquisa. Elas foram elaboradas com base em curvas obtidas em ensaios realizados em campo. O método proposto evidencia correlações entre os resultados obtidos e os níveis de degradação das câmaras de extinção sem necessidade de desmontagem do disjuntor, proporcionando ganhos reais aos serviços de manutenção.

Um algoritmo para geração de curvas sintéticas foi desenvolvido e com ele foi possível a criação de um banco de dados de curvas de RDC. Com as curvas geradas foi possível classificar o estado de degradação da câmara de extinção em várias classes de desgaste.

Para as curvas analisadas com as transformadas *wavelets*, a interpretação dos resultados conduz a conclusão de que a *wavelet* Coiflet 12 é a mais adequada para a análise das curvas de RDC.

Quando são analisados os níveis de decomposição das curvas usando transformadas *wavelets*, constata-se que o terceiro nível da TW é o nível que oferece melhor condição de análise das curvas de RDC para avaliação das condições operacionais quanto ao desgaste de câmaras de disjuntores.

A viabilidade técnica do uso da transformada *wavelet* na análise das curvas de Resistência Dinâmica de Contato (RDC) foi constatada. A partir dos resultados apresentados, conclui-se que a transformada *wavelet* é uma ferramenta adequada para o diagnóstico do estado de degradação dos contatos no interior de câmaras de extinção de disjuntores de

potência, tornando-se assim, mais um critério para estimação do tempo ótimo para a manutenção com a abertura da câmara de extinção de disjuntores.

Os resultados são animadores e embora o método tenha sido testado com curvas sintéticas, ele é promissor quanto a sua aplicação em curvas de RDC obtidas experimentalmente. Os resultados aqui apresentados legitimam um método adequado à análise e à classificação de curvas de RDC quanto ao grau de degradação da câmara de extinção de disjuntores.

## **TRABALHOS FUTUROS**

Como trabalhos futuros, podem ser sugeridos os seguintes:

- Aplicação da transformada *wavelet* para análise de curvas de RDC em velocidade nominal;
- Uso de transformadas *wavelet* não ortogonais para análise de curvas de RDC;
- Aquisição e análise de curvas experimentais usando TWD e outras técnicas de apoio a decisão. Fazer a comparação entre elas para determinar qual seria a mais eficiente;
- Desenvolvimento de um padrão de manutenção preventiva, na avaliação do estado das câmaras de interrupção de disjuntores de alta tensão, tendo como parâmetro as curvas de medição de resistência dinâmica.

## REFERÊNCIAS

- BHEL. *Handbook of Switchgears*. McGraw-Hill Companies, Inc. 2006.
- BRITO, N. S. D. *Teoria Wavelet e Sua Aplicação em Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 1996.
- BRITO, N. S. D. *Teoria das wavelets - estudo e aplicação na análise de transitórios em sistemas de potência*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 2001.
- BURRUS, C. S., GOPINATH, R. A., GOU, H. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1998.
- CARVALHO, A. C. C. *et al.*. *Disjuntores e chaves: aplicações em sistemas de potência*. Niterói: EDUFF. 1995.
- CASTRO, F. N. *Aprimoramento do Uso da Transformada Wavelet na Análise das Curvas de Resistência de Contato Dinâmico de Disjuntores de Alta Tensão*. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2010.
- CHAPRA, S. C., CANALE, R. P. *Métodos Numéricos para Engenharia, 5ª Ed.*. São Paulo: McGraw Hill, 2008.
- CHARBKEAW, N., SUWANASRI, T., BUNYAGUL, T. *Mechanical Defect Detection of SF<sub>6</sub> High Voltage Circuit Breaker Using Wavelet Based Vibration Signal Analysis*, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on, vol.2, no., pp.901-904, 14-17 May, 2008.
- COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2006.

COSTA, F. B. *Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso em Registradores Digitais de Perturbação*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2010.

D'AJUZ, A. *et al.*. *Equipamentos Elétricos, aplicação e especificação em subestações de alta tensão*. Rio de Janeiro: FURNAS – Editora da Universidade Federal Fluminense. 1985.

FAZIO, G.; MUZI, F.; RICCI, S.; SACERDOTI, G. *Circuit-breaker diagnostics based on continuous wavelet transform*, 2003 IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, vol. 4, pp. 6, 23-26 June 2003.

GALATI, A., CHELI, S., TUNINETTI, P., MADDALUNO, M. *Condition based maintenance on MV circuit breakers*, 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009, Prague, Czech Republic, 8-11 June 2009.

HOERAUF, R. G., SHIPP, D. D. *Characteristics and applications of various arc interrupting methods*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 5, pp. 849-861, Sep/Oct 1991.

KAM, S-C., NIELSEN, S., LEDWICH, G. *A circuit-breaker restrike diagnostic algorithm using ATP and wavelet transforms*, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'11), pp. 1-6, 25-28 Sept. 2011.

LANDRY, M., MERCIER, A., OULLET, G., RAJOTTE, C., CARON, J., ROY, M., BRIKCI, F. *A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers*, IEEE IPES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin American, Venezuela, 2006.

LANDRY, M., TURCOTTE, O., BRIKCI, F. *A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breakers*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April, 2008.

NIKOLIC, P. G., KURZ, A., EICHHOFF, D., SCHONETTLER, A. *CFD-Simulation As a Tool For Circuit Breaker Diagnostics and Maintenance*, XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.

PARSONS, A. C., GRADY, W. M., POWERS, E. J. *A wavelet-based procedure for automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags*, IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, vol. 2, pp. 1310- 1315, 31 Jan-4 Feb 1999.

POIRIER, S., PATER, R., DOCHE, R. *A Non-Intrusive Diagnostic Approach to Prevent Circuit-Breaker Critical Failures*, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Japan, 6-11 September 2010.

SILVA, K. M. *Diagnóstico de Falhas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2005.

SILVA, K. M. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2009.

STANISIC, Z., NEIMANIS, R. *A new ultra lightweight method for Static and dynamic resistance measurements*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010, pp. 1-4, 6-9 June 2010.

SUN, L., LIU, M., QIAN, H., ZHEN, J. *A New Method to Fault Diagnosis for Circuit Breakers Based on Characteristic Entropy of Wavelet Packet*, 2011 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), vol.2, pp.838-841, 13-14 Oct. 2011.

SWEETSER, C., BERGMAN, W. J., MONTILLET, G., MANNARINO, A., O'DONNELL, E. J., LONG, R.W., NELSON, J., GAVAZZA, R., JACKSON, R. *Strategies for selecting monitoring of circuit breakers*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 3, pp. 742-746, July 2002.

WALKER, J. S. *A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications*, 2nd Ed. New York: Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2008.

WASILEWKI, F. Wavelet Properties Browser; 2008 [acessado em 22/05/2012]. Disponível em <<http://wavelets.pybytes.com/>>.

ZHANG, X., GOCKENBACH, E. *Life Estimation Of High Voltage SF6 Circuit Breakers*, XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.

## **ANEXOS**

## FORMAS DE ONDA DAS *WAVELETS* MÃE UTILIZADAS

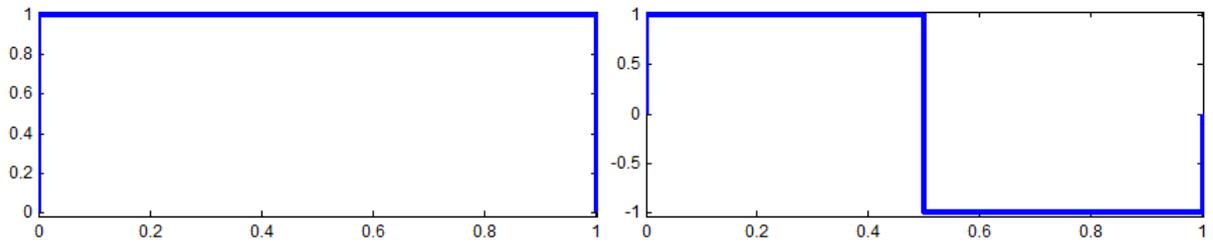


Figura A.1: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Haar.

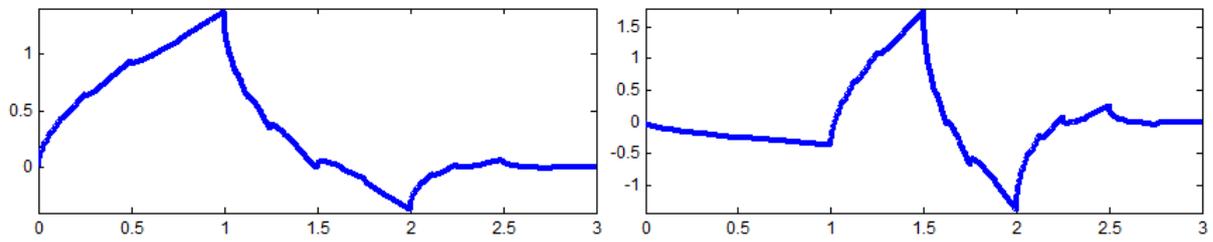


Figura A.2: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Daubechies 4.

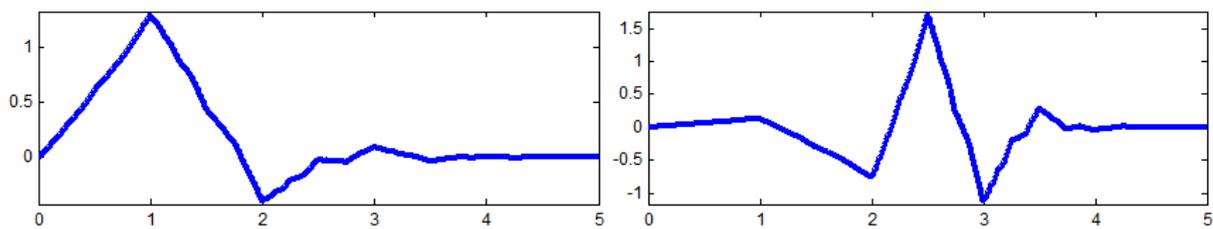


Figura A.3: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Daubechies 6.

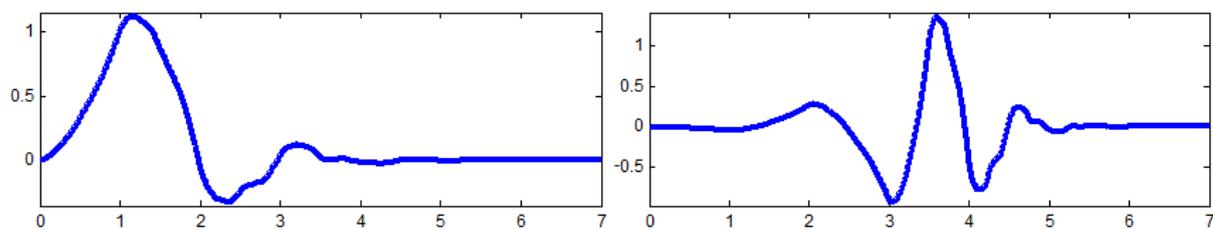
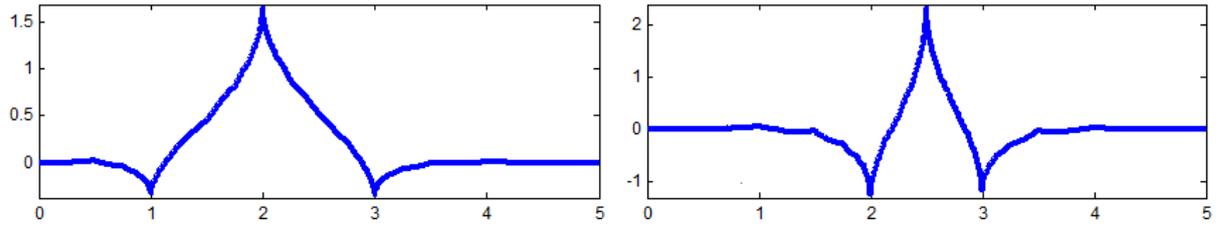
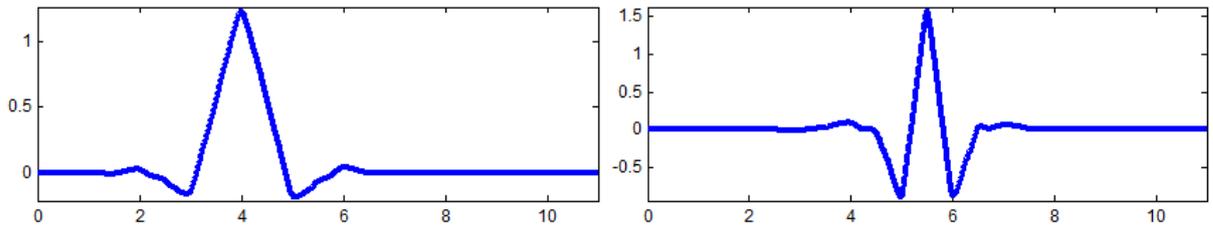
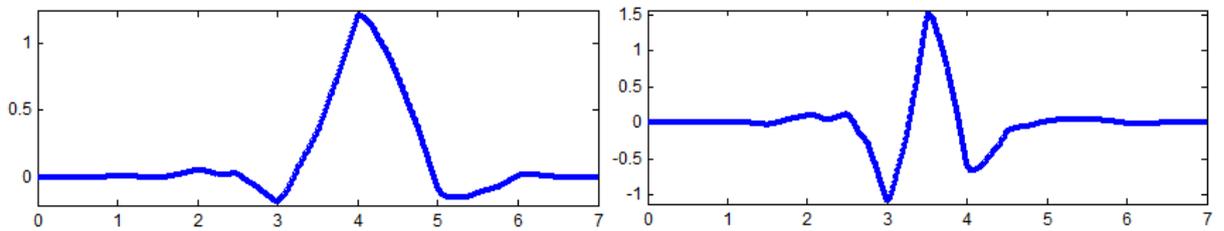


Figura A.4: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Daubechies 8.

Figura A.5: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Coiflet 6.Figura A.6: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Coiflet 12.Figura A.7: Função Escala e Função *Wavelet* da *Wavelet* Mãe Symlet 8.

## TRABALHO PUBLICADO

Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012

Resistência Dinâmica de Disjuntores – Transformada *Wavelet* Aplicada à Tomada de Decisão

Autores: Felipe Nóbrega de Castro, Tarso Ferreira Vilela, Edson Guedes da Costa, Vladimir Cesarino de Souza.