



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

WALLYSSON DE VASCONCELOS SOUSA

DIAGNÓSTICO DE DISJUNTORES:
APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA *WAVELET* A SINAIS REAIS DE
RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2016

WALLYSSON DE VASCONCELOS SOUSA

DIAGNÓSTICO DE DISJUNTORES:
APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA *WAVELET* A SINAIS REAIS DE
RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO

*Dissertação de mestrado submetida à Coordenação
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários para
a obtenção do grau de Mestre em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Orientador:

Professor Francisco Marcos de Assis, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725d Sousa, Wallysson de Vasconcelos.
Diagnóstico de disjuntores : aplicação da transformada *Wavelet* a sinais reais de resistência dinâmica de contato. – Campina Grande, 2016.
87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.

"Orientação: Prof. D. Sc. Francisco Marcos de Assis."

Referências.

1. Disjuntores.
2. Resistência Dinâmica de Contato.
3. Transformada *Wavelet*. I. Assis, Francisco Marcos de.
II. Título.


CDU 620.316.57(043)

**"DIAGNÓSTICO DE DISJUNTORES: APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET A
SINAIS REAIS DE RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO"**

WALLYSSON DE VASCONCELOS SOUSA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/03/2016


FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG
Orientador(a)


HELDER ALVES PEREIRA, Dr., UFCG
Examinador(a)


TARSO VILELA FERRÉIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*À minha amada mãe, Maria Aparecida, ao meu pai Eliezer,
ao meu filho Breno e minha esposa Walda,
que me deram condições de poder realizar esse sonho,
DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir esse trabalho.

Aos meus pais Eliezer e Aparecida pelo amor, carinho, dedicação, compreensão, oportunidades, paciência. Enfim, meus pais sem dúvida nenhuma são merecedores e grandes responsáveis por essa vitória.

Agradeço à minha irmã Wilma por todos os momentos de apoio, carinho na construção desse sonho e confiança depositada em mim.

Agradeço à minha esposa Walda por ter me dado apoio, em todas as horas, em todos os bons e maus momentos, esteve sempre ao meu lado, me passando tranquilidade e torcendo por mim, e acreditando que eu seria vitorioso.

Ao meu filho Breno, que apesar da pouca idade, representa muito em minha vida. Posso dizer que é a minha fonte de inspiração.

Ao professor Tarso Vilela Ferreira e ao Professor Francisco Marcos de Assis pela orientação, pela amizade, pelo incentivo e confiança em mim depositada.

Ao professor Adriano Costa de Oliveira pela parceria e pela contribuição para meu desenvolvimento acadêmico.

A todos os funcionários do Laboratório de Alta Tensão pela ajuda com a realização dos experimentos.

Aos diversos amigos da graduação e pós-graduação pelo companheirismo.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

*" Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água
no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota."*

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

O objetivo desse trabalho é propor uma técnica de classificação do grau de degradação dos contatos de disjuntores que possibilite a indicação do seu estado de operação, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de intervenções e, dessa maneira, contribuir para a redução das interrupções. A medição de resistência dinâmica é uma técnica de diagnóstico utilizada para avaliar tal degradação. A mesma se mostra capaz de analisar tanto os contatos principais como os de arco. Todos os testes realizados para esta dissertação utilizaram curvas de Medição de Resistência Dinâmica geradas com redução da velocidade de abertura dos contatos, além de vários níveis de corrente de teste. Para realização dos ensaios, adotou-se um sistema alternativo de medição, que consiste em um osciloscópio digital, uma bateria estacionária, sensores de tensão e corrente e resistores de cromo-alumínio-ferro. O sistema é capaz de determinar os valores da resistência, desde o início da abertura dos contatos até a sua total separação, permitindo a aplicação de uma corrente de teste de até 300 A. Para reduzir a velocidade de abertura dos contatos, foi concebido um sistema constituído por um redutor de velocidade acoplado a um motor assíncrono, o qual foi acionado através de um inversor de frequência. A classificação da degradação dos contatos foi feita nesse trabalho utilizando Transformada *Wavelet*. Os resultados obtidos com uso da Transformada *Wavelet* foram comparados àqueles utilizando como critério o conhecimento prévio do grau de degradação de cada amostra. Pela análise dos resultados obtidos, evidencia-se a *Wavelet* Coiflet 6 como a mais apta para a classificação do estado de degradação dos contatos de disjuntores de alta tensão.

Palavras-chave: Disjuntores, Resistência Dinâmica de Contato, Transformada *Wavelet*.

ABSTRACT

The objective of this work is to propose a classification technique for contact degradation level of circuit breakers, providing an indication of their operation status, in order to determine the most appropriate time to carry out interventions and, thereby, contributing to reduce interruptions. The dynamic resistance measurement (DRM) is a diagnostic technique used to evaluate this degradation. The same is shown capable of analyzing both the main and arcing contacts. All tests performed for this thesis used DRM curves generated with reduced contact opening speed, and various test current levels. For the tests, an alternative measurement system was adopted, consisting of a digital oscilloscope, a stationary battery, voltage and current sensors and chrome-aluminum-iron resistors. The system is able to determine the resistance values since the beginning of the contact opening process until its total separation, allowing the application of a test current up to 300 A. To reduce the contact opening speed, a new system was designed, which consists of a speed reducer coupled to an asynchronous motor, which is controlled through a frequency converter. The classification of the contact degradation level was done in this work using *Wavelet* transform. The results obtained using the *Wavelet* transform were compared to those using as a criterion the prior knowledge of each sample degradation level. The results analysis highlights the Coiflet 6 *Wavelet* as the most suitable for the classification of contact degradation level of high voltage circuit breakers.

Keywords: circuit breakers, dynamic resistance measurement, *Wavelet* Transform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ilustração de um disjuntor tipo PVO.	22
Figura 2.2: Ilustração disjuntor a vácuo de média tensão.	25
Figura 2.3: Ilustração de Disjuntores à óleo do tipo PVO e GVO.	27
Figura 2.4: Ilustração da câmara de extinção de arco disjuntor SF ₆	29
Figura 2.5: Ilustração de um Esquema de medição da resistência estática de contato em disjuntores.....	34
Figura 2.6: Perfil da curva da resistência dinâmica versus deslocamento ou tempo de abertura dos contatos de disjuntores.	36
Figura 2.7: Ilustração com exemplos de <i>Wavelets</i> com diferentes escalas e deslocamentos ...	39
Figura 2.8: Ilustração com exemplos de <i>Wavelets</i> com diferentes escalas e deslocamentos ...	39
Figura 2.9: Ilustração com exemplos de <i>Wavelets</i> com diferentes escalas e deslocamentos ...	42
Figura 2.10. Resposta em frequência dos filtros escala e <i>Wavelet</i> da Daubechies 4: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.	43
Figura 4.1: Fotografia do disjuntor Siemens.	52
Figura 4.2: Amostras de contato fixo do disjuntor SIEMENS.	52
Figura 4.3: Amostras de contato móvel do disjuntor SIEMENS.	53
Figura 4.4: Circuito do sistema utilizado no ensaio da resistência de contato.	54
Figura 4.5: Ilustração do arranjo adotado para ensaios de MRD.	55
Figura 4.6: Arranjo experimental utilizado nos ensaios de MRD.	56
Figura 4.7: Sistema de redução/controle de velocidade de abertura dos contatos.	56
Figura 4.8: Circuito auxiliar para gatilhamento do osciloscópio.	57
Figura 5.1: Curva de MRD amostra X com injeção de 100 A e tempo 21 ms.....	60
Figura 5.2: Curva de MRD amostra Y com injeção de 100 A e tempo 21 ms.....	61
Figura 5.3: Curva de MRD amostra Z com injeção de 100 A e tempo 21 ms.	61
Figura 5.4: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> HAAR Amostra X (Aproximação 3º nível).	62
Figura 5.5: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> HAAR Amostra X (Detalhes).....	62
Figura 5.6: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> HAAR Amostra Y (Aproximação 3º nível).	63

Figura 5.7: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> HAAR Amostra X (Detalhes).....	63
Figura 5.8: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> HAAR Amostra Z (Aproximação 3º nível).	64
Figura 5.9: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> HAAR Amostra X (Detalhes).....	64
Figura 5.10: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 1º nível de decomposição (Família Haar);	65
Figura 5.11: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 2º nível de decomposição (Família Haar);	65
Figura 5.12: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 3º nível de decomposição (Família Haar);	66
Figura 5.13 Curva de MRD amostra X com injeção de 300 A e tempo 160 ms.	67
Figura 5.14: Curva de MRD amostra Y com injeção de 300 A e tempo 160 ms.	67
Figura 5.15: Curva de MRD amostra Z com injeção de 300 A e tempo 160 ms.	68
Figura 5.16: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> Daubechies 6 Amostra X (Aproximação 3º nível).....	68
Figura 5.17: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> Daubechies 6 Amostra X (Detalhes).....	69
Figura 5.18: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> Daubechies 6 Amostra Y (Aproximação 3º nível).....	69
Figura 5.19: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> Daubechies 6 Amostra Y (Detalhes).....	70
Figura 5.20: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> Daubechies 6 Amostra Z (Aproximação 3º nível).	70
Figura 5.21: Decomposição da Curva MRD utilizando a família <i>Wavelet</i> Daubechies 6 Amostra Z (Detalhes).	71
Figura 5.22: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 1º nível de decomposição (Família <i>Wavelet</i> Daubechies 6);.....	71
Figura 5.23: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 2º nível de decomposição (Família <i>Wavelet</i> Daubechies 6);.....	72
Figura 5.24: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 3º nível de decomposição (Família <i>Wavelet</i> Daubechies 6);.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Síntese da revisão bibliográfica.....	50
Tabela 4.1: Característica do disjuntor de média tensão	51
Tabela 5.1: Percentual de acerto para as famílias <i>Wavelet</i> estudadas	74

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	American National Standards Institute Instituto de Normalização Nacional Americano
CC	Corrente Contínua
GVO	Grande Volume de Óleo
IEC	International Electrotechnical Commission Comissão Internacional de Eletrotécnica
MCD	Medição de Capacitância Dinâmica
MRD	Medição de Resistência Dinâmica
MRE	Medição de Resistência Estática
PVO	Pequeno Volume de Óleo
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitório

SUMÁRIO

Capítulo 1	16
Introdução.....	16
1.1 Motivação.....	18
1.2 Objetivos	19
1.3 Organização do Trabalho	20
Capítulo 2	21
Fundamentação Teórica	21
2.1 Disjuntores de Alta Tensão	21
2.2 Tipos de Disjuntores.....	23
2.2.1 Disjuntores a SF ₆	23
2.2.2 Disjuntores a vácuo	24
2.2.3 Disjuntores a óleo.....	26
2.2.4 Disjuntores a ar comprimido	27
2.3 Câmaras de Extinção de arco	28
2.4 Manutenção em Disjuntores.....	29
2.4.1 Avaliação do meio isolante	30
2.4.2 Avaliação da parte mecânica.....	31
2.4.3 Avaliação dos contatos.....	32
2.5 Medição da Resistência de Contato em Disjuntores	32
2.5.1 Medição de Resistência Estática de Contato (MRE).....	33
2.5.2 Medição de Resistência Dinâmica de Contato (MRD)	35
2.6 Transformada <i>Wavelet</i>	37
2.6.1 Transformada <i>Wavelet</i> Contínua.....	37
2.6.2 Transformada <i>Wavelet</i> Discreta	40
2.6.3 Análise Multiresolução.....	41
2.6.4 Propriedades da Transformada <i>Wavelet</i>	43
Capítulo 3	46

Revisão Bibliográfica.....	46
3.1 Monitoramento de Disjuntores.....	46
Capítulo 4	51
Material e Métodos.....	51
4.1 Material.....	51
4.2 Métodos.....	54
Capítulo 5	59
Resultados e Análises.....	59
5.1 Análise das curvas da MRD com corrente de 50 A e 100 A.....	60
5.2 Análise das curvas da MRD com corrente de 200 A e 300 A.....	66
Capítulo 6	75
Conclusões.....	75
6.1 Trabalhos Futuros.....	76
Referências	77

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os equipamentos de proteção, de forma geral, devem ser acionados para isolar um circuito no caso de uma falha e/ou falta no sistema, devendo atuar com a maior rapidez possível, antes que os efeitos térmicos e mecânicos causem danos às pessoas ou às instalações elétricas protegidas. No caso dos disjuntores, na condição normal de funcionamento, quando os contatos do dispositivo se encontrarem na posição fechada, a impedância entre as partes deve ser baixa, na ordem de microohms, de forma que as perdas sejam mínimas e, quando os contatos se encontrarem na posição aberta, a impedância deve ser grande o suficiente para que haja a interrupção de passagem de corrente através do dispositivo.

Os disjuntores de alta tensão são equipamentos de proteção eletromecânicos cuja finalidade é conduzir, interromper e restabelecer correntes em um ponto da rede elétrica. Seu acionamento ocorre manualmente, ou automaticamente, através de relés de proteção. Além disso, devem ser mecanicamente capazes de abrir em tempos tão curtos quanto o sistema necessite, geralmente 2 ciclos, de modo a limitar os efeitos de degradação dos seus contatos, bem como para controlar o tempo de duração da falta (GARZON, 2002). O disjuntor em funcionamento apresenta um aspecto bastante peculiar: atua, continuamente, sob tensão e corrente de carga, muitas vezes em ambientes severos em relação à temperatura, à umidade, à poeira e a outras intempéries e, em geral, após longo período submetido a estas condições, é solicitado a operar por razão de uma falta ou mesmo de uma manobra no sistema elétrico (MAMEDE FILHO, 2005).

Quando os contatos de arco se encontrarem degradados, pode ocorrer reignição do arco, ocasionando a diminuição da capacidade de interrupção de corrente do dispositivo. Além disso, pode ocasionar sobreaquecimentos que extrapolem o limite térmico dos disjuntores, causando um desgaste acelerado do equipamento, o que gera o risco de explosões dos equipamentos.

A correta implementação de um monitoramento sistemático bem definido nos circuitos elétricos minimiza a ocorrência de acidentes, reduz as paradas não planejadas e aumenta o tempo médio entre falhas de equipamentos elétricos. A partir disto, é possível reduzir os custos

com reparos e o tempo de inatividade dos equipamentos, além de melhorar a confiabilidade de atuação dos equipamentos.

A avaliação dos contatos de arco, apesar da importância, não é realizada habitualmente pelas empresas. Elas realizam o monitoramento das câmaras de extinção a partir da aplicação periódica da técnica de medição de resistência estática, que é apenas capaz de analisar os contatos principais. Normalmente, os critérios utilizados pelas empresas para determinar a periodicidade em que são realizados ensaios e/ou inspeções para avaliar os disjuntores são o número de manobras e o tempo de serviço do equipamento (ADAM et al, 2007).

No projeto da câmara de interrupção as resistências às solicitações térmicas e mecânicas do arco devem ser previstas, proporcionando, em conjunto com o meio isolante utilizado, condições propícias à extinção do arco elétrico. A alta temperatura, provocada pela formação de arcos elétricos no processo de abertura dos disjuntores, é a principal causa de desgaste nos contatos de disjuntores. Portanto, os contatos de arco, responsáveis pela condução das correntes de arco, são os mais afetados pela alta temperatura (LANDRY et al, 2008; TURCOTTE & GAUTHIER, 2008; LANDRY et al, 2006).

As técnicas de medição de resistência para avaliar o grau de degradação dos contatos dos disjuntores possuem a vantagem de evitar desmontagens desnecessárias, que podem durar semanas. Além do mais, nas etapas de desmontagem e montagem, novos problemas podem ser gerados, como a introdução de impurezas no óleo ou a danificação de juntas de vedação, tornando o equipamento sujeito a falhas de operação e, conseqüentemente, reduzindo sua confiabilidade.

1.1 MOTIVAÇÃO

A medição da resistência estática (MRE) entre os contatos tem sido o parâmetro mais utilizado para avaliar o estado dos contatos do disjuntor. Contudo, a MRE traz informações apenas da condição dos contatos principais, já que é realizada enquanto o disjuntor está na posição fechada. Portanto, a indicação da condição de contatos de arco não estão contempladas por esse método.

Com o objetivo de avaliar os contatos de arco, de maneira a agregar essa informação e tornar as condições operacionais dos contatos de disjuntores mais confiáveis, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para a medição de resistência dinâmica (MRD) em disjuntores de alta tensão. Esta técnica consiste basicamente na determinação da resistência de contato durante a abertura dos contatos e é capaz de avaliar tanto os contatos principais como os de arco (LANDRY et al, 2008; TURCOTTE & GAUTHIER, 2008; LANDRY et al, 2006).

Pesquisas sobre a aplicação da MRD no diagnóstico de disjuntores demonstraram que a técnica é comprovadamente eficiente na avaliação dos contatos principal e de arco nas câmaras de extinção de arco. Apesar disso, a técnica ainda não foi totalmente aceita pelas concessionárias, abrindo espaço para aprimoramentos.

Um modelo conclusivo de análise das curvas de resistência que as correlacione com o estado real dos ainda não foi definido. Portanto, buscando encontrar a melhor forma de analisar os resultados obtidos a partir dos ensaios de MRD, propõe-se, nesta pesquisa, a realização de uma investigação das curvas de resistência obtidas em laboratório, objetivamente do seu comportamento no domínio *Wavelet*, de forma a se obter uma correlação entre as medições realizadas em contatos com diferentes graus de degradação e suas respectivas curvas de MRD (LANDRY et al, 2006; LANDRY et al, 2008).

A habitual manutenção dos equipamentos é planejada e programada com certa periodicidade, sendo alterado no caso de ocorrência de falhas ou detecção de parâmetros anômalos. O uso da MRD possibilita uma melhor avaliação das condições dos contatos e uma maior previsibilidade do tempo ótimo para abertura e manutenção da câmara de extinção dos disjuntores.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho de dissertação tem como objetivo geral o aprimoramento de um método de análise das curvas de resistência dinâmica de contato de disjuntores de média tensão a pequeno volume de óleo (PVO) Siemens 3AC2711-4. O método é baseado no uso da transformada *Wavelet* para facilitar a interpretação das curvas de MRD e determinar de forma confiável a necessidade de inspeção e manutenção da câmara de disjuntores de potência.

Além disso, possui os seguintes objetivos específicos:

- Criar um banco de dados com curvas de MRD reais para realização de análises;
- Analisar as curvas medidas a partir da aplicação da Transformada *Wavelet* (TW) com diversas famílias de *Wavelets*;
- Investigar a família *Wavelet* mais adequada à análise das curvas de MRD;
- Investigar qual nível da decomposição *Wavelet* é mais eficiente;
- Avaliar a viabilidade técnica do uso de TW na análise das curvas de MRD.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma fundamentação teórica sobre disjuntores, descrevendo suas câmaras de extinção de arco, os principais tipos de disjuntores, os procedimentos de manutenção e as técnicas utilizadas para medição de resistência de contato. No Capítulo 3, é apresentada uma revisão bibliográfica descrevendo as principais pesquisas reportadas na literatura que abordam o monitoramento e diagnóstico do estado operativo de disjuntores mediante a aplicação da medição de MRD. No Capítulo 4, são descritos os materiais e os métodos empregados nos ensaios de MRD em laboratório. No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da técnica proposta, bem como a análise desses resultados. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e contribuições, além de propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo, são descritos tópicos relacionados a disjuntores de média e alta tensão, enfocando tipos de disjuntores, características e métodos de monitoramento, com ênfase no monitoramento através da medição de resistência de contato.

2.1 DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

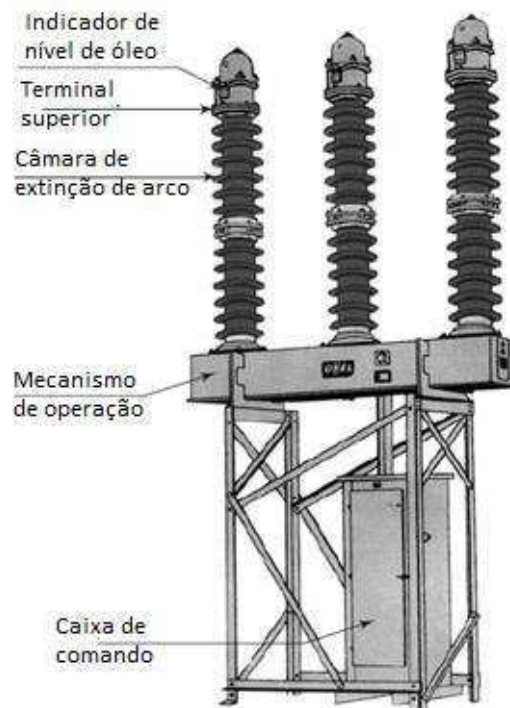
A principal função dos disjuntores é a interrupção de correntes de falhas, em especial as correntes provenientes de curto-circuito na rede elétrica. Esses equipamentos de proteção eletromecânicos devem ser capazes de interromper correntes de falhas no menor tempo possível, independentemente da quantidade de tempo que permaneceram sem operar, de forma a limitar a um mínimo os possíveis danos causados aos equipamentos pelos curtos-circuitos (D'AJUZ et al., 1985). Do mesmo modo, os disjuntores devem ser capazes de estabelecer e interromper a corrente nominal ou inferior, e de isolar trechos da rede elétrica quando na posição aberta (OLIVEIRA, 2015).

Em funcionamento no sistema, os disjuntores devem conduzir a corrente de carga sem que ocorra aquecimento excessivo, tal exigência é cumprida pelo projeto adequado dos contatos principais do disjuntor. Quando os contatos do disjuntor se encontram na posição fechada, eles devem apresentar entre si uma impedância muito pequena, da ordem de microohms, e quando se encontram na posição aberta, uma impedância extremamente elevada, idealmente com um valor infinito. O disjuntor deve ser capaz de alterar o seu estado de fechado para aberto ou vice-versa a partir de quaisquer condições do circuito, a uma taxa de variação da impedância compatível com os parâmetros do circuito. Se a taxa de variação da impedância ocorre em um tempo relativamente longo, a comutação envolve uma energia térmica considerável, no qual o disjuntor deverá absorver e dissipar, tornando o dispositivo maior e mais oneroso (FLURSCHEIM, 2008).

A função de proteção do sistema, desempenhada pelos disjuntores, implica em altos esforços mecânicos e dielétricos durante suas operações de abertura e fechamento. A separação dos contatos principais, durante uma operação de abertura para interrupção de corrente, sucede a formação de um arco no espaço entre os contatos (BHEL, 2006). Os contatos responsáveis pela condução de corrente durante o arco são os contatos de arco que são feitos de materiais resistentes ao arco.

Na Figura 2.1 é apresentada uma ilustração de um disjuntor tripolar a pequeno volume de óleo (PVO) (BHEL 2006).

Figura 2.1: Ilustração de um disjuntor tipo PVO.



Fonte: (BHEL, 2006).

Os disjuntores em operação devem satisfazer as seguintes condições (FRONTIN, 2013):

- Abrir e fechar o circuito no menor tempo possível;
- Conduzir e suportar termicamente a corrente de carga do sistema;
- Suportar térmica e mecanicamente a corrente de curto-circuito do sistema por um determinado tempo, de acordo com as especificações do fabricante;
- Isolar a tensão do sistema, em relação à terra e entre seus polos;
- Ser compacto, com adequada resistência mecânica, de modo a suportar as vibrações ocasionadas nas operações de fechamento e abertura.

A necessidade de realizar todas essas tarefas de forma absolutamente confiável para evitar danos aos demais equipamentos, inclui os disjuntores entre os equipamentos de maior complexidade instalados nas subestações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (FRONTIN, 2013).

Os disjuntores de alta tensão são constituídos por três componentes principais (NASRALLAH et al., 2007a):

- Câmara de extinção: compartimento vedado do disjuntor que envolve os contatos elétricos, o meio extintor e isolante (ar comprimido, óleo, gás SF₆, vácuo), e também é onde acontece o isolamento e extinção de arco elétrico;
- Mecanismo de acionamento: sistema mecânico composto por molas, mecanismo pneumático ou hidráulico, que fornece a energia necessária para fechar e abrir os contatos do disjuntor. Pode ser acionado de forma manual com o uso de manoplas ou através de atuadores elétricos;
- Circuito de controle: sistema elétrico, interligado com relés de proteção, com acionamento local e/ou remoto, responsável pelas ações de comando para as operações de fechamento e abertura dos contatos do disjuntor.

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).

2.2 TIPOS DE DISJUNTORES

Os disjuntores são classificados de acordo com o princípio utilizado para interromper os arcos elétricos nas suas câmaras de extinção. Historicamente, os primeiros disjuntores a serem usados foram os de interrupção ao ar livre (CARVALHO et al., 1995).

2.2.1 DISJUNTORES A SF₆

O hexafluoreto de enxofre (SF₆) é um gás isolante, inerte, não inflamável, não corrosivo, não venenoso, incolor e inodoro e que possui ótimas propriedades refrigerantes. Tais

características o torna ideal para a fabricação de equipamentos elétricos de alta capacidade e desempenho.

Ele tem um peso molecular de 146,06 (cerca de 5 vezes mais pesado que o ar) e é um dos mais pesados gases conhecido. Além disso, é um excelente dielétrico gasoso que, sob condições semelhantes, tem mais que o dobro da capacidade dielétrica do ar. A 3 atm de pressão, tem aproximadamente a mesma rigidez dielétrica de óleo. Tem ainda como vantagem, o fato de conservar a maior parte das suas propriedades dielétricas mesmo quando misturado com proporções substanciais de ar (GARZON, 2002).

A característica fundamental do SF₆, que lhe permite sua utilização como gás isolante é a sua alta eletronegatividade, ou seja, sua capacidade de absorver elétrons livres de modo a formar íons negativos, o que dificulta o processo de ionização formador dos arcos elétricos. Requerem ainda um número menor de manutenções em relação a outros tipos pois os componentes em que o gás se decompõe durante as interrupções de corrente não são condutores (D'AJUZ et al, 1985).

Os disjuntores a SF₆ também apresentam algumas desvantagens, como o maior custo do gás e do sistema de monitoramento de pressão, indispensável para garantir que o mesmo mantenha o nível de rigidez dielétrica desejável. Além disso, o fato de que as moléculas do gás se encontram mais próximas, devido à compressão do SF₆, faz com que as frequências de oscilação relacionadas aos fenômenos transitórios durante a operação do disjuntor, ou seja, a tensão de restabelecimento transitória (TRT), sejam mais elevadas (FRONTIM et al, 2013).

2.2.2 DISJUNTORES A VÁCUO

No disjuntor a vácuo, a abertura dos contatos do interruptor ocorre no interior de uma ampola onde se fez um elevado nível de vácuo. Em isolamento elétrica, admite-se condição de vácuo a pressão da ordem de 10⁻³ a 10⁻⁸ torr (GARZON, 2002); 10⁻⁵ a 10⁻⁷ torr (STEWART, 2004); 10⁻³ a 10⁻⁶ Torr (NAIDU; KAMARAJU, 2009).

Para esse tipo de disjuntor, a ampola a vácuo funciona como uma câmara de extinção do arco, onde os contatos fixo e móvel são montados no interior da câmara à vácuo.

A teoria de Townsend versa que, o processo de formação de ruptura em determinado espaço depende da movimentação de partículas carregadas. Embora a expressão *arco voltaico no vácuo* a princípio pareça contraditória, visto que para a existência de arco, presume-se a existência de íons positivos e elétrons que lhe sirvam de caminho, e no vácuo não existem em

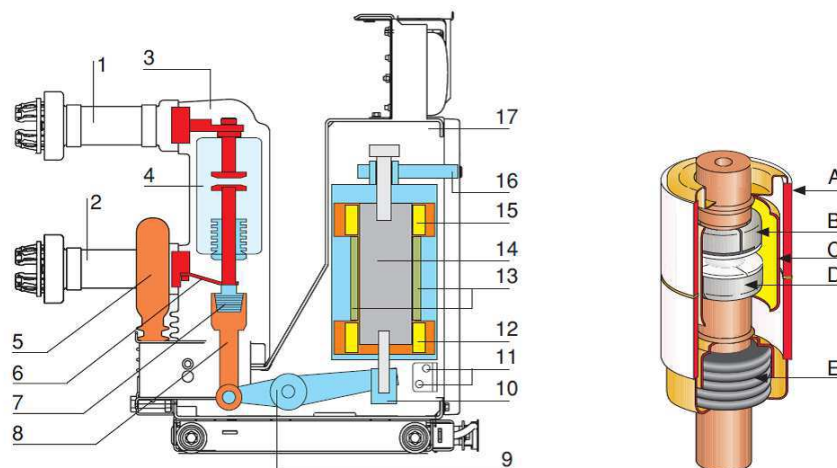
princípio essas partículas. No entanto, na prática, uma tensão suficientemente elevada pode provocar uma ruptura (BRAITHWAITE, 2000). No caso de disjuntores a vácuo, os íons positivos e elétrons são fornecidos pela nuvem de partículas metálicas provenientes da evaporação dos contatos formadas durante o processo de abertura dos contatos (BHEL, 2007).

Mesmo assim, a duração dos arcos é muito pequena, visto que a intensidade da nuvem de vapor metálico é proporcional à intensidade da corrente de arco, desse modo, correntes de baixa intensidade não são suficientes para manter a descarga, sendo interrompidas antes da passagem por zero (MAMEDE FILHO, 2005).

Disjuntores a vácuo vêm sendo utilizados cada vez mais em sistemas de média tensão, e até mesmo, em alguns casos, em sistemas acima de 52 kV.

Na Figura 2.2(a) é apresentada a ilustração de um disjuntor a vácuo de média tensão (ABB, 2009), utilizado em painéis elétricos, sendo: 1 - Terminal superior; 2 - Terminal inferior; 3 - Polo em resina; 4 - Ampola a vácuo; 5 - Sensor de corrente; 6 - Conexão exível; 7 - Mola de pressão dos contatos; 8 - Biela isolante; 9 - Eixo de transmissão; 10 - Regulador do curso; 11 - Sensores de posição; 12 - Bobina de fechamento; 13 - Ímãs permanentes; 14 - Gancho móvel; 15 - Bobina de abertura; 16 - Dispositivo manual de abertura de emergência; 17 - Estrutura de suporte. Na Figura 2.2(b) é apresentada a ilustração de uma ampola a vácuo (SCHNEIDER, 2014), com detalhes dos principais componentes, sendo: A. Câmara cerâmica; B. Blindagem; C. Contato fixo; D. Contato móvel; E. Fole metálico.

Figura 2.2: Ilustração disjuntor a vácuo de média tensão.



(a) Disjuntor a vácuo.

(b) Componentes do interruptor a vácuo.

Fonte: (a) (ABB, 2009), (b) (SCHNEIDER, 2014).

2.2.3 DISJUNTORES A ÓLEO

Nos disjuntores a óleo, os contatos fixo e móvel ficam imersos em óleo mineral isolante, óleo naftênico ou parafínico. A câmara de extinção fica preenchida pelo óleo que possui duas funções: extinção dos arcos elétricos e isolamento entre as partes energizadas e o tanque (FLURSCHEIM, 2008).

O óleo mineral é usado no sentido de extinguir o arco elétrico de duas formas: alongando o arco através de um defletor, permitindo extinção do arco, quando a corrente passa pelo zero, e promovendo o resfriamento do arco.

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 deionizar o dielétrico, resfriar e alongar o arco. São utilizados dois tipos de câmaras de extinção: câmaras de sopro transversal e câmaras de sopro axial (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.

Devido à decomposição do óleo isolante, produz-se resíduos condutores à base de carbono, comprometendo suas características dielétricas. Dessa maneira, o óleo precisa ser recuperado após determinado número de interrupções de curto-circuito. Além disso, a fim de evitar o acúmulo desses resíduos próximo aos contatos, as câmaras de extinção de disjuntores a óleo não devem ser instaladas na posição horizontal (OLIVEIRA 2015).

Os disjuntores a óleo são divididos em duas categorias:

- Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO)
- Disjuntores a grande volume de óleo (GVO)

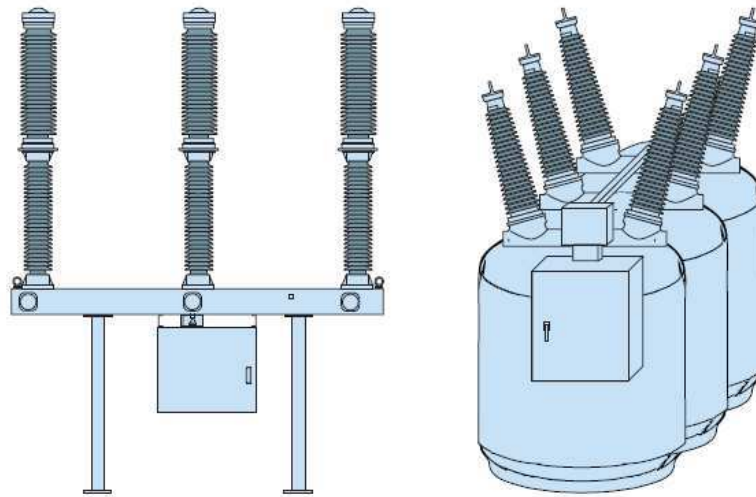
Os disjuntores do tipo GVO são utilizados para todos os níveis de tensão entre 1 kV e 330 kV. (BHEL, 2007). Nos disjuntores do tipo GVO, há duas configurações, tanque simples, com os contatos dos três polos instalados no interior de um único recipiente contendo uma grande quantidade de óleo mineral isolante, ou com três tanques, em que cada tanque é utilizado individualmente para cada polo (MCDONALD, 2012).

Os disjuntores PVO foram projetados como uma evolução dos disjuntores GVO, onde o volume de óleo foi consideravelmente reduzido e as câmaras de extinção projetadas com

sistemas de fluxo de óleo forçado, aumentando a eficiência no processo de interrupção de corrente. São relativamente leves e compactos, de fácil manutenção e usualmente são utilizados em sistemas de média tensão.

Na Figura 2.3 são apresentadas ilustrações de disjuntores do tipo PVO e GVO Siemens.

Figura 2.3: Ilustração de Disjuntores à óleo do tipo PVO e GVO.



(a) Disjuntor PVO.

(b) Disjuntor GVO.

Fonte: (a) (SIEMENS, 2006), (b) adaptado (SIEMENS, 2006).

2.2.4 DISJUNTORES A AR COMPRIMIDO

Os disjuntores a ar comprimido utilizam o ar tanto para a extinção dos arcos elétricos como para a isolamento interno do disjuntor. Nos disjuntores a ar comprimido, as câmaras de extinção de arco são pressurizadas com ar a pressão acima de 30 bar (KOLLER et al., 2012), enquanto nos reservatórios que fornecem o ar comprimido para a extinção do arco, a pressão é de cerca de 200 bar (MAMEDE-FILHO, 2005).

Um jato de ar, com velocidade proporcional à pressão em que é mantido, é propelido na direção do arco elétrico (em geral, transversalmente), promovendo a extinção do arco a partir do seu resfriamento. Em alguns casos, o ar também é utilizado como mecanismo de acionamento dos contatos (CARVALHO *et al.*, 1995).

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.

Os disjuntores a ar comprimido possuem um reservatório que fornece o ar para a extinção de arco, onde o ar é mantido a uma pressão de aproximadamente cinco ou seis vezes maior que a pressão do ar no interior da câmara de extinção de arco. Como vantagem, pode-se citar que o próprio ar é utilizado como mecanismo de extinção de arcos, com isso a poluição no interior da câmara de extinção é baixa. Assim sendo, disjuntores a ar comprimido demandam pouca manutenção. Entretanto, um sistema de monitoramento do sistema de compressão de ar deve ser montado para garantir que a isolamento e a capacidade de interrupção de corrente não sejam comprometidas (GREMMEL, 2002; D'AJUZ *et al*, 1985).

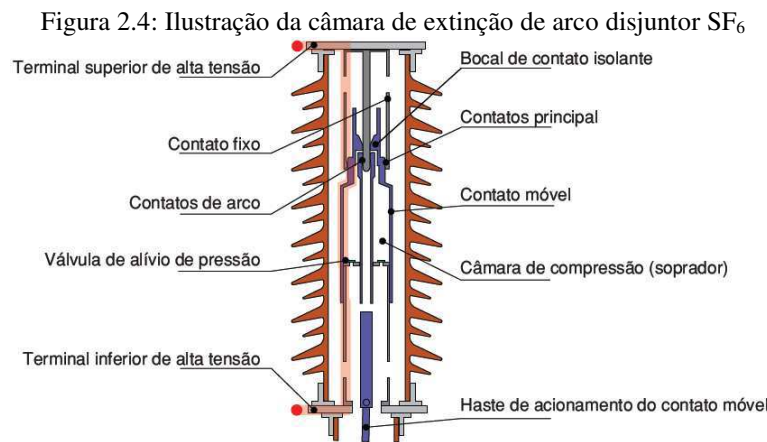
Nos disjuntores um sopro de ar inicia-se pela abertura das válvulas de sopro para a atmosfera, provocando um fluxo de ar comprimido no interior das câmaras. O fluxo de ar na região entre os contatos resfria e alonga o arco (CARVALHO *et al.*, 1995).

2.3 CÂMARAS DE EXTINÇÃO DE ARCO

A câmara de extinção é um compartimento do disjuntor que envolve os contatos fixo e móvel, responsáveis pela condução da corrente elétrica, bem como o meio isolante utilizado para a extinção do arco elétrico e o isolamento entre os polos e a carcaça (OLIVEIRA, 2015).

O fechamento entre os polos (lado fonte e lado carga) do disjuntor ocorre no interior da câmara de extinção. O contato principal é responsável pela condução da corrente de carga, em condições normais de operação, bem como da corrente de sobrecarga e curto-circuito, até que ocorra a separação galvânica entre os contatos principais, durante a operação de abertura dos contatos para seccionamento do circuito (LANDRY *et al.*, 2006). O contato de arco é responsável pela condução da corrente de arco, quando os contatos se encontram galvanicamente separados, até a extinção total do arco elétrico (LANDRY *et al.*, 2006).

Na Figura 2.4 é apresentada a ilustração de uma câmara de extinção para um disjuntor SF₆, tipo dupla pressão (ABB, 2013).



Fonte: (ABB, 2013).

Nas operações de interrupção de corrente, uma tensão de alta frequência (na ordem de kHz) surge entre os contatos do disjuntor, denominada de tensão de restabelecimento transitória (TRT), que pode atingir valores de pico várias vezes superiores a tensão do sistema em que o disjuntor está operando (BOJIC' et al., 2013).

A geometria dos contatos móveis geralmente é construída em forma de haste sólida, que pode ser oca ou não, que se desloca durante a abertura e fechamento. O contato fixo, que permanece imóvel, é formado por uma carcaça cilíndrica com dedos de contato, que têm por objetivo melhorar o contato galvânico entre os contatos fixo e móvel, sendo a pressão em cada dedo do contato exercida por molas. Para evitar a queima excessiva dos dedos de contato durante o arco elétrico, o contato fixo é formado por um anel de arco (NASRALLAH et al., 2007a).

2.4 MANUTENÇÃO EM DISJUNTORES

Os disjuntores, como qualquer outro equipamento do sistema elétrico, começam a sofrer com a deterioração dos seus componentes tão logo o equipamento é instalado e colocado em operação. Se tal deterioração não é monitorada ou sua manutenção é negligenciada, ela pode atingir níveis que podem ocasionar falhas elétricas e avarias no próprio disjuntor e/ou nos equipamentos protegidos por ele.

A função da manutenção é assegurar aos equipamentos um elevado grau de disponibilidade e confiabilidade durante o desempenho de suas funções no sistema. Entende-se por manutenção o conjunto de ações que se realiza direta ou indiretamente em um sistema ou

equipamento, com a finalidade de verificar, manter ou restabelecer as condições de cumprir com segurança e eficiência suas funções (CARVALHO et al., 1995).

Os disjuntores devem seguir um padrão de manutenção baseado nos resultados de inspeções e monitoramento, incorporando-se análises estatísticas e experiência heurísticas acumuladas, que podem proporcionar uma vida mais longa de serviços.

O monitoramento deve ser capaz de produzir dados suficientes para o correto diagnóstico do estado do disjuntor, observando tanto a parte elétrica como a parte mecânica. Durante as inspeções/manutenções, os seguintes parâmetros são avaliados (GILL, 2008):

- Tempo de fechamento dos contatos;
- Tempo de abertura dos contatos;
- Sincronização de abertura dos contatos;
- Vibração durante as operações de abertura e fechamento;
- Operação dos circuitos de comando;
- Curva de deslocamento dos contatos principal e de arco em função do tempo, durante operações de fechamento e abertura dos contatos;
- Testes dos circuitos de comando.

O monitoramento de um disjuntor em particular é muito dependente da tecnologia incorporada, de sua idade, de detalhes específicos da sua aplicação e dos riscos associados ao sistema de potência para as possíveis falhas do disjuntor (SWEETSER et al., 2002).

O diagnóstico fornecido pelas técnicas de monitoramento, indicam que alguns serviços de manutenção devem ser necessários. Nesse caso, o disjuntor passa por uma rotina de ajustes e/ou reparos, sendo submetido a novos ensaios para verificar se os defeitos foram corrigidos.

De modo geral, as manutenções em disjuntores avaliam três aspectos do equipamento: o meio isolante; a parte mecânica e os contatos. Nas seções seguintes serão descritos os principais testes realizados para avaliar o estado operacional de um disjuntor (SANTOS et al., 2013).

2.4.1 AVALIAÇÃO DO MEIO ISOLANTE

Os disjuntores podem apresentar dois meios dielétricos, o meio isolante e o meio extintor. O meio dielétrico com a função de promover o isolamento entre suas partes energizadas e a terra e entre os polos, e um meio extintor com a função de promover a extinção

dos arcos elétricos. Avaliar a condição do meio isolante é fundamental para que o equipamento tenha um desempenho satisfatório em quaisquer condições de corrente e tensão dentro dos seus limites de projeto.

Em disjuntores, especificamente o meio isolante, geralmente sofre um processo de deterioração relativamente lento, visto que o mesmo é submetido a poucos agentes contaminantes. Já o meio extintor tende a se deteriorar mais rapidamente, devido à contaminação proveniente de gases e subprodutos gerados durante a extinção do arco elétrico.

Os meios isolante e extintor podem, ou não, ser constituídos do mesmo material. Em alguns casos, os disjuntores possuem os meios isolante e extintor separados, com o objetivo de reduzir o tempo de manutenção, visto que apenas a parte do dielétrico deteriorado precisa ser substituída ou tratada (SANTOS, 2013).

Para avaliar o isolamento de disjuntores, os seguintes testes são realizados:

- Testes de rigidez dielétrica do óleo isolante, com o objetivo de aferir a suportabilidade dielétrica do óleo;
- Ensaio de cromatografia de gases, com o objetivo de determinar a concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante;
- Análise físico química, com o objetivo de verificar a presença de agentes contaminantes dentro de uma amostra, como também sua origem e consequência direta ao equipamento;
- Verificação da pressão do gás (SF₆ ou ar comprimido) para impedir seu fechamento ou sua abertura sob pressões inferiores a níveis prefixados.

2.4.2 AVALIAÇÃO DA PARTE MECÂNICA

A parte mecânica do disjuntor exige precauções especiais, pois dela depende o bom desempenho do disjuntor. O sistema de acionamento de um disjuntor tem a incumbência de armazenar e liberar a energia necessária para as suas operações de abertura e fechamento. Dessa forma, a confiabilidade do disjuntor está diretamente relacionada com o estado operativo do seu sistema de acionamento.

A condição mecânica do disjuntor, bem como as partes móveis do equipamento, são avaliadas periodicamente, com intuito de observar se o comportamento mecânico está dentro de limites previamente estabelecidos. Sistemas de acionamento podem ser monopolares ou tripolares. Nos monopolares, o acionamento de cada polo é feito individualmente, mostrando-

se um sistema mais caro e complexo. Em oposição, nos sistemas tripolares, o acionamento dos três polos é efetuado simultaneamente (OLIVEIRA, 2015).

Os principais tipos de sistemas de acionamento são:

- Acionamento por solenoide;
- Acionamento por molas;
- Acionamento a ar comprimido;
- Acionamento hidráulico.

2.4.3 AVALIAÇÃO DOS CONTATOS

Os contatos de um disjuntor são os responsáveis pela condução da corrente elétrica em condições normais e anormais do sistema. Suas geometrias e materiais constituintes devem prever formas a suportar os esforços mecânicos e térmicos gerados pelas operações do disjuntor.

O desgaste dos contatos de disjuntores é algo normal e previsível. Esse processo se dá assim que o equipamento é colocado em operação. Contatos com nível de degradação muito elevado podem comprometer o desempenho do disjuntor, limitar sua capacidade de interrupção de corrente e causar falhas de operação (LANDRY, 2006). Sendo assim, um monitoramento sistemático desses componentes deve ser realizado.

As causas do desgaste de contatos de disjuntores são:

- Atrito entre os contatos;
- Corrente elétrica de carga;
- Arcos elétricos.

Em relação às causas citadas, os arcos elétricos são reconhecidos como a causa mais significativa. A resistência elétrica dos contatos, que idealmente deveria ser zero, vai aumentando à medida que eles vão se desgastando. Por esse motivo, as principais técnicas destinadas a verificar o grau de degradação dos contatos se baseiam na medição de resistência.

2.5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CONTATO EM DISJUNTORES

Os contatos dos disjuntores devem conduzir a corrente de carga sem superaquecimento e sem degradação excessiva e deve fazê-lo dentro de limites razoáveis de consumo de energia,

com uma resistência entre os contatos mantida tão baixa quanto possível (FNINECHE; AITKEN, 2012). Adicionalmente, nas condições de curto-circuito e sobrecarga, os contatos devem ser capazes de conduzir altas correntes por um período específico de tempo e, novamente, eles devem fazê-lo sem superaquecimento e sem degradação excessiva.

A resistência dos contatos, estando com valores atípicos, podem ser um indicativo da existência de algum material estranho na superfície dos contatos, do desgaste excessivo dos contatos, da perda de pressão nos dedos dos contatos ou da perda de conexão das buchas. Qualquer um desses problemas pode ocasionar o surgimento de um ponto quente, o desgaste acelerado dos contatos ou até mesmo a falha do disjuntor.

A seguir são descritas as técnicas de diagnóstico por medição de resistência estática de contato e por medição de resistência dinâmica de contato.

2.5.1 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ESTÁTICA DE CONTATO

O ensaio de medição de resistência de contato é realizado para avaliar a condição do contato principal do disjuntor, e atualmente a Medição de Resistência Estática (MRE) é a técnica utilizada pelas concessionárias de energia como principal parâmetro para tomada de decisões sobre a realização de operações de desmontagem e limpeza.

O ensaio de MRE é implementado com a injeção de um sinal de corrente contínua através dos contatos principais do disjuntor e medindo-se a queda de tensão sobre os mesmos, sem a necessidade de remoção do meio isolante da câmara de extinção de arco (GILL, 2008). A resistência é calculada mediante a aplicação direta da Lei de Ohm.

Como discutido anteriormente, o aumento anormal da resistência entre os contatos principais do disjuntor pode ser uma indicação de material estranho nos contatos, desgaste dos contatos principais, perda de pressão nos dedos dos contatos ou perda de conexão das buchas. Qualquer um desses problemas no disjuntor pode causar o aquecimento localizado ou a deterioração dos contatos (GARZON, 2002).

Nos ensaios de MRE, utiliza-se uma fonte de corrente contínua, a fim de evitar erros na medição da resistência causados por eventuais componentes indutivos no circuito sob teste (STANISIC & NEIMANIS, 2010).

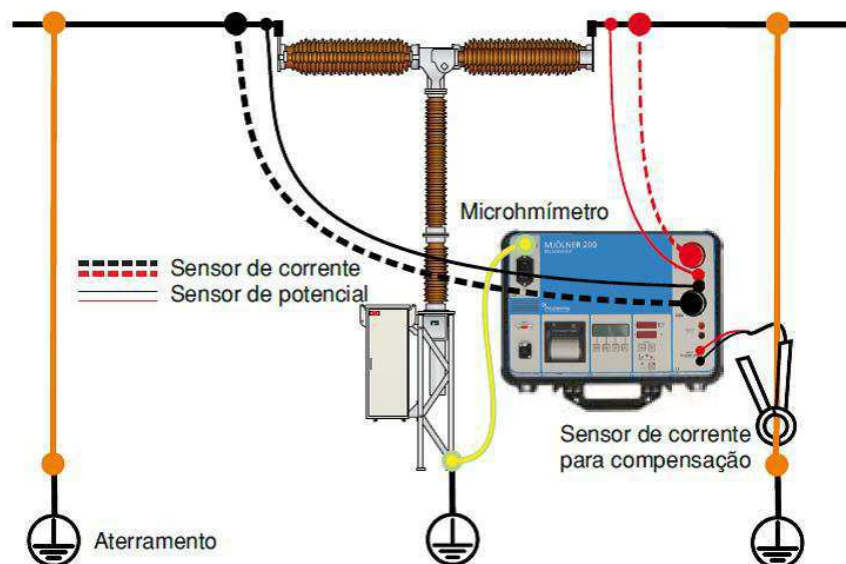
Duas normas padronizam o nível de corrente que deve ser utilizado nos ensaios de resistência de contato. De acordo com a norma IEC 62271-1, a resistência de contato deve ser

medida com uma corrente de teste mínima de 50 A. A norma ANSI C37.09 orienta que a corrente de ensaio deve ser de no mínimo 100 A.

Para a tomada de decisão sobre a substituição ou não dos contatos, os valores obtidos nos ensaios de resistência de contato devem ser comparados entre as três fases do disjuntor sob teste, com valores de disjuntor similar ou ainda com valores recomendados pelo fabricante (GILL, 2008). Usualmente, os ensaios de MRE são realizados com o auxílio de analisadores de disjuntor, que possuem um micro-ohmímetro incorporado. A medição é feita individualmente em cada polo do disjuntor.

Os sensores do micro-ohmímetro são conectados de acordo com a ilustração apresentada na Figura 2.5.

Figura 2.5: Ilustração de um Esquema de medição da resistência estática de contato em disjuntores.



Fonte: (Adaptado (WäCKLÉN et al., 2008), (ABB, 2013)).

A MRE é realizada com os contatos completamente fechados, portanto, só há contato galvânico entre os contatos principais. A técnica só é capaz de avaliar o estado dos contatos principais. Apesar da facilidade de se medir a resistência de contato principal, não é possível obter informações acerca das condições dos contatos de arco do disjuntor com esse ensaio.

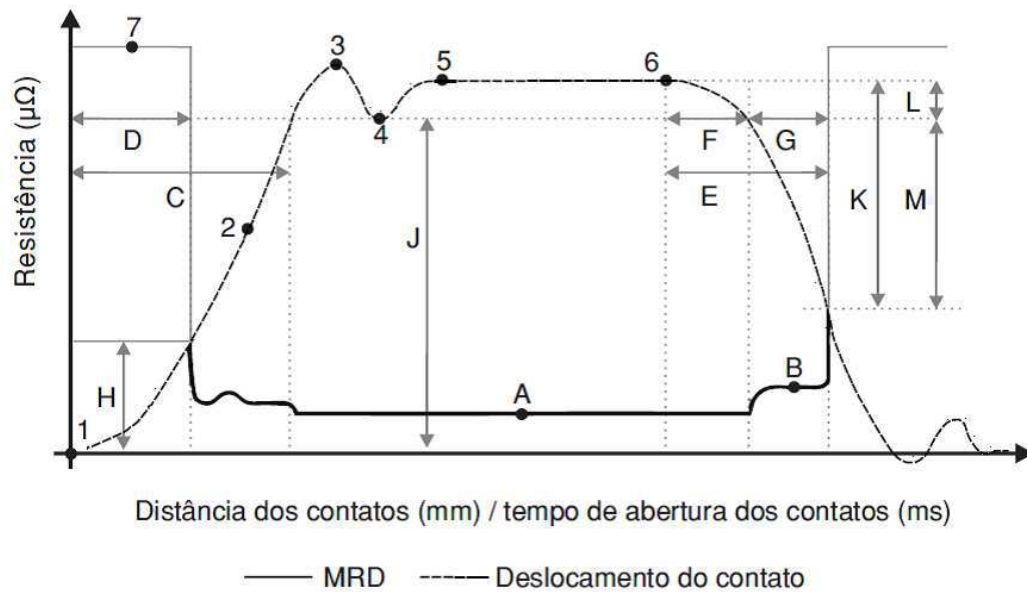
2.5.2 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO

O método de Medição da Resistência Dinâmica de contato (MRD) é a forma alternativa de se obter dados mais concisos para produzir um diagnóstico mais preciso sobre o estado dos contatos de disjuntores, tanto dos contatos principais quanto dos contatos de arco, pesquisas vêm demonstrando que a aplicação da MRD é a técnica mais promissora na avaliação dos contatos de disjuntores de alta tensão.

O ensaio de MRD é semelhante ao ensaio de MRE, com tudo, em vez de se medir apenas um único valor de resistência, a resistência é determinada durante o processo de abertura dos contatos, originando uma curva de resistência R (Ω) em função do tempo de abertura (s) ou da distância dos contatos (mm) (SOUZA, 2014).

Na Figura 2.6 é apresentado o perfil, ou assinatura, de uma curva de resistência dinâmica e a curva de deslocamento do contato móvel em disjuntores. Nas citadas curvas são destacados os parâmetros principais da MRD assim identificados: 1. Início do movimento de fechamento dos contatos; 2. Curva de deslocamento dos contatos móvel (principal e de arco); 3. Ponto de ultrapassagem dos contatos no fechamento (salto mecânico); 4. Ponto de recuo dos contatos no fechamento (salto mecânico); 5. Contatos totalmente fechados; 6. Início do movimento de abertura dos contatos; 7. Configuração da curva de resistência dinâmica; A - Resistência dos contatos principais; B - Resistência dos contatos de arco; C - Intervalo de tempo para fechamento do contato principal; D - Intervalo de tempo para fechamento do contato de arco; E - Intervalo de tempo para abertura total dos contatos; F - Intervalo de tempo para abertura do contato principal; G - Intervalo de tempo para abertura do contato de arco; H - Deslocamento do contato de arco; J - Deslocamento do contato principal; K - Deslocamento para abertura total dos contatos; L - Deslocamento para abertura do contato principal; M - Deslocamento para abertura do contato de arco.

Figura 2.6: Perfil da curva da resistência dinâmica versus deslocamento ou tempo de abertura dos contatos de disjuntores.



Fonte: (CLEGG et al., 1996).

A curva da MRD é formada basicamente por dois patamares. O primeiro patamar, que apresenta menor resistência de contato, se refere à região do contato principal. O segundo patamar, que apresenta uma resistência maior, se refere à região do contato de arco (LANDRY et al., 2006).

A curva de resistência resultante da MRD é obtida com a aplicação de uma corrente contínua de teste através dos contatos. O valor da queda de tensão entre os contatos é então medida simultaneamente durante uma operação de abertura, e então a resistência é calculada pela aplicação direta da lei de Ohm (LANDRY et al., 2006). As curvas de resistência dinâmica permitem a avaliação individual dos contatos principais e de arco.

Pesquisas sobre MRD sugerem que os resultados dos ensaios efetuados com velocidade nominal de abertura dos contatos não se reproduzem de um ensaio para outro, sendo necessária a aplicação de altas correntes ou a redução da velocidade de abertura dos contatos (LANDRY et al., 2008; TURCOTTE & GAUTHIER, 2008; LANDRY et al., 2006).

No ensaio da MRD há a necessidade de movimento entre os contatos fixo e móvel, com isso, a resistência pode ser medida tanto no fechamento quanto na abertura dos contatos do disjuntor (GRIJP et al., 1996). Entretanto, o ensaio da MRD tem sido realizado exclusivamente durante a abertura dos contatos, tendo em vista que durante o fechamento dos contatos, há duas razões principais que comprometem a qualidade dos resultados, assim destacadas (LANDRY et al., 2008):

- Variação abrupta da resistência de contato que alterna de infinito (contatos abertos) para a resistência de contato de arco (centenas de $\mu\Omega$) dificulta a identificação do nível de resistência do contato de arco;
- No momento em que há a conexão galvânica entre os contatos fixo e móvel, o sinal de corrente gera um ruído indesejável, que compromete a medição.

Apesar de ainda não existir um modelo conclusivo de análise das curvas de resistência, pesquisas sobre MRD mostram que é possível correlacionar o padrão das curvas de resistência dinâmica com o estado real dos contatos de disjuntores, mediante a aplicação de técnicas de apoio e bancos de dados, resultando em um diagnóstico mais preciso e eficiente (LANDRY *et al.*, 2006; LANDRY *et al.*, 2008).

2.6 TRANSFORMADA *WAVELET*

Esta seção tem como objetivo principal a apresentação de forma simples e objetiva da teoria básica sobre Transformada *Wavelet* (TW) utilizada para fazer a análise dos resultados obtidos nos ensaios de MRD.

2.6.1 TRANSFORMADA *WAVELET* CONTÍNUA

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 (SILVA, 2009).

Em 1984, Grossman e Morlet propuseram a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) que foi considerada o marco decisivo na história das *Wavelets* (SILVA, 2009).

O termo criado originariamente era *ondellettes*, que significa algo como "ondinhas" e *Wavelets* correspondem a uma versão anglofônica. Qualitativamente, duas características são exigidas para uma função $\psi(\cdot)$, chamada de *Wavelet*-mãe: Oscilação (associada com termo "ondas"); e decaimento rápido no tempo – curta duração (associada com o diminutivo "ondinhas"). Todas as funções usadas como *núcleos da transformação* correspondem a versões comprimidas/expandida de uma mesma onda mãe (OLIVEIRA, 2007).

Uma *Wavelet* tem sua energia concentrada no tempo para dar uma ferramenta de análise de fenômenos transitórios, não-estacionários ou variantes no tempo.

A definição matemática da Transformada *Wavelet* Contínua é dada pela Equação (2.1).

$$TWC(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (2.1)$$

em que $x(t)$ é o sinal analisado; $\psi_{a,b}$ é a *Wavelet* filha; a, b são constantes, e indicam a escala e o deslocamento.

Em contraste ao que é observado com a transformada de Fourier, que utiliza senóides infinitas (ondas longas) em sua análise, as *Wavelets* $\psi(x)$ são ondas de pequeno comprimento e que a área delimitada pela sua curva é zero, de acordo com a Equação 2.2.

Já no domínio da frequência, essa propriedade equivale afirmar que o espectro da *Wavelet* tem valor zero em x igual a zero, de acordo com a Equação 2.3, e considerando como a transformada de Fourier da função (BURROS; GOPINATH; GUO, 1988).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)dx = 0 \quad (2.2)$$

$$\hat{\psi}(0) = 0 \quad (2.3)$$

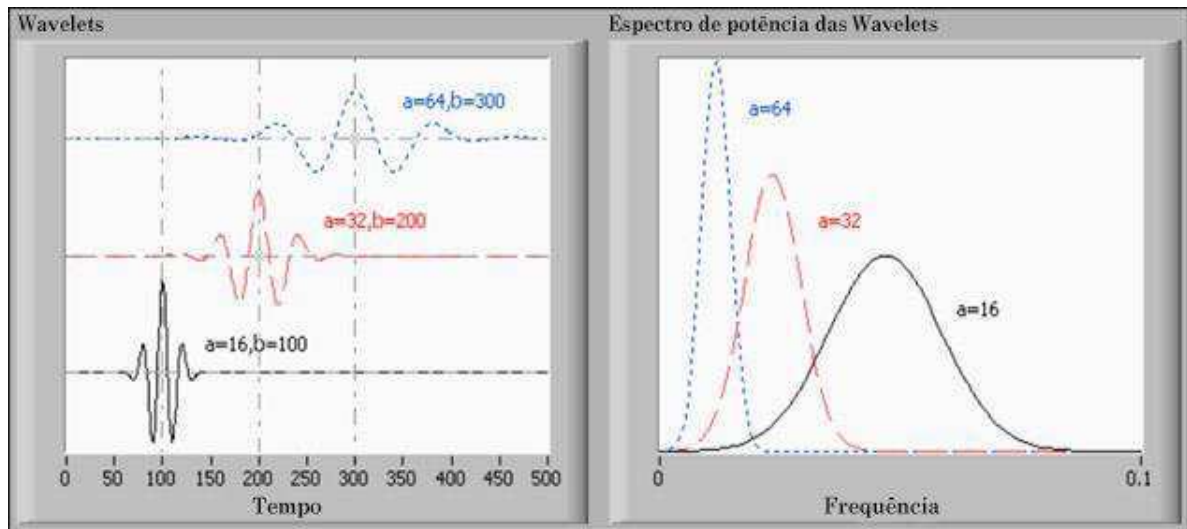
A TWC é definida como o produto interno entre a função original, diga-se $f(t)$, e as *Wavelets* filhas, $\psi_{a,b}(t)$, e pode, ser vista como uma medida de semelhança entre os sinais. Percebe-se que na Equação 1 é realizada uma convolução entre o sinal $x(t)$ e a *Wavelet* $\psi_{a,b}(t)$, portanto seu resultado será proporcional ao grau de similaridade do sinal e a *Wavelet* (RICCIOTTI, 2006).

As *Wavelets* filhas são definidas a partir da *Wavelet* mãe pela equação (2.4):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.4)$$

O termo $\frac{1}{\sqrt{a}}$ assegura que energia é mantida em todas as escalas. As variações de a e b formam a base das funções da transformada. Na Figura 2.7 é ilustrado o efeito da variação da escala e do deslocamento de uma função *Wavelet*.

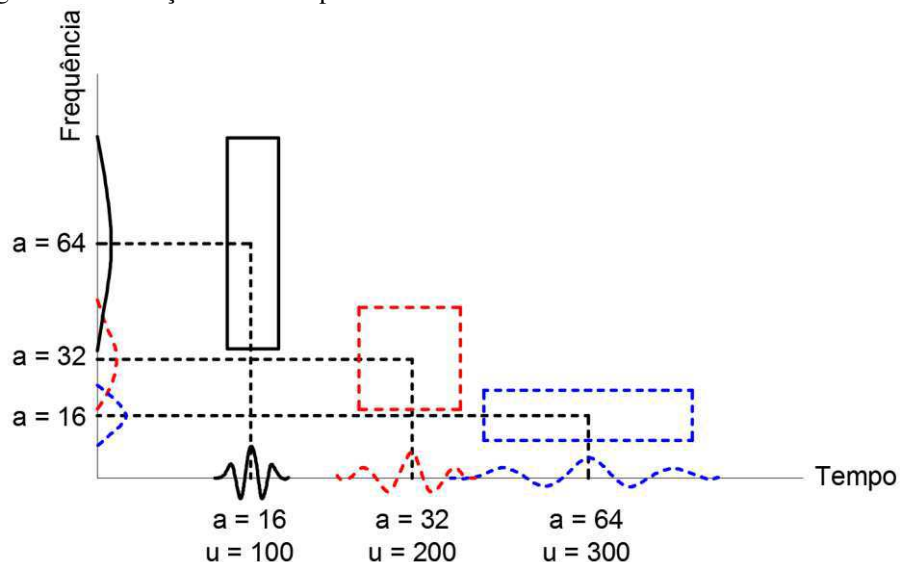
Figura 2.7: Ilustração com exemplos de *Wavelets* com diferentes escalas e deslocamentos



Fonte: Adaptação de: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371419D-01/lvasptconcepts/wa_intro/>. Acesso em: 20 jan. 2016.

Para $a > 0$, o valor de b é inversamente proporcional a frequência da função *Wavelet* mãe (GAO; YAN, 2011). Essa característica é comprovada observando a Figura 2.8, pois é percebido que ao aumentar o valor da escala da *Wavelet* mãe, quando a mesma é dilatada, ou seja, sua frequência é diminuída. No caso oposto, no qual o valor da escala é menor, a função é comprimida, e sua frequência aumenta.

Figura 2.8: Ilustração com exemplos de *Wavelets* com diferentes escalas e deslocamentos



Fonte: Adaptação de: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371419D-01/lvasptconcepts/wa_intro/> Acesso em: 20 jan. 2016.

Dessa observação, pode-se concluir que com o janelamento realizado por uma *Wavelet* mãe com escala maior, ou seja, ela estando na sua forma mais alongada, irá fornecer uma

visualização mais global do sinal, porém com menor precisão. Já com a escala menor, estando a função *Wavelet* mãe na sua forma mais comprimida, a visualização terá maior nível de detalhamento local, entretanto, perde-se informações sobre o comportamento global (OLIVEIRA, 2007b).

2.6.2 TRANSFORMADA *WAVELET* DISCRETA

Para fins de processamento digital, Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) será utilizada. Na prática, a utilização da TWC é impraticável devido à necessidade de se realizar infinitas translações (deslocamentos) e escalonamentos, o que geraria muita redundância e alto grau de esforço computacional (LIRA, 2004).

Na TWD, os fatores de escala e de translação não variam continuamente mas em valores inteiros. Um caso particular dos fatores de escala e translação é da forma dada por (2.5):

$$a = a_0^j \quad b = ka_0^j b_0 \quad (2.5)$$

em que j e $k \in \mathbb{Z}$, $a_0 > 1$, $b_0 > 0$.

A escolha de $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$ é conveniente, pois possibilita a construção das *Wavelets* de modo que o conjunto $\psi_{j,k}(t)$ constitua uma base ortonormal. Tais valores para os fatores de escala e translação implicam a versão discretizada da *Wavelet* filha dada pela equação (2.6):

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (2.6)$$

A construção de bases ortonormais e a implementação da TWD para esse 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).

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) estabelece e é definida matematicamente pela equação (2.7):

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{-\infty}^{\infty} f(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (2.7)$$

2.6.3 ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO

Técnica amplamente utilizada na área de processamento de sinais utiliza filtros com o objetivo de analisar sinais em múltiplas bandas de frequência. 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.

A ideia principal é analisar o sinal a partir da aplicação de dois filtros, passa-baixa e passa-alta, de modo que o espectro do sinal seja dividido ao meio. Bancos de filtros são estruturas que permitem um sinal ser decomposto em subsinais – tipicamente em uma taxa de amostragem mais baixa (BURRUS et al. 1998). Matematicamente, tem-se:

$$c_{j+1}(k) = \sum_n h(n - 2k)c_j(n) \quad (2.8)$$

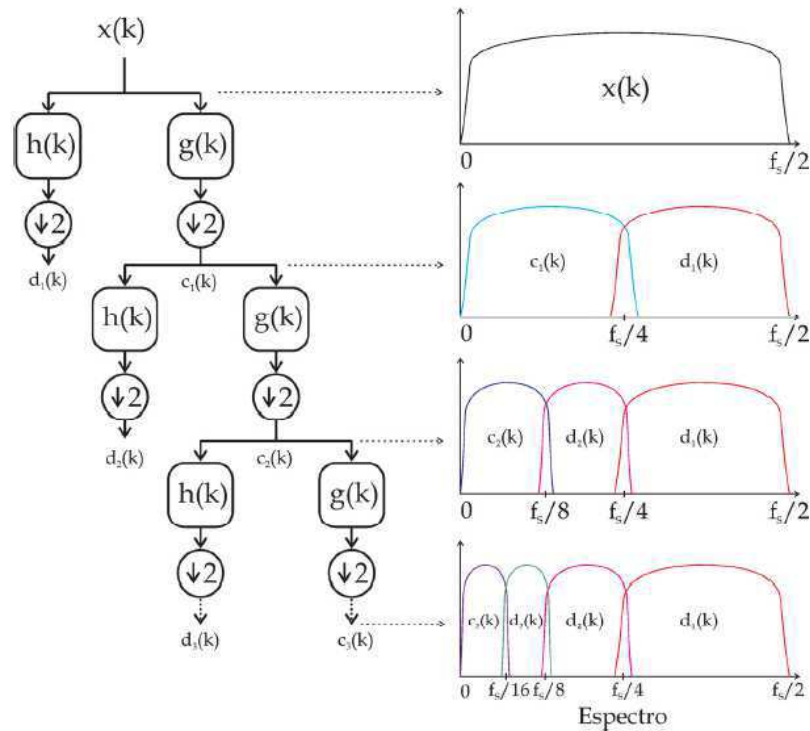
$$d_{j+1}(k) = \sum_n g(n - 2k)c_j(n) \quad (2.9)$$

em que $n = 2k + l$, $l \in \mathbf{Z}$, 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.

A vantagem desse método é a utilização apenas de dois filtros em cada etapa. Dessa forma, pode-se entender que a DWT é similar ao esquema de codificação em sub-banda usando um banco de filtros. Nota-se que após o processamento pelos filtros, a quantidade de amostra dos sinais se reduz à metade.

Os blocos com o símbolo $\downarrow 2$ representam a operação de sub-amostragem por dois, enquanto os outros blocos representam a convolução de c_0 com o filtro $g(x)$ ou $h(x)$. Esse processo de filtragem é realizado sucessivamente de forma iterada e assim dá origem a chamada árvore de decomposição *Wavelet*, ilustrada na Figura 2.9:

Figura 2.9: Ilustração com exemplos de *Wavelets* com diferentes escalas e deslocamentos



Fonte: Adaptação de (Costa, 2010)

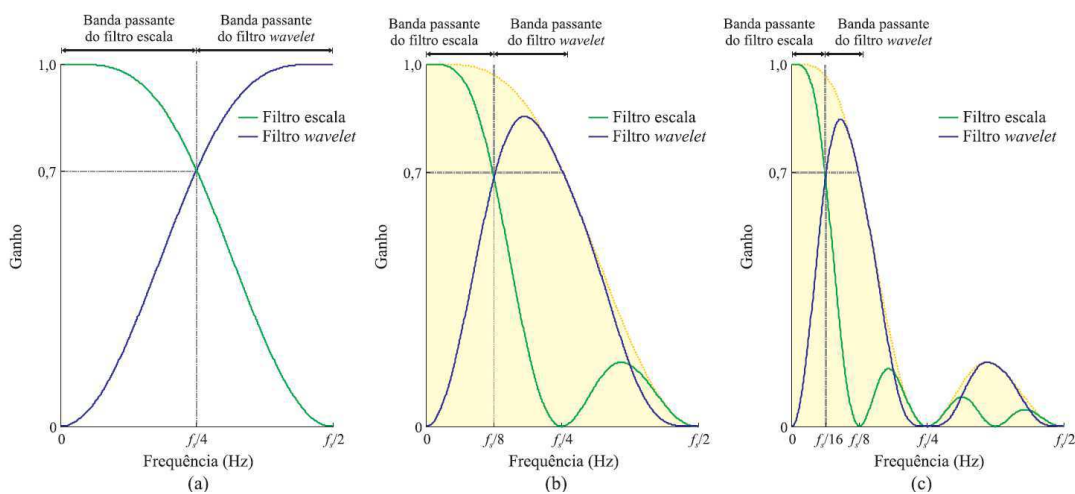
Os filtros $h(k)$ e $g(k)$ são filtros passa-baixa e passa-alta respectivamente. Observando a Figura 2.9, nota-se que o coeficiente de aproximação da escala 1, $c_1(k)$, é obtido pela filtragem do coeficiente de aproximação do sinal original, $x(k)$, seguida de uma sub-amostragem por 2. Não obstante, percebe-se que o coeficiente de detalhe, $d_1(k)$, (também chamado Coeficiente *Wavelet*) da escala 1 é obtido pela filtragem do sinal original seguida de uma sub-amostragem por 2. Os outros coeficientes ($c_2(k)$, $d_2(k)$, $c_3(k)$, $d_3(k)$) das camadas subsequentes de filtragem *Wavelet* seguiram a mesma estrutura descrita anteriormente, sendo feita a filtragem a partir dos coeficientes de aproximação da camada superior.

As componentes resultantes do filtro passa-alta que contêm as altas frequências e possuem informações acerca dos detalhes, enquanto que as outras componentes resultantes do filtro passa-baixa, contendo as baixas frequências, fornecem informações apenas da visão global dessas frequências, sem detalhes (DAUBECHIES, 1988).

Como consequência do teorema da amostragem de Nyquist (OPPENHEIM; SCHAFER, 1989), em que um sinal com frequência de amostragem f_s possui um espectro de frequência de 0 a $f_s/2$ Hz e do fato dos filtros digitais g e h constituírem-se em filtros espelhados em quadraturas (DAUBECHIES, 1992), os coeficientes de aproximação na primeira escala possuem espectro de frequência variando de 0 a $f_s/4$ Hz, enquanto que os coeficientes *Wavelet*, nessa escala, possuem banda de passagem de $f_s/4$ a $f_s/2$ Hz.

Na primeira escala Figura 2.10(a), o espectro de frequência do sinal original é dividido pela metade, sendo o filtro escala um filtro passa-baixas e o filtro *Wavelet*, um filtro passa-altas. Na segunda escala, o espectro de frequência dos coeficientes de aproximação da primeira escala é particionado em termos dos coeficientes de aproximação e *Wavelet*, conforme a resposta em frequência dos filtros passa-baixas e passa-altas ilustrados na Figura 2.10(b). Na terceira escala, a resposta em frequência dos filtros escala e *Wavelet* é função da resposta em frequência do filtro escala da segunda escala Figura 2.10(c).

Figura 2.10. Resposta em frequência dos filtros escala e *Wavelet* da Daubechies 4: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.



Fonte: (COSTA, 2010)

2.6.4 PROPRIEDADES DA TRANSFORMADA *WAVELET*

O Teorema de Parseval estabelece que a energia do sinal original é igual a soma das energias dos coeficientes da TW nos vários níveis (BURRUS et al., 1998). Sendo assim, a TW conserva a energia do sinal independentemente do nível da decomposição. Matematicamente, o teorema de Parseval é expresso pela equação (2.10):

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_j(k)|^2 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 \quad (2.10)$$

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

Outra imprescindível propriedade da TW, utilizada nessa pesquisa, é a Característica de Pequenos Detalhes:

- As magnitudes dos valores do coeficiente de detalhe são, com frequência, significativamente menores que as magnitudes dos valores do sinal original (WALKER, 2008).

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.

Com base na Característica de Pequenos Detalhes evidencia-se que a energia do sinal original ficará significativamente concentrada no coeficiente de aproximação. À medida que se aumenta o nível de decomposição 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.

O Princípio da Incerteza de Heisenberg afirma que 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 WALKER (2008).

Fica visível o fato de que para sinais pouco comportados, com muitas descontinuidades ou com muitas variações, maior será o valor da energia dos coeficientes de detalhe. Assim, a Energia do coeficiente *Wavelet*, é definida matematicamente pela equação (2.11):

$$E = \sum_{-\infty}^{+\infty} |x(k)|^2 \quad (2.11)$$

Relacionando ao estudo das curvas de MRD, 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 MRD.

Nesse capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica contendo informações referentes a disjuntores de alta tensão, seus aspectos construtivos e atividades de manutenção. Além disso foi apresentado, noções básicas da TW e de sua versão discreta, a propriedade de conservação e compactação da energia e a característica de pequenos detalhes conceitos

utilizados para interpretar os resultados obtidos nesta pesquisa. No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos encontrados na literatura relacionados à aplicação da MRD no diagnóstico de disjuntores.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão apresentados os principais resultados de pesquisas, estudos de caso e discussões das pesquisas de caso mais relevantes sobre monitoramento e diagnóstico da condição dos contatos de disjuntores por meio da MRD reportados na literatura.

3.1 MONITORAMENTO DE DISJUNTORES

Ohlen, Dueck, e Wernli (1995) foram os primeiros pesquisadores no estudo da aplicação da MRD na análise da condição dos contatos de disjuntores. Para esses autores, nos ensaios de MRD, a utilização de altas correntes de teste são mais exequíveis para reprodução da real condição dos contatos. Outrossim, as curvas de resistência obtidas durante operações de abertura dos contatos do disjuntor representam mais fielmente o estado dos contatos em contra ponto às curvas obtidas durante as operações de fechamento, visto que os saltos mecânicos provenientes do atrito entre os contatos podem provocar erros de medição. No procedimento de diagnóstico desenvolvido por Ohlen et al (1995), o grau de degradação dos contatos é determinado medindo o comprimento dos contatos de arco, que pode ser obtido a partir das curvas de MRD. O diagnóstico através da medição somente do comprimento do contato de arco não apresenta resultados conclusivos, tendo em vista que alguns modelos de disjuntores podem apresentar elevada degradação do contato de arco, sem diminuição relevante do seu comprimento.

Landry e outros (2006) desenvolveram uma nova metodologia para ensaios de MRD. Os autores sugerem que os ensaios de MRD devem ser realizados com redução na velocidade de abertura dos contatos, o que fornece resultados mais precisos que os ensaios realizados em velocidade nominal. Além disso, as curvas obtidas nos ensaios em velocidade nominal possuem muitos picos, dificultando a identificação do ponto de separação dos contatos principais e dificultando o diagnóstico do contato. O método proposto destaca-se por permitir uma fácil

interpretação dos resultados do ensaio de MRD, relacionando a área sob a curva de MRD ($\Omega.s$) com o estado dos contatos.

Landry, Turcotte, e Brikci (2008) estudaram uma possível utilização da MRD no diagnóstico de contatos de disjuntores a SF₆. Os autores propuseram o ajuste da corrente de teste e da velocidade de abertura dos contatos nos ensaios de MRD de acordo com a susceptibilidade dos disjuntores à formação de fluoretos metálicos na superfície dos contatos. Os autores afirmam que a presença de fluoretos metálicos nos contatos, algo comum em disjuntores a SF₆, podem falsear o valor da resistência dos contatos gerando erros de diagnóstico, visto que os valores de resistência medidos serão maiores que a resistência dos contatos.

Pancu, Baraboi, e Adam (2009) propuseram uma modelagem matemática para estimativa do nível de erosão dos contatos a partir do volume de massa transferida dos contatos durante as operações de abertura em curto-circuito. O número de comutações, valor eficaz (RMS) da corrente de curto-circuito associado à cada comutação, período de duração do arco elétrico, parâmetros termo físicos dos materiais, que constituem os contatos e condições ambientais as quais o disjuntor está submetido, são os principais fatores que influenciam no processo de eletroerosão dos contatos. Recorrendo a sensores instalados no disjuntor e/ou na subestação, as grandezas (corrente de curto-circuito, tempo de arco e condições ambientais) foram empregadas como dados de entrada no microcontrolador. Os pesquisadores programaram o microcontrolador para estimar o número de operações do disjuntor, o nível de erosão dos contatos e o desgaste linear do contato de arco.

Stanisic e Neimanis (2010) desenvolveram um sistema eletrônico portátil como alternativa para medição da resistência estática ou dinâmica de contato. Para aplicação da corrente de teste para a MRD, os autores propuseram a substituição das baterias por um ultra capacitor com baixíssima resistência interna, que produziria a corrente de teste através da sua descarga. Os autores ressaltam que o uso de baterias nos sistemas convencionais para o ensaio da MRD torna o sistema bastante pesado, além da desvantagem dos conversores CC/CC presentes em alguns equipamentos gerarem alto nível de ruído de chaveamento, aumentando a complexidade do sistema de medição. O sistema proposto se destaca pela possibilidade de independência dos sistemas atualmente comercializados.

Jeyaraj e Habbit (2011) avaliaram a eficiência de algumas técnicas de análise do estado operativo dos disjuntores, destacando a necessidade de implantação de novas técnicas comprovadamente mais eficientes que as convencionais, de modo a economizar tempo e dinheiro por parte das concessionárias. Os autores destacam uma relutância excessiva por parte

das concessionárias em aceitar o uso de novas metodologias, restringindo a análise de disjuntores a testes de resistência estática e medição dos tempos de operação na abertura e no fechamento dos contatos, muitas vezes através de equipamentos inadequados de teste. Estudos de caso, em que a MRD é agregada com sensores de deslocamento do contato móvel foram avaliados. Os autores concluíram que a MRD é uma técnica eficiente na avaliação das câmaras de disjuntores. A técnica viabilizou a realização de ensaios qualitativos de MRD, graças aos sensores de deslocamento do contato móvel, que permitiram a avaliação da parte mecânica, além da avaliação dos contatos. Além disso, as técnicas devem ser claras e de fácil interpretação, caso contrário, a tomada de decisão será demorada, diminuindo a eficiência da técnica, que depende do tempo necessário para realizar os ensaios, bem como da qualidade dos resultados e facilidade de interpretação.

Sodha, Singh, Victor e Tyagi (2012) avaliaram, a partir de estudos de caso, a aplicação da MRD em disjuntores de alta tensão em serviço. Os autores ressaltam a importância da aplicação da MRD durante o comissionamento da subestação. A curva de resistência decorrente da primeira MRD em um disjuntor, que entrará em operação, é denominada de “impressão digital” do disjuntor. Os pesquisadores apontam a importância de se obter um banco de dados da MRD, adquiridas a cada intervenção feita no equipamento, de forma que esse banco de dados sirva como uma referência para o disjuntor analisado, bem como para outros disjuntores do mesmo modelo. Dessa forma, o monitoramento periódico, com base em condições de operação, vai gerar uma evolução da assinatura do disjuntor (curva da MRD), com isso, diversos defeitos ficam evidentes na assinatura e, a partir da comparação de curvas da MRD obtidas em diferentes intervenções, podem ser identificados. Os disjuntores não seriam abertos periodicamente baseados apenas na recomendação do fabricante, mas com base também em condições de operação, o que auxiliaria os fabricantes de disjuntores na melhoria da qualidade de fabricação, com base na avaliação visual das curvas de resistência, auxiliando na tomada de decisão sobre a revisão ou inspeção interna.

Castro (2012) classificou o nível de degradação das câmaras de extinção de disjuntores de alta tensão utilizando a energia do coeficiente de detalhe das transformadas *Wavelets* associada à curva em cada nível. Foram utilizadas curvas de MRD sintéticas (geradas computacionalmente). Inicialmente, duas curvas MRD foram usadas para gerar outras curvas. A primeira curva representava a MRD de um disjuntor em bom estado. A segunda representava a MRD de um disjuntor com contatos de arco em estado de degradação avançado. Os resultados obtidos com uso da transformada *Wavelet* foram comparados às aquelas utilizando como critério o valor da área abaixo da curva.

Souza & Costa (2014) elaboraram um sistema alternativo para realizar ensaios de MRD. O sistema é capaz de aplicar uma corrente de teste de até 300 A a partir da associação em série com uma bateria estacionária com resistores de cromo-alumínio-ferro. O sistema concebido tem como principal vantagem ser considerado de baixo custo em comparação com os micro-ohmímetros disponíveis no mercado. A validação de sua eficiência da técnica, foi realizada em um disjuntor PVO, onde as medições foram realizadas com a aplicação de uma corrente de teste de 300 A. Comprovou-se que os contatos de arco identificados heurísticamente com um maior nível de degradação na região do contato de arco apresentaram maior área abaixo da curva de MRD, com destaque para a região do contato de arco. Os autores afirmam que, para o disjuntor analisado, a medição de resistência dinâmica pode ser feita em velocidade nominal de abertura dos contatos com a aplicação de uma corrente de teste de 300 A. Não obstante, os autores chegaram à conclusão de que a medição de resistência estática é inconclusiva para o modelo de disjuntor analisado.

OLIVEIRA (2015) realizou um estudo mais aprofundado sobre os procedimentos adotados para ensaios de MRD em disjuntores. Em seu estudo, foi realizada uma análise a respeito da influência que os parâmetros de ensaio (corrente de teste e velocidade de abertura dos contatos) exercem sobre os resultados obtidos nos ensaios de MRD. Com o intuito de ter controle sobre tais parâmetros, um sistema de medição alternativo foi desenvolvido, que permite a redução e o controle da velocidade de abertura dos contatos, além de permitir que isto seja feito com velocidade praticamente constante. O sistema de MRD também permite o ajuste da corrente de teste aplicada, que pode ser de até 300 A. Os ensaios foram realizados em disjuntores do tipo PVO. Uma análise sobre a reprodutibilidade dos resultados foi conduzida utilizando o coeficiente de determinação (R^2). O autor observou que os ensaios de MRD realizados com velocidade nominal de abertura dos contatos e utilizando os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC 62271-1 e ANSI C37.09 (50 e 100 A, respectivamente) não são adequados para ensaios de MRD, devido à baixa reprodutibilidade dos resultados e a alta interferência proveniente de películas de óleo e vibrações mecânicas, que comprometem a confiabilidade do diagnóstico. Com os resultados obtidos, o autor pôde determinar um nível máximo de velocidade de abertura dos contatos e um nível mínimo de corrente de teste a serem utilizados nos ensaios de MRD, de modo a se obter resultados/diagnósticos mais confiáveis. De forma sumarizada, são apresentadas na Tabela 3.1 as principais contribuições das pesquisas supracitadas, com relação ao tema abordado nesse trabalho.

Tabela 3.1: Síntese da revisão bibliográfica.

Referência	Técnica Empregada	Técnica de Avaliação Aplicada
Ohlen et al (1995)	Ensaio da MRD com obtenção da curva de deslocamento do contato móvel	Em função da diminuição do comprimento do contato de arco (mm)
Landry et al (2006)	Ensaio da MRD	Em função do aumento da área da curva da MRD (resistência versus tempo)
Landry et al (2008)	Ensaio da MRD	Em função do aumento da área da curva da MRD (resistência versus tempo)
Stanisic & Neimanis (2010)	Ensaio da MRD	Não empregada
Jeyaraj & Hastay (2011)	Ensaio da MRD com obtenção da curva de deslocamento do contato móvel	Definida heurísticamente por meio de análise visual da curva de resistência
Sodha et al (2012)	Ensaio da MRD com obtenção da curva de deslocamento do contato móvel	Definida heurísticamente por meio de análise visual da curva de resistência
Castro (2012)	Curvas de MRD sintéticas (geradas computacionalmente).	Transformadas <i>Wavelet</i>
Souza & Costa (2014)	Ensaio da MRD	Em função do aumento da área da curva da MRD e dos valores médios de resistência
Oliveira (2015)	Ensaio da MRD com redução/controle da velocidade de abertura dos contatos e ajuste da corrente	Não empregada

Fonte: Próprio autor.

Nesse capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica com as principais pesquisas relacionadas à aplicação da MRD no diagnóstico de disjuntores, suas técnicas de avaliação e principais contribuições. No próximo capítulo serão descritos os materiais utilizados nos ensaios, bem como os arranjos e procedimentos de ensaio adotados.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

Esse capítulo descreve o material e os métodos empregados nos ensaios de medição de resistência dinâmica em laboratório, utilizando o sistema alternativo desenvolvido, com abertura dos contatos em velocidade nominal com diversos níveis de corrente de teste.

4.1 MATERIAL

No desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado apenas disjuntor de média tensão a pequeno volume de óleo (PVO). Não há registro do número de operações de interrupção de correntes de curto-circuito. Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais características do disjuntor utilizado.

Tabela 4.1: Característica do disjuntor de média tensão

Característica	Disjuntor A
Tipo	3AC2711-4
Número	0003709
Ano de fabricação	1978
Corrente nominal	800 A
Tensão nominal	15 kV
Corrente de interrupção simétrica nominal	12,5 kA
Frequência	60 Hz
Meio isolante	Óleo
Fabricante	Siemens

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.1 é apresentada uma fotografia do disjuntor utilizado.

Figura 4.1: Fotografia do disjuntor Siemens.



Fonte: (OLIVERA, 2015).

Para os ensaios no disjuntor, foram utilizados três conjuntos de contatos com diferentes níveis de degradação. Nas Figura 4.2 e Figura 4.3 são apresentadas fotografias dos contatos fixos e móveis das três amostras ensaiadas, respectivamente.

Figura 4.2: Amostras de contato fixo do disjuntor SIEMENS.



Fonte: (OLIVERA, 2015).

Figura 4.3: Amostras de contato móvel do disjuntor SIEMENS.



Fonte: (OLIVERA, 2015).

Foi denominado de contato X, ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3, um contato novo, utilizado pela primeira vez nos ensaios desta pesquisa, considerando-o com um baixo nível de degradação. A denominada amostra Y foi degradada por operações normais de interrupção de curto-circuito e foi considerada como um contato de nível de degradação médio. A denominada amostra Z, além de ter sido degradada por operações de interrupção de curto-circuito, foi submetida a um procedimento de envelhecimento acelerado baseado em pesquisa desenvolvida por Lemelson (1973), em que os contatos são imersos em óleo aquecido a uma temperatura de aproximadamente 210°C por 6 horas, seguido de resfriamento naturalmente por mais 6 horas. Esse procedimento se repetiu até que os contatos apresentassem o nível de degradação desejado.

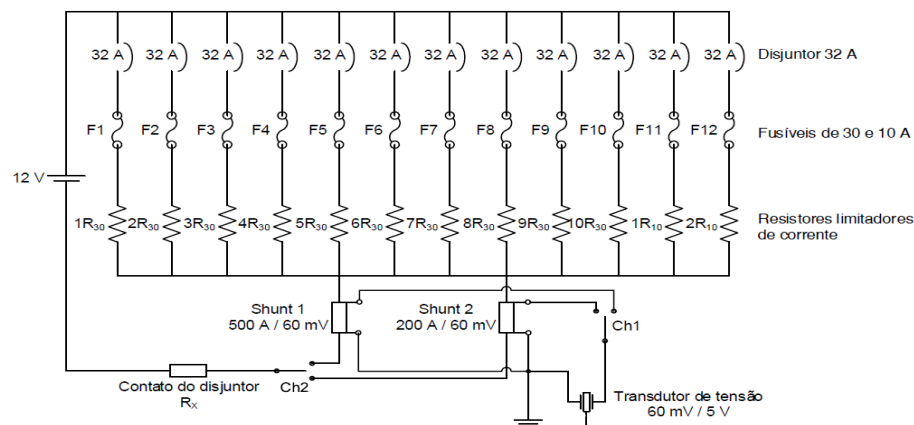
Lemelson (1973), concluiu que a formação de películas de óleo na superfície de contatos elétricos isolados a óleo pode ocasionar falhas de operação de equipamentos. Falhas desse tipo, embora ocorram em pouquíssimos casos, são mais comuns em casos onde os contatos conduzem uma alta corrente de carga e raramente operam. Desse modo, as películas de óleo passam a formar camadas de óleo carbonizado que provocam a falha dos equipamentos.

4.2 MÉTODOS

Para realização dos ensaios de MRD em laboratório, foi utilizado um sistema de medição originalmente desenvolvido por Souza & Costa (2014) e aprimorado por OLIVEIRA (2015), de modo a possibilitar a realização dos ensaios com redução/controla da velocidade de abertura dos contatos. No sistema proposto, a injeção da corrente de teste é implementada a partir da associação de uma bateria estacionária (12 V/220 Ah) em série com um resistor ajustável de cromo-alumínio-ferro ($0,040 \Omega \sim 1,2 \Omega / 4 \text{ kW}$).

Na Figura 4.4 é apresentado o circuito do sistema utilizado no ensaio da resistência de contato.

Figura 4.4: Circuito do sistema utilizado no ensaio da resistência de contato.



Fonte: (Souza 2014)

O resistor possui três terminais de conexão (P1, P2 e N). Para ensaios com corrente até 200 A, o circuito com bateria e disjuntor deve ser conectado entre os terminais P1 e N. Para ensaios com corrente superiores a 200 A e menores que 500 A, o circuito com bateria e disjuntor deve ser conectado entre os terminais P2 e N. A chave Ch1 tem a função de conectar a saída dos shunts (200 A ou 500 A) ao transdutor de tensão. A função do transdutor de tensão é amplificar o sinal de saída do shunt de 60 mV para 5 V.

O resistor projetado apresenta as seguintes características:

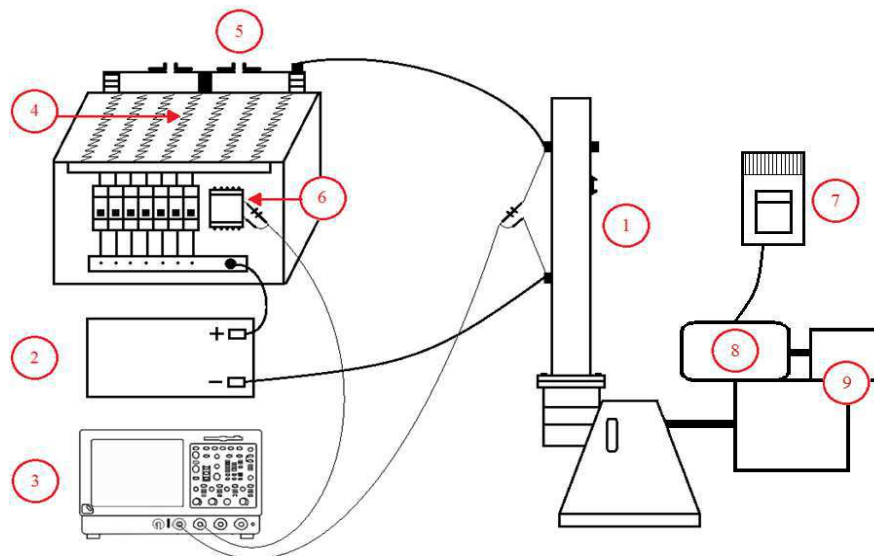
- Injeção de corrente contínua com ampacidade de até 300 A (fonte de tensão: bateria estacionária 12 V) durante 5 minutos;
- Ajuste da corrente da bateria através de resistor regulável de Cromo-Alumínio-Ferro ($0,0362 - 1,087 / 3.883 \text{ W}$);

- Medição da corrente de teste com shunt de corrente de (200 A/60 mV ou 500 A/60 mV) e transdutor de tensão (60 mV/5 V); O sistema de medição de corrente consiste em um *shunt* de corrente combinado a um transdutor de tensão, fornecendo um sinal de tensão proporcional a corrente de teste (com relação 500 A/5 V). A aquisição desse sinal de tensão é feita com um dos canais de um osciloscópio digital.

O valor da queda de tensão sobre os contatos é obtido simultaneamente por meio da medição direta com um dos canais do osciloscópio. Os sinais de tensão e corrente medidos durante as operações de abertura dos contatos são exportados para um computador. Os dados foram processados por uma rotina computacional desenvolvida no Matlab®, resultando nas curvas de resistência dinâmica.

O sistema proposto para realização de ensaios de MRD em laboratório é representado de forma simplificada pela ilustração apresentada na Figura 4.5.

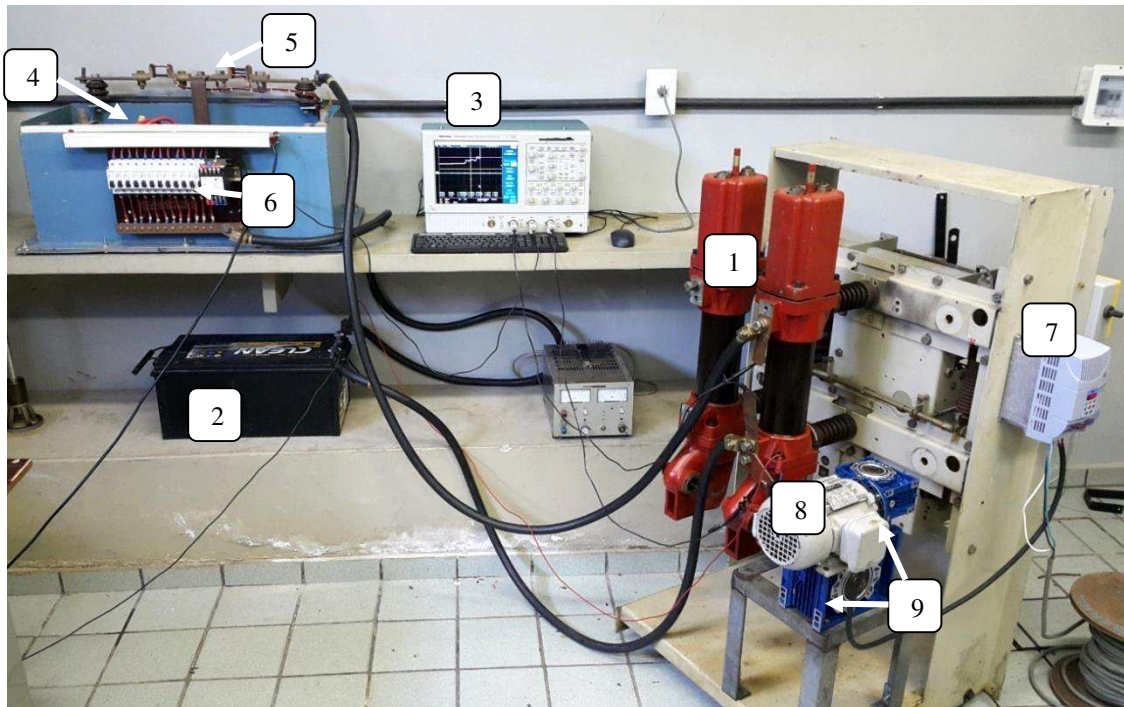
Figura 4.5: Ilustração do arranjo adotado para ensaios de MRD.



1 - Disjuntor; 2 - bateria estacionária; 3 - osciloscópio digital; 4 - resistores de cromo-alumínio-ferro; 5 - shunt de corrente; 6 - transdutor de tensão; 7 - inversor de frequência; 8 - motor assíncrono; 9 - redutor de velocidade

Na Figura 4.6 é apresentada uma fotografia do arranjo real montado em laboratório.

Figura 4.6: Arranjo experimental utilizado nos ensaios de MRD.



1 - Disjuntor; 2 - bateria estacionária; 3 - osciloscópio digital; 4 - resistores de cromo-alumínio-ferro; 5 - shunt de corrente; 6 - transdutor de tensão; 7 - inversor de frequência; 8 - motor assíncrono; 9 - redutor de velocidade
 Fonte: (OLIVERA, 2015).

O sistema desenvolvido para implementar a redução de velocidade pode ser observado mais detalhadamente na fotografia apresentada na Figura 4.7.

Figura 4.7: Sistema de redução/controle de velocidade de abertura dos contatos.



Fonte: (OLIVERA, 2015).

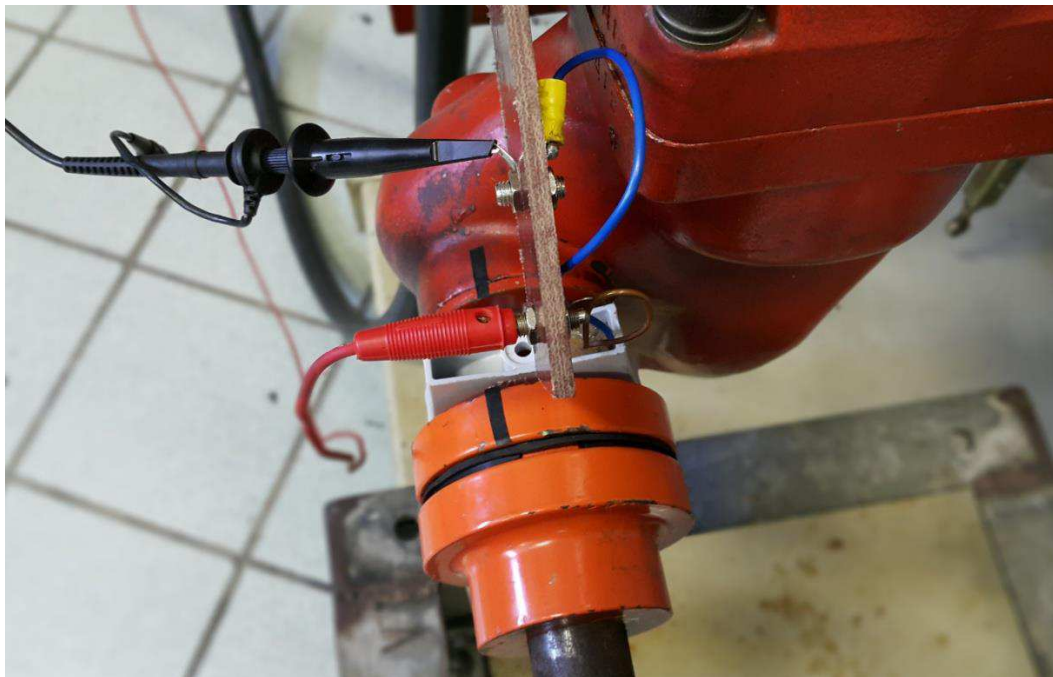
Não obstante o inversor de frequência, já ser capaz de reduzir a velocidade de rotação do motor, ele não foi eficiente para alcançar a faixa de velocidade desejada. Além disso, a redução da frequência de alimentação de motor também reduz o seu torque, impedindo o processo de abertura dos contatos. Tendo em vista tal limitação, adotou-se um redutor de velocidade duplo com relação de velocidade de 200:1 que, além de permitir a redução de velocidade para os níveis desejados, proporciona um torque praticamente constante durante a abertura.

Em virtude do grande número de operações de abertura e fechamento dos contatos realizadas, foi adicionado um circuito de acionamento auxiliar para o inversor de frequência, com o intuito de não danificar os botões de controle do inversor.

O circuito auxiliar, que pode ser visto no lado direito da Figura 4.8, contém uma chave de seleção ligar/desligar, uma chave de seleção para selecionar o sentido de rotação do motor e um potenciômetro para ajustar a frequência de alimentação do motor (consequentemente ajustando sua velocidade de rotação).

A sincronização das medições foi realizada, no osciloscópio, com as operações de abertura do disjuntor, utilizando o circuito auxiliar exibido na fotografia apresentada na Figura 4.8.

Figura 4.8: Circuito auxiliar para gatilhamento do osciloscópio.



Fonte: (OLIVERA, 2015).

O cabo vermelho mostrado na Figura 4.8 foi conectado ao terminal positivo da bateria. Um fio rígido conectado a um dos canais do osciloscópio foi fixado com a ajuda de uma braçadeira no eixo de saída do redutor de velocidade. Quando o disjuntor se encontra na posição fechada, o fio rígido fica em contato com a terminação do cabo vermelho, portanto enviando um sinal de 12 V para o osciloscópio. Quando o processo de abertura do disjuntor é iniciado, o fio rígido se desconecta do cabo vermelho e então o sinal de lido pelo osciloscópio passa de 12 V para 0 V. Sendo assim, o osciloscópio foi programado para efetuar as medições a partir da detecção de transição descendente de um sinal por um nível intermediário de tensão (6 V).

Nesse capítulo foram descritos os disjuntores PVO e seus contatos (fixo e móveis) utilizados nos ensaios desta pesquisa, além do arranjo experimental e sistemas de medição adotados para os ensaios. No próximo capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios. Estudos comparativos entre os resultados obtidos com diferentes configurações de ensaio também serão apresentados e discutidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Após a aplicação da TWD a cada uma das 288 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 até o terceiro nível de decomposição. O terceiro nível da decomposição apresenta os melhores resultados para todas as famílias testadas, caracterizando-se assim, como o mais adequado para a classificação dos sinais analisados. 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 um nível crescente nos valores de energia dos coeficientes de detalhe. Por exemplo, considerar que a energia do coeficiente de detalhe da amostra X é maior que o coeficiente de detalhe da amostra Z, constitui erro na análise e indica que provavelmente aquela família *Wavelet* não é adequada ao diagnóstico.

Para cada configuração de ensaio (combinação entre os parâmetros descritos anteriormente) foram realizadas 6 medições, totalizando cerca de 288 ensaios.

- 3 amostras de contatos: amostra X (baixo nível de degradação), amostra Y (médio nível de degradação) e amostra Z (alto nível de degradação);
- 4 níveis de corrente de teste (50, 100, 200 e 300 A);
- 4 faixas de tempos de varredura do contato de arco, foram adotados (180 ms, 88 ms, 37 ms e 21 ms).

As curvas estão com cores diferentes apenas para efeito de comparação, visto que todas foram obtidas a partir de medições com as mesmas configurações de ensaio (mesma velocidade de abertura dos contatos e mesma amostra de contatos).

O escopo desse trabalho se limitou a analisar a curvas de MRD com correntes de testes pré-definidas em 50 A, 100 A, 200 A e 300 A. Os dois primeiros valores utilizados são os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC 62271-1 e ANSI C37.09 (50 e 100 A, respectivamente). A redução de velocidade, conseqüentemente o aumento no tempo de abertura dos contatos fornecem resultados com maior reprodutibilidade, melhorando a confiabilidade do

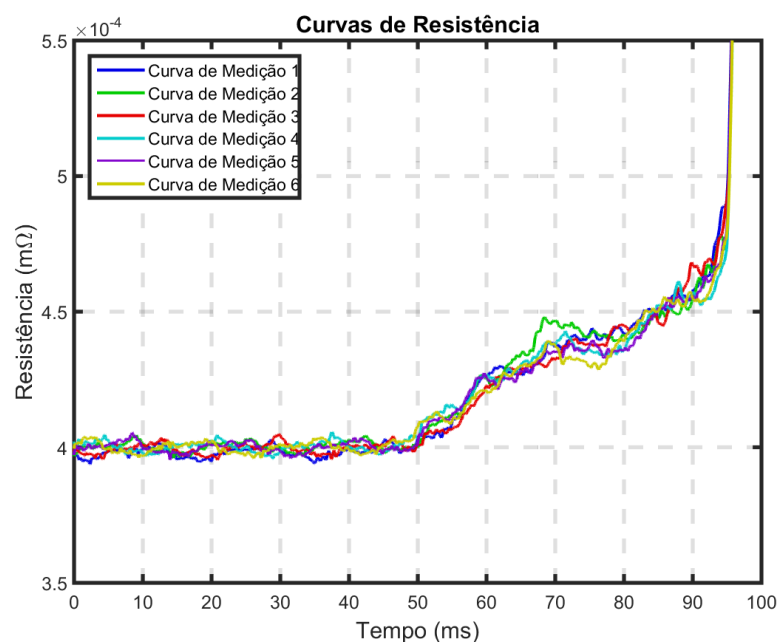
diagnóstico, esse foi o fato motivador a usar curvas com níveis de velocidades controlados. A exposição dos dados, a partir de cada experimento, é subdividida em duas faixas de correntes, a primeira de 50 A e 100 A, e a segunda de 200 A e 300 A.

O osciloscópio foi configurado para gravar 25000 pontos em cada medição, resultando em uma medição com alta resolução e intervalo de amostragem de apenas 8 μ s. Todavia, a decomposição foi realizada em 10000 pontos, a uma taxa de amostragem foi de 125 kHz. Cada curva foi decomposta até o terceiro nível da TWD. As famílias *Wavelets* utilizadas foram a Haar, Daubechies 4, 6, 8 e 12, Coiflet 5, 6 e 12 e Symlet 8. O número que segue o nome da família indica o número de coeficientes dos filtros da TW.

5.1 ANÁLISE DAS CURVAS DA MRD COM CORRENTE DE 50 A E 100 A

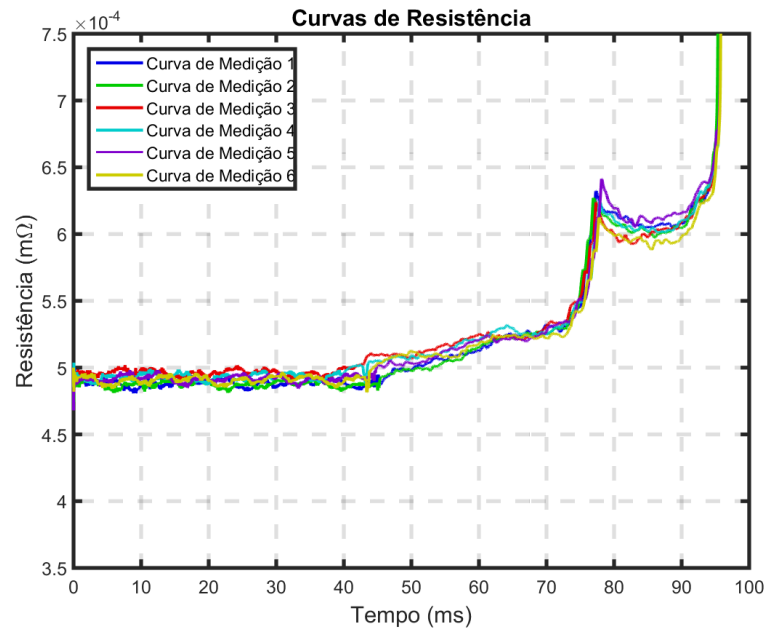
A partir da execução de ensaios de MRD com redução da velocidade de abertura dos contatos, aplicando uma corrente de teste de 100 A foram obtidas as curvas de resistência dinâmica apresentadas nos gráficos Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Em tempo, essas figuras apenas ilustram uma das configurações realizadas nesta pesquisa. Outros 47 gráficos semelhantes foram gerados, a partir das configurações pré-estabelecidas, e já citadas.

Figura 5.1: Curva de MRD amostra X com injeção de 100 A e tempo 21 ms.



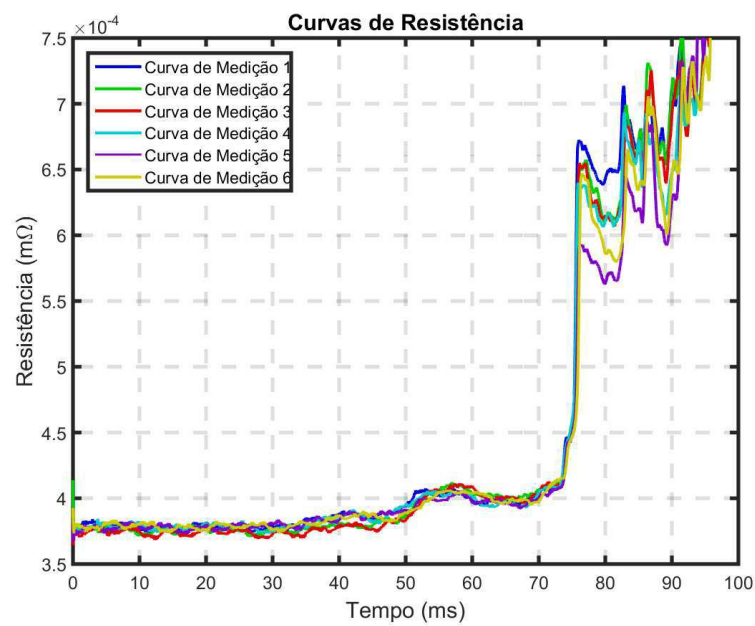
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.2: Curva de MRD amostra Y com injeção de 100 A e tempo 21 ms.



Fonte: Próprio autor.

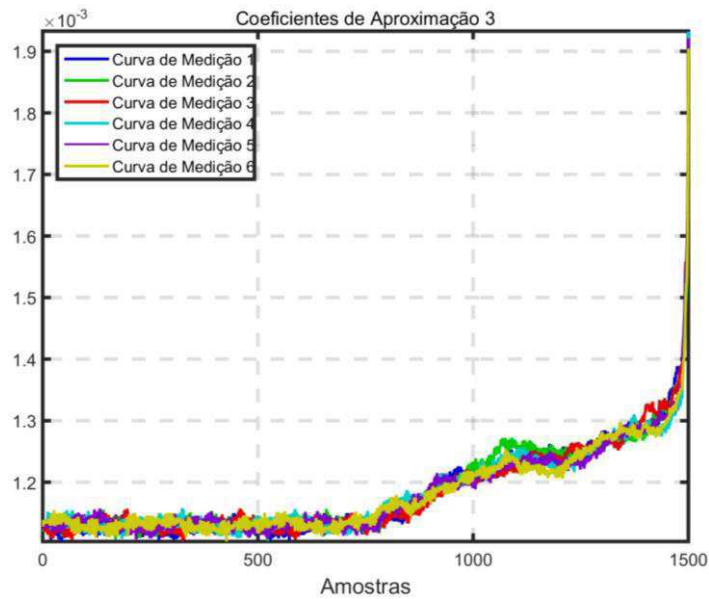
Figura 5.3: Curva de MRD amostra Z com injeção de 100 A e tempo 21 ms.



Fonte: Próprio autor.

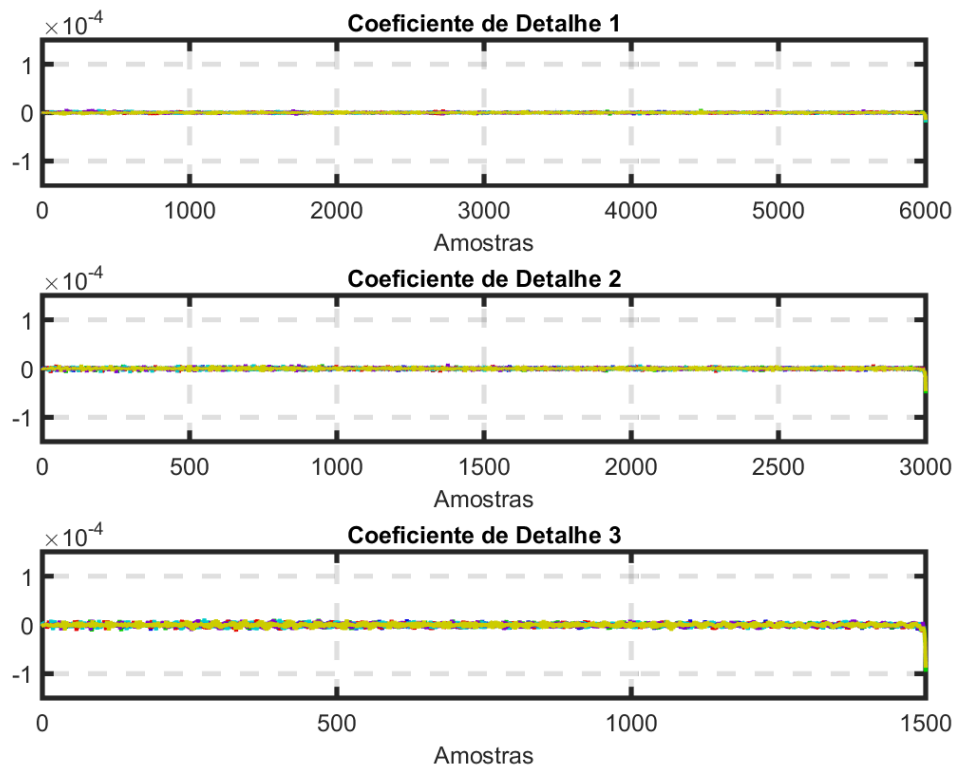
Nas Figuras, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 são ilustrados os resultados da decomposição *Wavelet* das curvas para o caso em específico.

Figura 5.4: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* HAAR Amostra X (Aproximação 3^o nível).



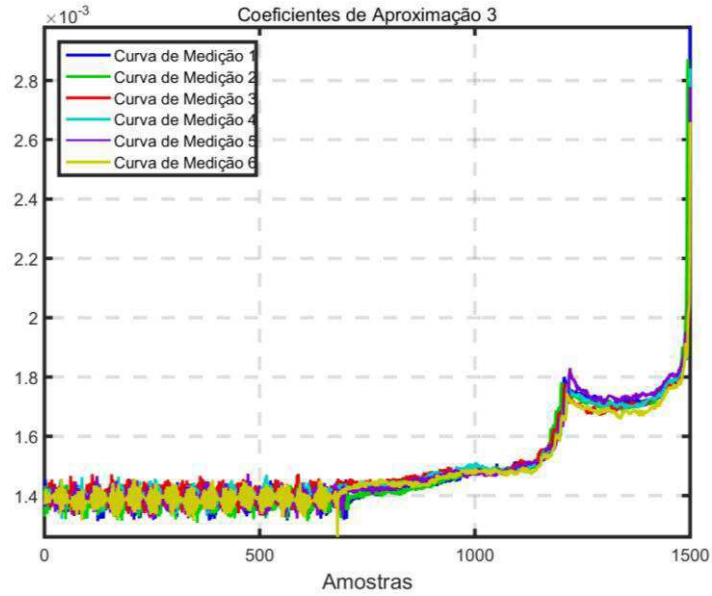
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.5: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* HAAR Amostra X (Detalhes).



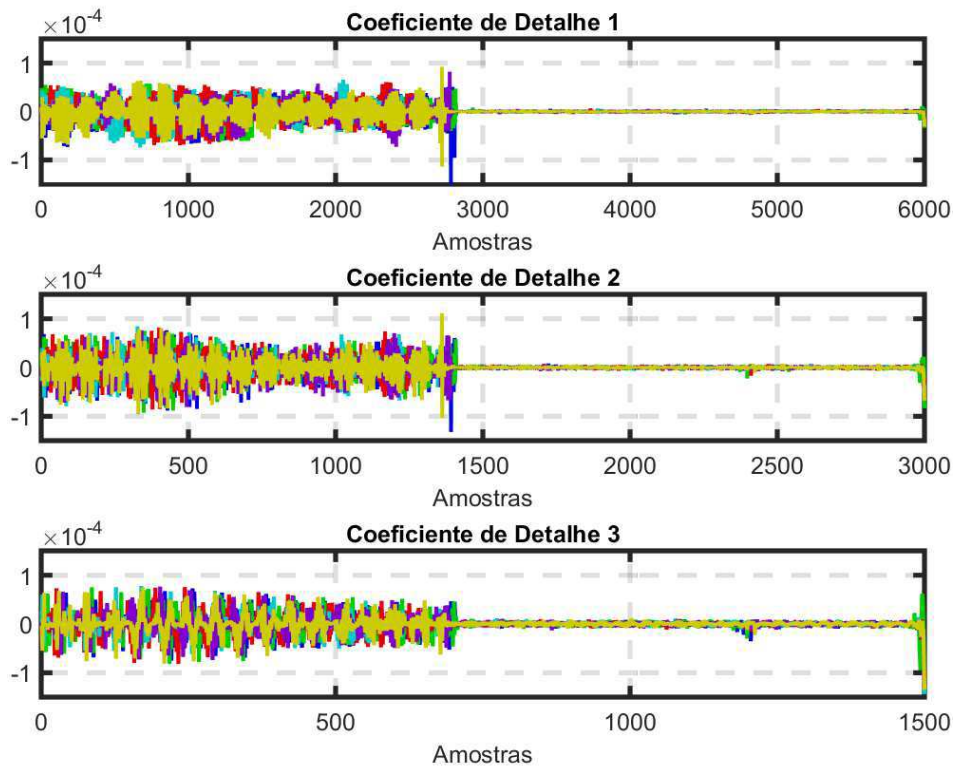
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.6: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* HAAR Amostra Y (Aproximação 3^o nível).



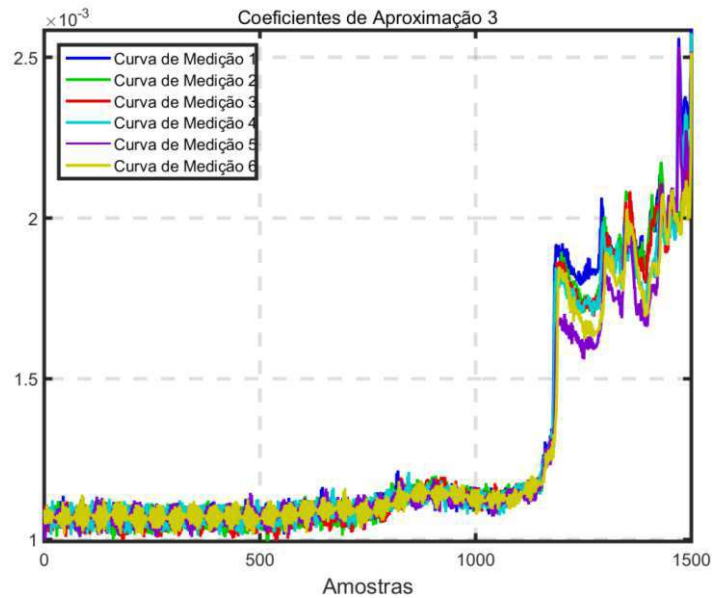
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.7: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* HAAR Amostra X (Detalhes).



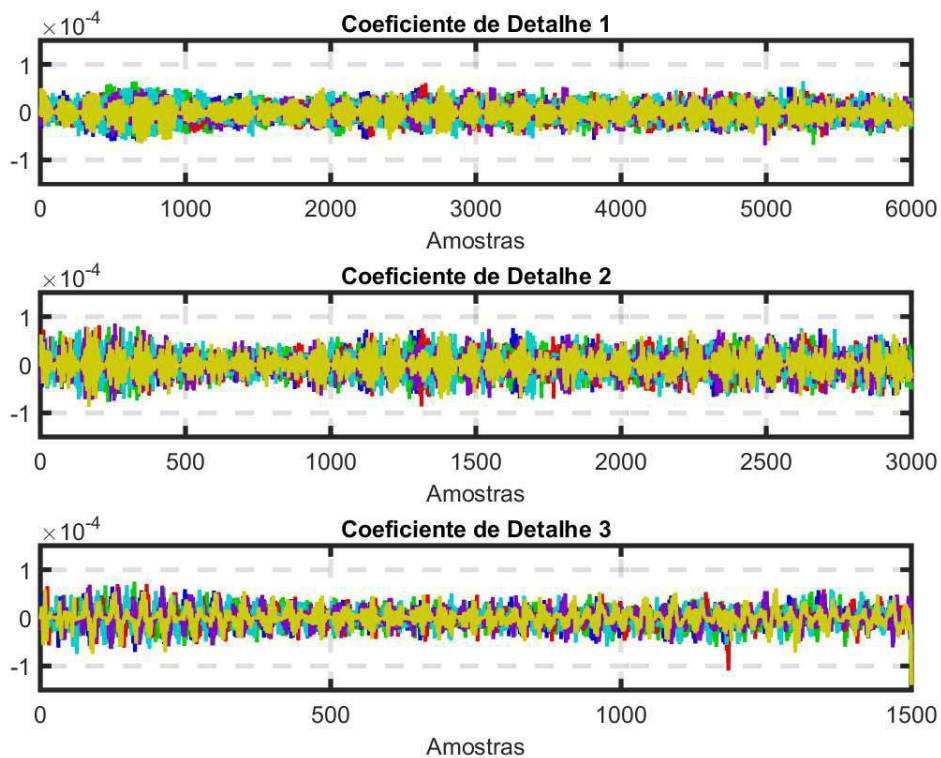
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.8: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* HAAR Amostra Z (Aproximação 3º nível).



Fonte: Próprio autor.

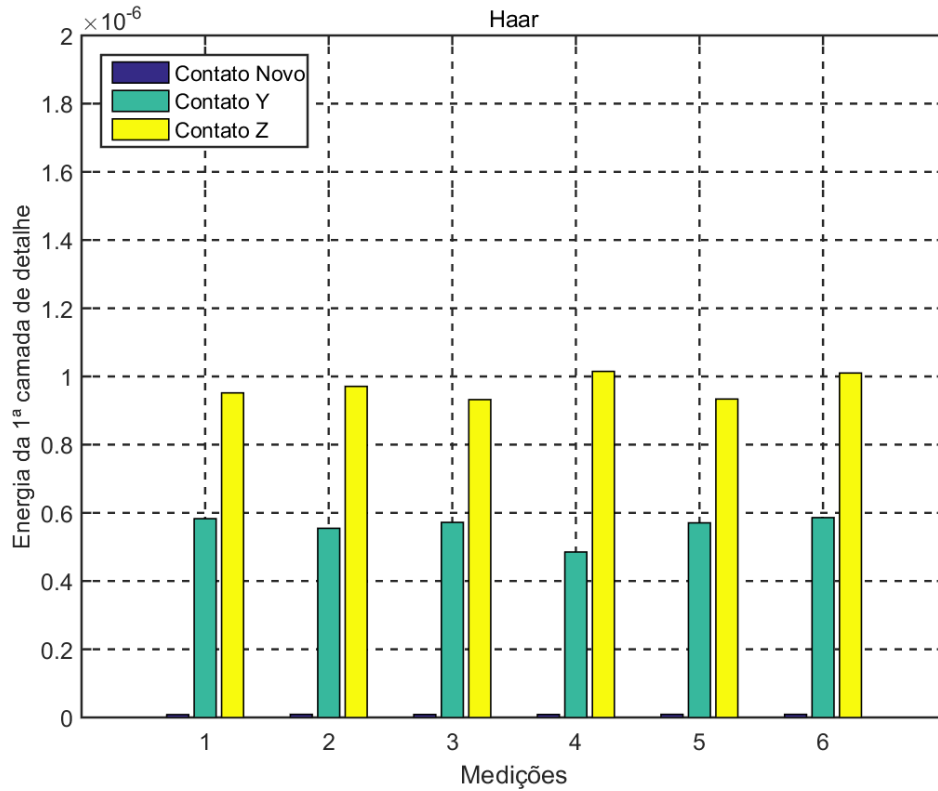
Figura 5.9: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* HAAR Amostra X (Detalhes).



Fonte: Próprio autor.

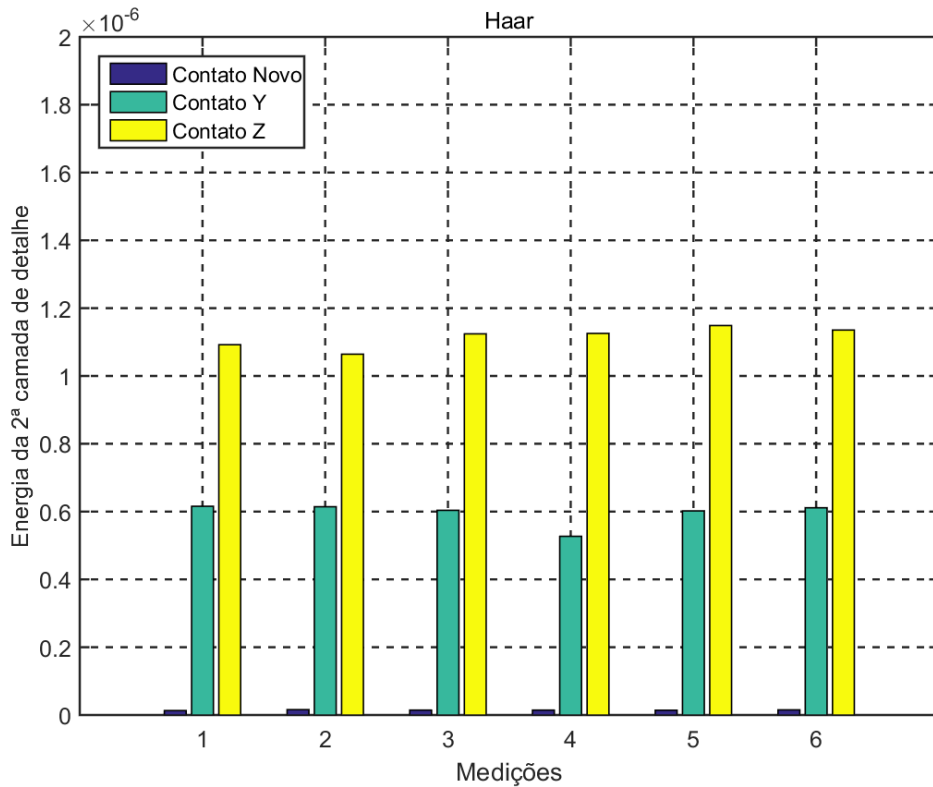
Na Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, está apresentado o gráfico em forma de coluna com os resultados dos valores de energia calculados para cada nível de decomposição, objetivando facilitar a análise dos resultados.

Figura 5.10: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 1º nível de decomposição (Família Haar);



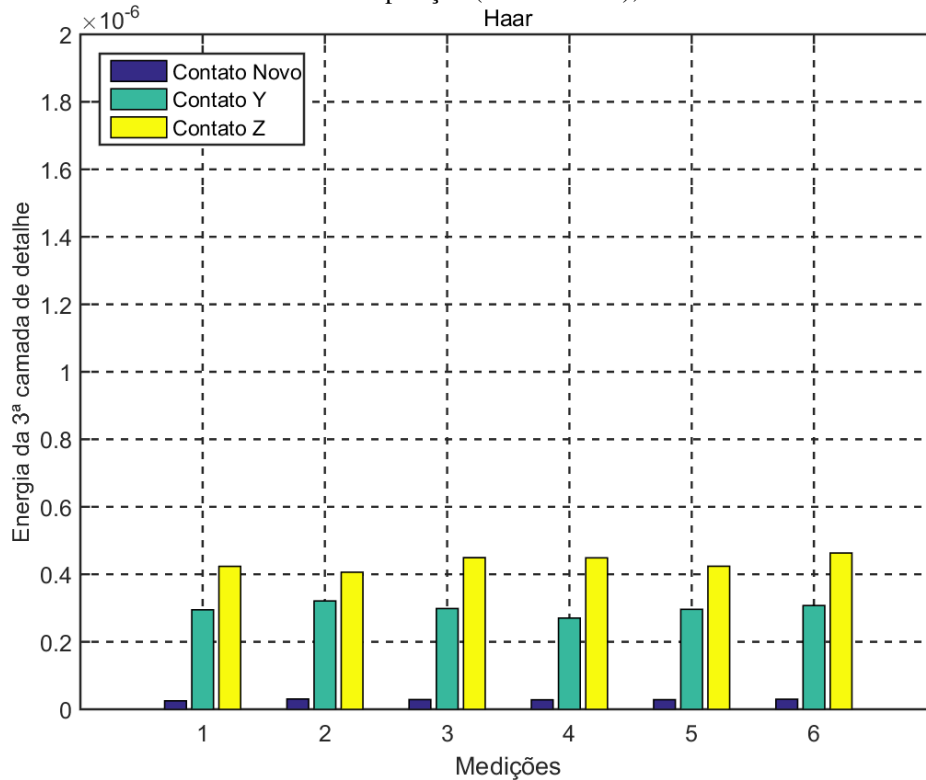
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.11: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 2º nível de decomposição (Família Haar);



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.12: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 3º nível de decomposição (Família Haar);



Fonte: Próprio autor.

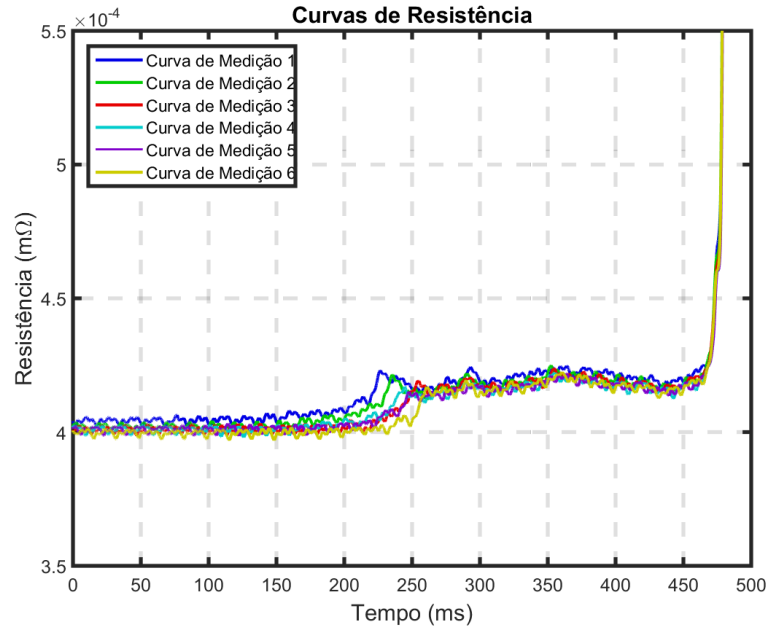
A partir dos resultados mostrados na Figuras 5.10, 5.11, 5.12, pode-se concluir que a observação dos valores de energia dos coeficientes de detalhes, pode-se obter um indicativo do estado de degradação dos contatos do disjuntor estudado, sem que seja necessário desmontagem do mesmo.

5.2 ANÁLISE DAS CURVAS DA MRD COM CORRENTE DE 200 A E 300 A

No tópico anterior foram ilustrado curvas da execução de ensaios de MRD com redução da velocidade de abertura dos contatos, aplicando uma corrente de teste de 100 A, sendo essa um dos níveis de corrente prescrita em norma. Porém, (OLIVEIRA, 2015) conclui que a corrente de teste a ser usada nos ensaios de MRD, nos disjuntores de mesmo modelo que o disjuntor utilizado nesta pesquisa, deve ser de pelo menos 200 A, visto que, a partir desse valor, as curvas de resistência tendem a se manter no mesmo nível. Curvas de resistência dinâmica, obtidas com corrente injetada de 300 A são apresentadas nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15.

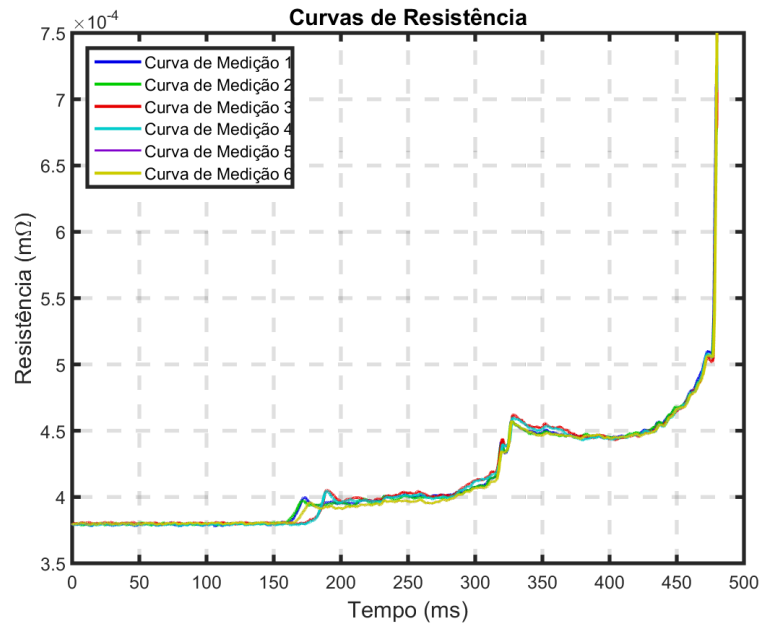
Vale ressaltar, que essas curvas têm praticamente condições ideais, em relação à sua obtenção, corrente maior que 200 A e velocidade inferior a 0,2 m/s (tempo de 160 ms).

Figura 5.13 Curva de MRD amostra X com injeção de 300 A e tempo 160 ms.



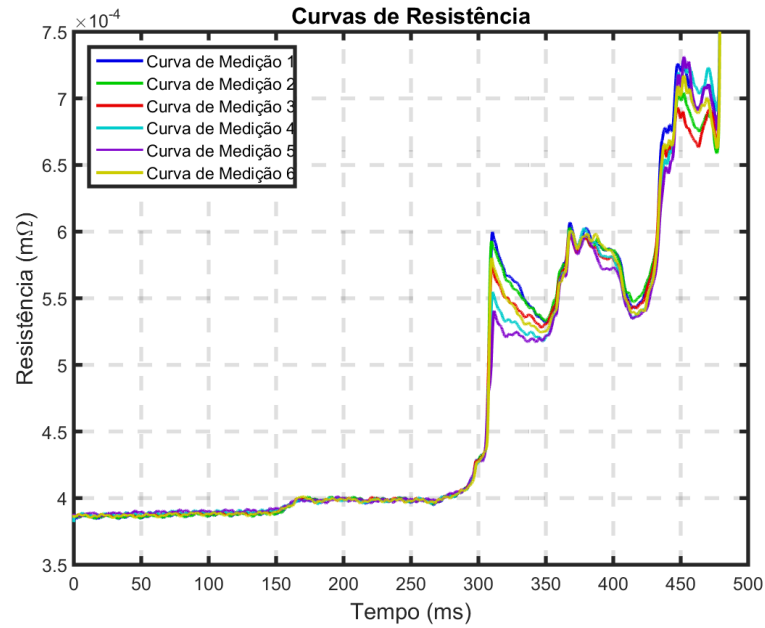
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.14: Curva de MRD amostra Y com injeção de 300 A e tempo 160 ms.



Fonte: Próprio autor.

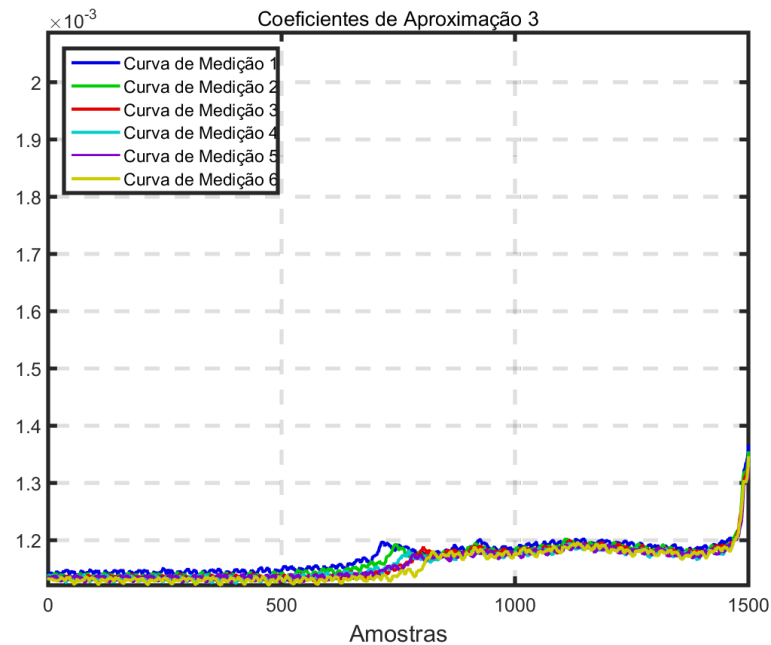
Figura 5.15: Curva de MRD amostra Z com injeção de 300 A e tempo 160 ms.



Fonte: Próprio autor.

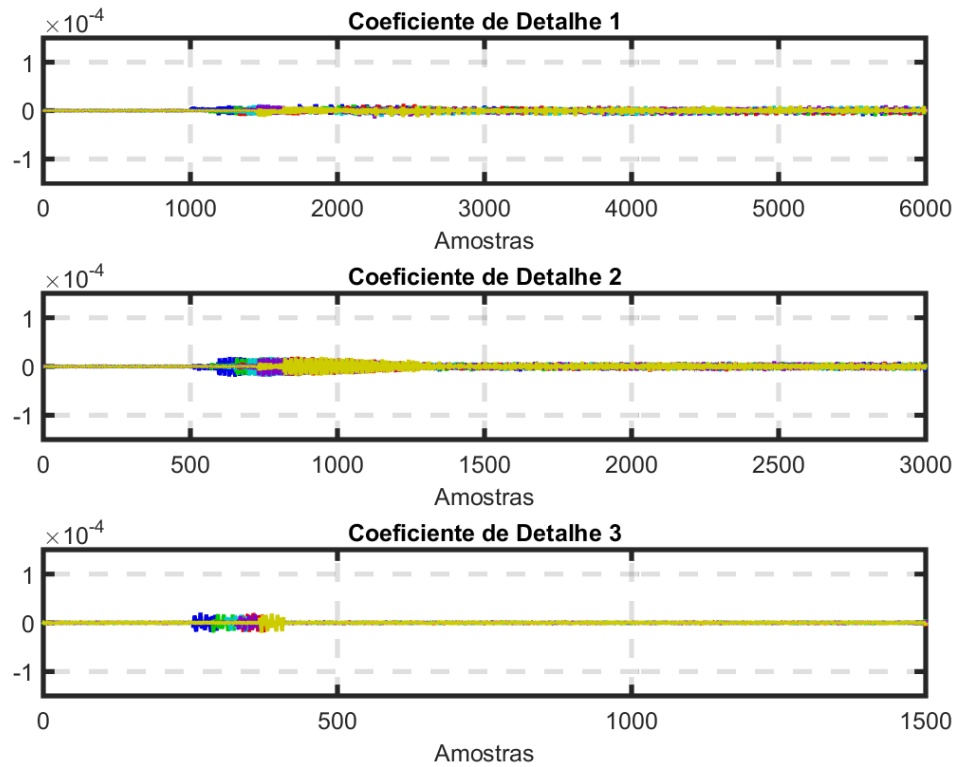
Nas Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21, são ilustrados os resultados da decomposição *Wavelet* das curvas para o caso em específico (família *Wavelet* Daubechies 6).

Figura 5.16: Decomposição da Curva MRD utilizando a família *Wavelet* Daubechies 6 Amostra X (Aproximação 3º nível).



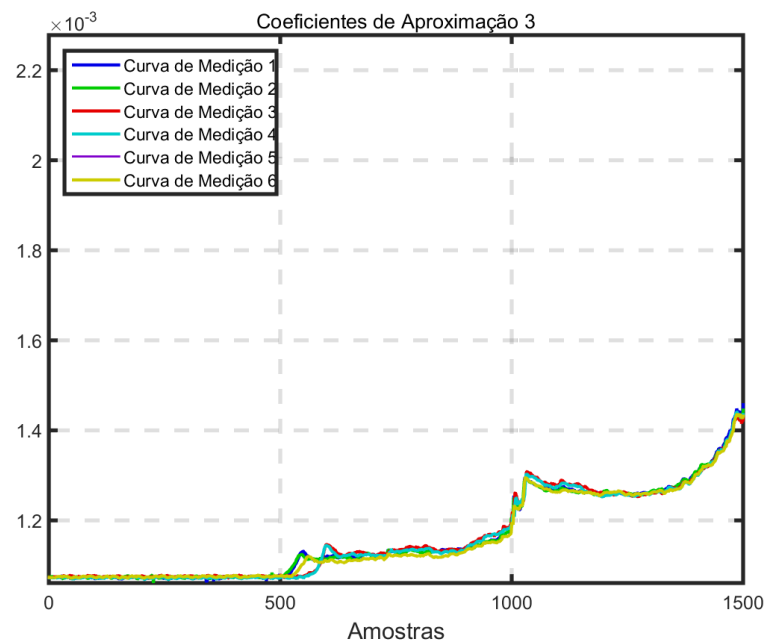
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.17: Decomposição da Curva MRD utilizando a família Wavelet Daubechies 6 Amostra X (Detalhes).



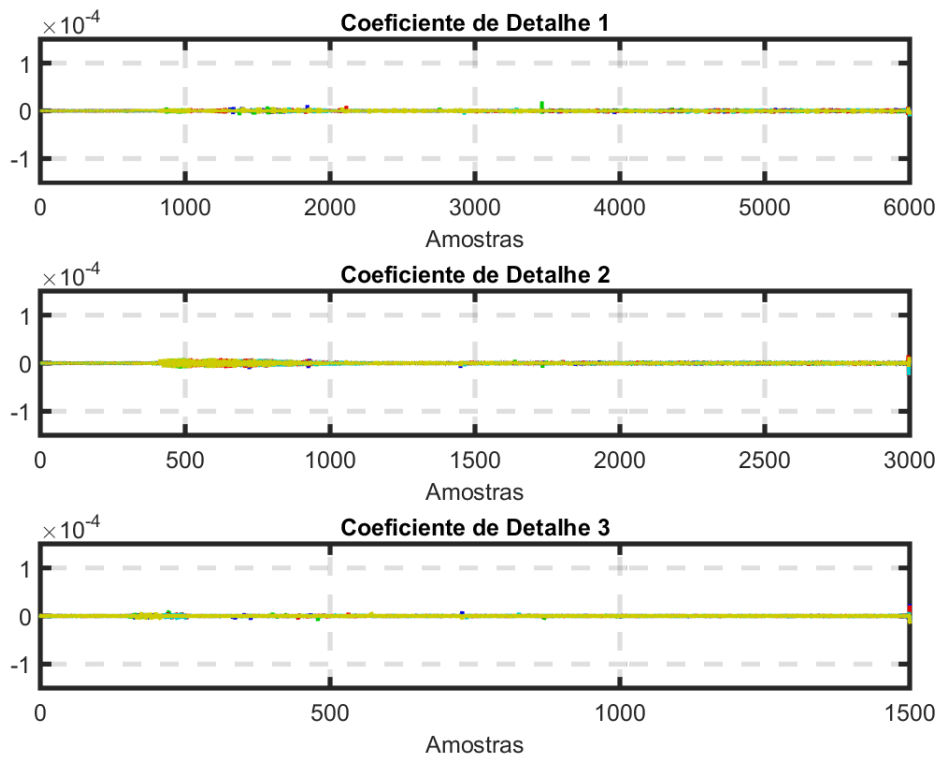
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.18: Decomposição da Curva MRD utilizando a família Wavelet Daubechies 6 Amostra Y (Aproximação 3º nível).



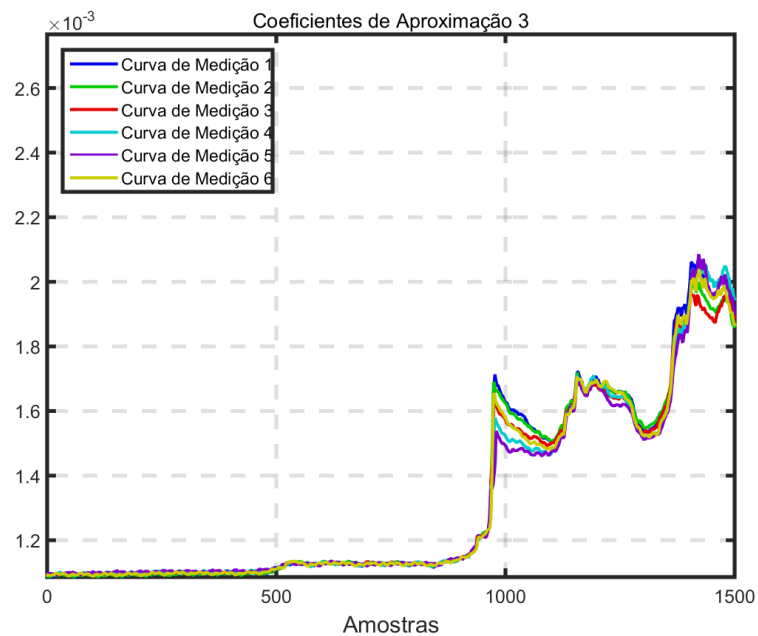
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.19: Decomposição da Curva MRD utilizando a família Wavelet Daubechies 6 Amostra Y (Detalhes).



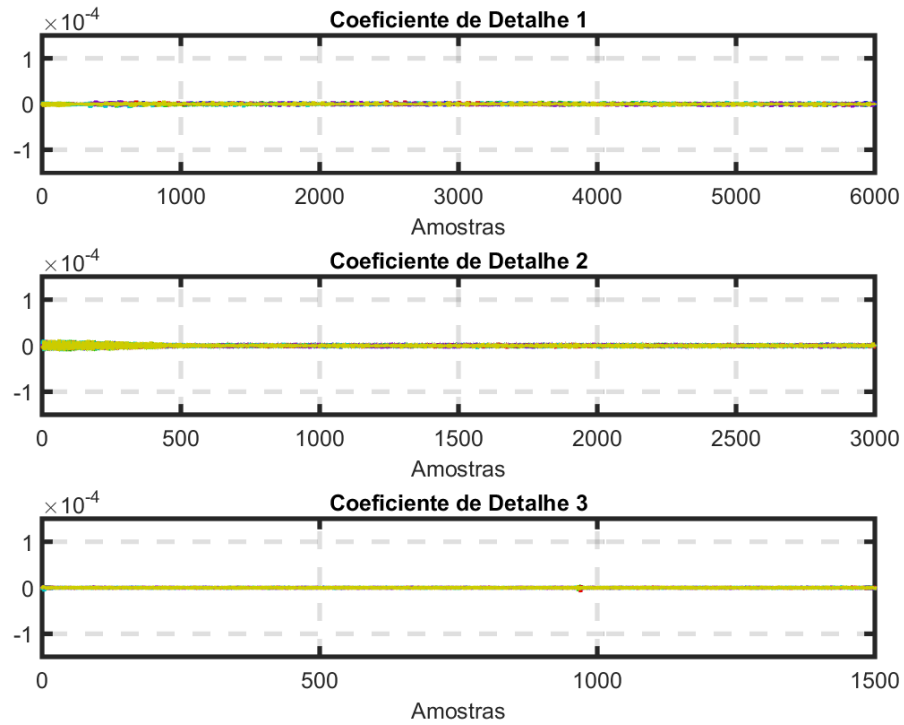
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.20: Decomposição da Curva MRD utilizando a família Wavelet Daubechies 6 Amostra Z (Aproximação 3º nível).



Fonte: Próprio autor.

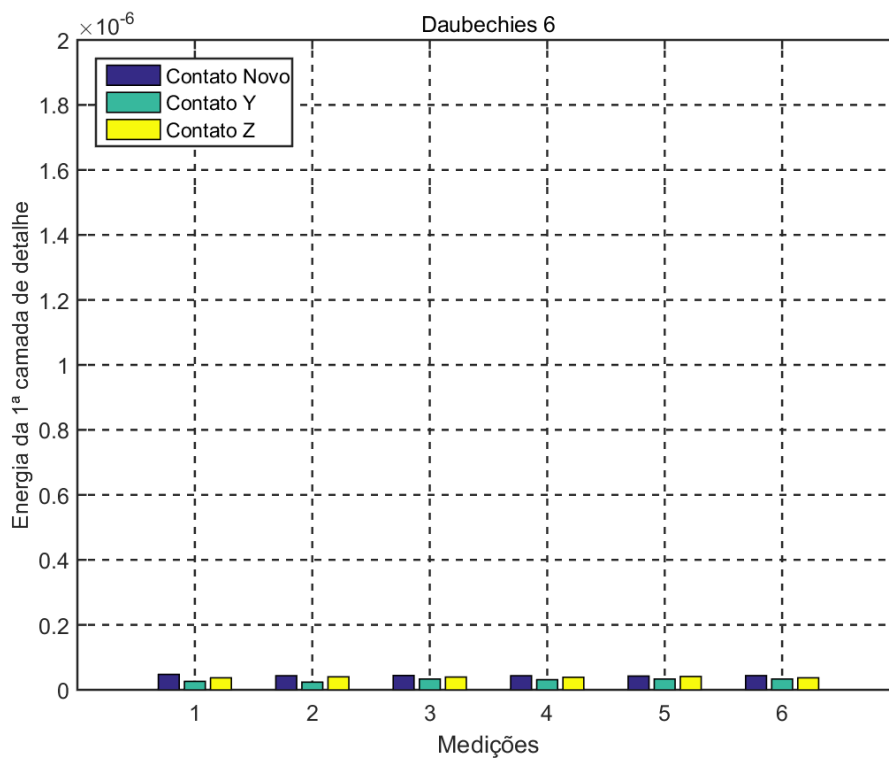
Figura 5.21: Decomposição da Curva MRD utilizando a família Wavelet Daubechies 6 Amostra Z (Detalhes).



Fonte: Próprio autor.

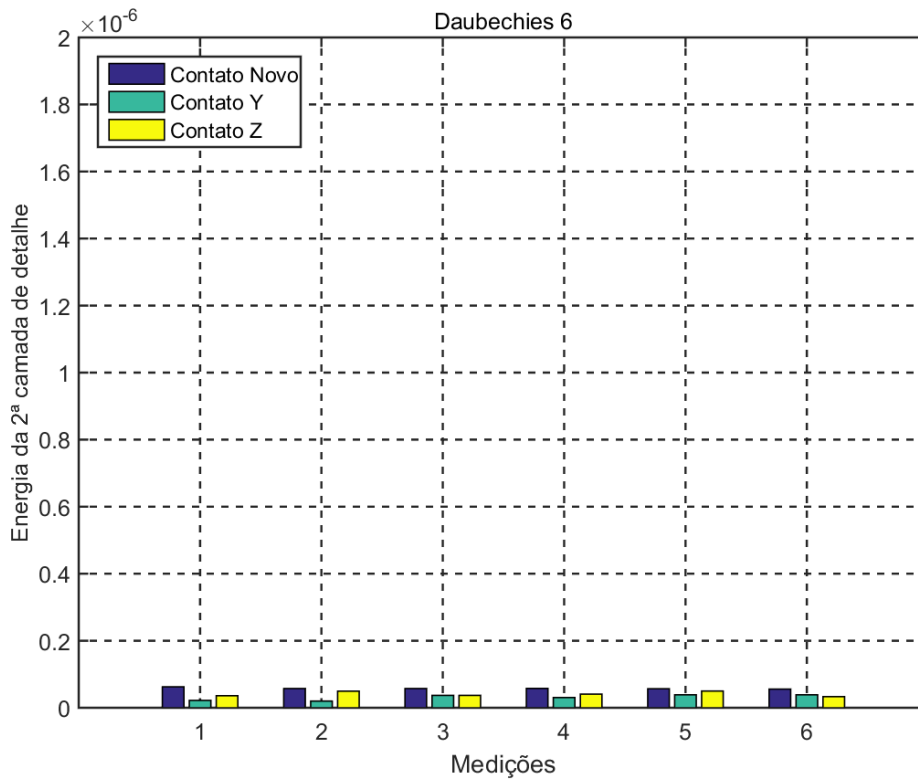
Nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, estão apresentados os gráficos em forma de coluna com os resultados dos valores calculados para cada nível de decomposição.

Figura 5.22: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 1º nível de decomposição (Família *Wavelet* Daubechies 6);



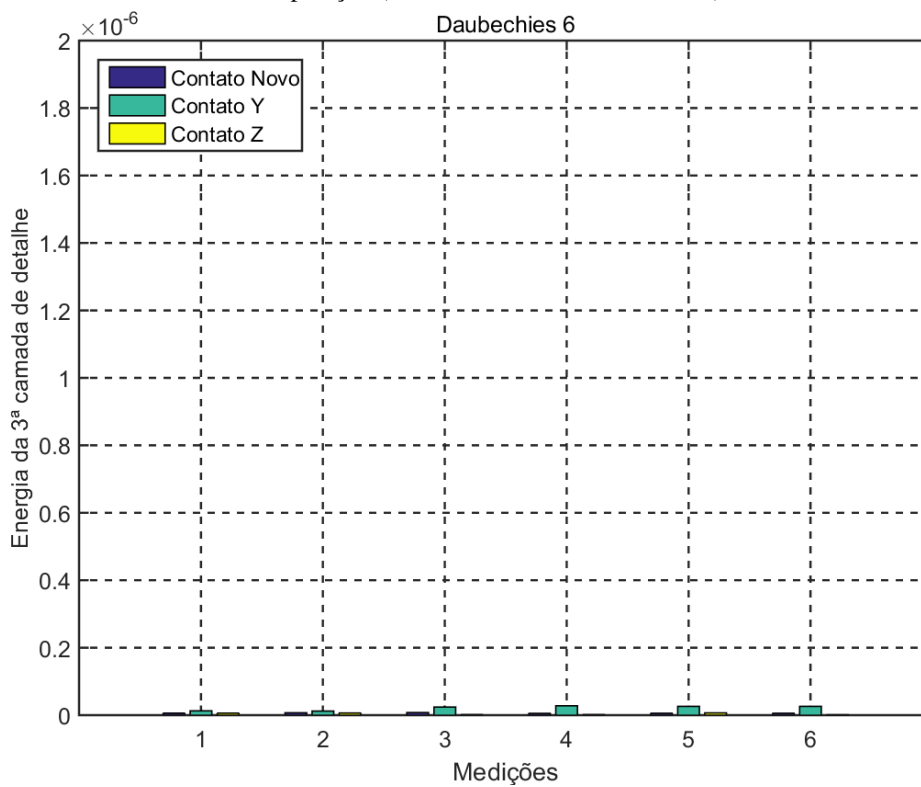
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.23: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 2º nível de decomposição (Família *Wavelet* Daubechies 6);



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.24: Gráfico em forma de coluna com valores de energia para o coeficiente de detalhe do 3º nível de decomposição (Família *Wavelet* Daubechies 6);



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados exibidos nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 pode-se concluir que, mesmo com o auxílio de um gráfico de colunas a escolha da Família *Wavelet* não será trivial, caso o número de curvas de MRD seja amplo. Com o propósito de facilitar tal escolha, uma rotina computacional foi desenvolvida no Matlab[®] verifica o percentual de acertos que cada *Wavelet* obteve. Os resultados apresentados na Tabela 5.1 indicam esse percentual de acertos, para o caso do cálculo ser realizado utilizando a Energia do coeficiente de detalhe (3º nível). Vale ressaltar, que a Tabela 5.1 refere-se ao terceiro nível da TW e esse foi o nível de decomposição com maior capacidade de análise das curvas de MRD para avaliação das condições contatos de disjuntores (fixos e móveis).

Tabela 5.1: Percentual de acerto para as famílias *Wavelet* estudadas

Tempo de Abertura	Família <i>Coiflet 5</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	50,0	100,0	33,3	0,0
37 ms	100,0	0,0	0,0	0,0
88 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
160 ms	0,0	0,0	33,3	0,0
Tempo de Abertura	Família <i>Coiflet 6</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	100,0	100,0	83,3	100,0
37 ms	100,0	66,7	100,0	83,3
88 ms	100,0	100,0	100,0	100,0
160 ms	100,0	100,0	100,0	83,3
Tempo de Abertura	Família <i>Coiflet 12</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	100,0	100,0	100,0	100,0
37 ms	100,0	66,7	100,0	83,3
88 ms	0,0	66,7	66,7	100,0
160 ms	66,7	66,7	100,0	100,0
Tempo de Abertura	Família <i>Daubechies 4</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	33,3	100,0	83,3	100,0
37 ms	100,0	33,3	0,0	0,0
88 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
160 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
Tempo de Abertura	Família <i>Daubechies 6</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	16,7	100,0	50,0	0,0
37 ms	100,0	16,7	0,0	0,0
88 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
160 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
Tempo de Abertura	Família <i>Daubechies 12</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	66,7	100,0	33,3	0,0
37 ms	100,0	0,0	0,0	0,0
88 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
160 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
Tempo de Abertura	Família <i>Haar</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	50,0	100,0	50,0	16,7
37 ms	100,0	83,3	16,7	16,7
88 ms	0,0	0,0	33,3	0,0
160 ms	0,0	16,7	33,3	33,3
Tempo de Abertura	Família <i>Symlet 8</i>			
	50 A	100 A	200 A	300 A
21 ms	33,3	100,0	33,3	0,0
37 ms	100,0	0,0	0,0	0,0
88 ms	0,0	0,0	0,0	0,0
160 ms	0,0	0,0	33,3	0,0

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.1, a interpretação dos resultados conduz à conclusão de que a *Wavelet* Coiflet 6 é a mais adequada para a análise das curvas de MRD.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

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 estudado para disjuntor de PVO. Transformadas *Wavelet* foram aplicadas a curvas obtidas experimentalmente em laboratório e utilizadas na pesquisa. A proposta evidencia correlações entre os resultados obtidos e os níveis de degradação dos contatos (fixo e móvel) sem necessidade de desmontagens desnecessárias, proporcionando ganhos reais aos serviços de manutenção.

Com as curvas obtidas foi possível classificar o estado de degradação da câmara de extinção em três classes de desgaste distintos. Para as curvas analisadas com as transformadas *Wavelets*, a interpretação dos resultados conduz a conclusão de que a *Wavelet* Coiflet 6 é a mais adequada para a análise das curvas de MRD, para o disjuntor estudado.

Analisando 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 MRD para avaliação das condições operacionais quanto ao desgaste dos contatos dentro das câmaras de extinção.

De modo geral, até a etapa atual da pesquisa, a viabilidade técnica do uso da transformada *Wavelet* na análise das curvas de Resistência Dinâmica de Contato foi ratificada. Visto que, com os resultados apresentados, conclui-se que a transformada *Wavelet* é uma ferramenta adequada e eficiente de apoio à tomada de decisão, inferindo o nível de degradação dos contatos. O diagnóstico do estado de degradação dos contatos no interior de câmaras de extinção de disjuntores de potência, utilizando esse método, torna-se mais um critério para estimação do tempo ótimo para a manutenção com a abertura da câmara de extinção de disjuntores.

Deve-se ressaltar que só é possível afirmar que as conclusões obtidas são válidas para o disjuntor utilizado nesse trabalho. Para verificar se os resultados obtidos se repetem para outros modelos de disjuntor, novos estudos seriam necessários.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com os objetivos da dissertação atingidos, novos estudos podem ser desenvolvidos com o intuito de dar continuidade à pesquisa.

Os resultados obtidos até então podem ser utilizados como base para o desenvolvimento de um novo sistema de monitoramento e diagnóstico, capaz de ser implementado para disjuntores em operação. Desse modo, os seguintes temas são sugeridos como trabalhos futuros:

- Estudar a aplicação da técnica de medição proposta nesse trabalho em outros modelos de disjuntor (como disjuntores a SF₆ e outros modelos de disjuntores a óleo);
- Desenvolver um sistema de medição portátil para aplicação da técnica proposta nesse trabalho, como alternativa aos analisadores de disjuntores comerciais disponíveis atualmente;
- Desenvolver um sistema de medição capaz de fornecer informações a respeito do estado operativo de disjuntores sem a necessidade de desinstalar o equipamento ou colocá-lo fora de operação;
- Estudar a avaliação do uso da MRD on-line, como as medições dos sinais de tensão e de corrente por meio de sensores ópticos;
- Avaliar métodos estatísticos e técnicas computacionais que possam ser utilizadas para interpretar os resultados das medições e correlacioná-los com o estado operativo dos disjuntores;
- Estudar variações de correntes.

REFERÊNCIAS

- ABB. Live Tank Circuit Breakers - Buyer's Guide. Suécia, 2009.
- ADAM M.; BARABOI A.; PANCU C. Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers. International Conference on Electromechanical and Power Systems, pp. 55-60, 2007.
- ANSI / IEEE STD C37.09. Test procedure for ac high-voltage circuit breakers, 1999.
- ARAÚJO R. L. Disjuntores. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Paraná, 2001.
- BOJIĆ, S.; UGLEŠIĆ, I.; FILIPOVIĆ-GRČIĆ, B. Switching transients in 400 kV transmission network due to circuit breaker failure. In: International Conference on Power Systems Transients (IPST), Vancouver, Canada. [S.l.: s.n.], 2013.
- BHEL. Handbook of switchgears. McGraw-Hill Professional, New York, 2006.
- BRAITHWAITE N. S. J. *Introduction to gas discharges*. Plasma Sources Sci. Technol. United Kingdom, vol. 9, pp. 517-527, 2000.
- 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: aplicação em sistemas de potência. Niterói-RJ: EDUFF, 1995.
- CASTRO F. N. *Aplicação da Transformada Wavelet na Classificação do Estado Operacional de Câmaras de Disjuntores*. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, Brasil: Universidade Federal de Campina Grande, 2012.
- DAUBECHIES, I. *Orthonormal bases of compactly supported Wavelets*. Communications on Pure and Applied Mathematics, 41, 1988. 909-996.
- D'AJUZ A.; RESENDE F. M.; CARVALHO F. M. S.; NUNES I. G. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. FURNAS/UFF. 1985.
- FILHO, J. M. Manual de Equipamentos Elétricos. [S.L.]: LTC, 2005.
- FLURSCHEIM C. H. Power circuit breaker theory and design. V. 1. The Institution of Engineering and Technology. London, 2008.
- FNINECHE, C.; AITKEN, O. Investigations on some parameters influencing the current commutation in the circuit breakers. IET, 2012.
- FRONTIM S. O. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013.

- GARZON R. D. High voltage circuit breakers: Design and applications. CRC Press, New York, 2002.
- GAO, R. X.; YAN, R. *Wavelet: Theory and Applications for Manufacturing* . Springer Science. 2011.
- GILL P. Electrical power equipment maintenance and testing. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- GREMMEL H. Switchgear Manual. Central-Druck Trost GmbH & Co. 10° ed, Berlin, 2002
- IS/IEC 62271-1: High-Voltage Switchgear and Controlgear, Part 1: Common Specifications, 2007.
- JEYARAJ S. G. & HABTAY Y. Effective and efficient circuit breaker analysis. Reliability of Transmission and Distribution Networks, pp. 1,6, 22-24, 2011.
- LIRA, M. M. S., *Wavelets na compactação e processamento de sinais de distúrbios em sistemas de potência para classificação via redes neurais artificiais*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2004. Tese de Doutorado.
- LANDRY M.; MERCIER A.; OUELLET G.; RAJOTTE C.; CARON J.; ROY M.; BRIKCI F. A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1002-1009, 2006.
- KOLLER, L.; NOVÁK, B.; TAMUS, Á. Electrical switching devices and insulators. 2012.
- LANDRY M.; TURCOTTE O.; BRIKCI F. A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breaker. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, pp. 710-716, 2008.
- LEMELSON K. About the Failure of Closed Heavy Current Contact Pieces in Insulating Oil at High Temperature. IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, PHP-9, pp. 50-52, 1973.
- MACHADO T. N. M. Modelação de Séries Temporais - Métodos Lineares e Não Lineares. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação) - Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança, Bragança, 2009.
- MCDONALD J. D. Electric Power Substations Engineering. CRC Press, Flórida, 2003.
- MCDONALD, J. D. Electric power substations engineering. CRC Press, 2012
- NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. High voltage engineering. Tata McGraw-Hill Education, 2009.
- NASRALLAH E.; BRIKCI F.; PERRON S. Electrical contacts in MV & HV power circuit breakers. Electric Energy T&D Magazine, pp. 50-55, 2007.
- OHLEN M.; DUECK B.; WERNLI H. Dynamic Resistance Measurements – A Tool for Circuit Breaker Diagnostics. Stockholm Power Tech International Symposium on Electric Power Engineering, Vol. 6 , pp. 108-113, 1995.

OLIVEIRA A. C. *Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise De Sensibilidade da Corrente E da Velocidade de Abertura dos Contatos*. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, Brasil: Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

OLIVEIRA, H. M., “Análise de Fourier e *Wavelets*: Sinais Estacionários e Não Estacionários”. Recife – PE: Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

OPPENHEIM A. V.; SCHAFER R. W.; BUCK J. R.: *Discrete-Time signal Processing*. Prentice Hall, New Jersey, 1989.

PANCU C.; BARABOI A.; ADAM M. *New Approach Regarding the Electroerosion Estimation of the Circuit Breakers Contacts*. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 8, pp. 157-166, 2009.

PONS A.; SABOT A.; BABUSCI G. *Electrical endurance and reliability of circuit-breakers common experience and practice of two utilities*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 168-174, 1993.

RICCIOTTI, A. C. D.; *Utilização de wavelets no processamento de sinais EMG*. 2006. 72 f. Dissertação de mestrado - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

SANTOS D. T. *Sistema inteligente para apoio a programação da manutenção de disjuntores de alta tensão*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

SMEETS, R. et al. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. [S.l.]:John Wiley & Sons, 2014.

SIEMENS. *Material Elétrico Industrial - Disjuntores de média tensão*. 6ª ed. Disjuntor 3AC, 1988.

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.

SODHA N. S.; SINGH S.; VICTOR S.; TYAGI R. K. *Condition assessment of EHV class circuit breakers using dynamic contact resistance measurement technique*. CIGRE Session Paris, 2012.

SOUZA R. T. & COSTA E. G. *Diagnóstico da Condição dos Contatos em Disjuntores Através da Resistência Dinâmica*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Foz do Iguaçu, 2014.

STANISIC Z. & NEIMANIS R. *A New Ultra Lightweight Method for Static and Dynamic Resistance Measurements*. Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium, pp. 1-4, 2010.

STEWART, S. *Distribution switchgear*, IET, 2004.

SWEETSER, C. et al. *Strategies for selecting monitoring of circuit breakers*. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 17, n. 3, pp. 742-746, 2002

TURCOTTE O. & GAUTHIER R. A thorough examination for circuit breaker health. *Transmission and Distribution World*, pp. 28-32, 2008.

WALKER, J. S. *A primer on Wavelets and their scientific applications*, Chaman & Hall/CRR, 2008.