



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

*Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência
Dinâmica de Contato e Lógica Fuzzy*

Ronimack Trajano de Souza

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Setembro de 2015

Ronimack Trajano de Souza

*Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência
Dinâmica de Contato e Lógica Fuzzy*

*Tese de Doutorado apresentado à Coordenação do Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências
do Programa de Doutorado em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Orientador: Professor Edson Guedes da Costa, D.Sc

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Setembro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S729d Souza, Ronimack Trajano de.

Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência Dinâmica de Contato e Lógica *Fuzzy* / Ronimack Trajano de Souza. - Campina Grande, 2015. 168 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.

"Orientação: Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc."

Referências.

1. Disjuntor.
 2. DRM.
 3. Lógica *Fuzzy*.
 4. Resistência de Contato.
 5. Resistência Estática.
- I. Costa, Edson Guedes da. II Título.

CDU - 621.316(043)

**"DIAGNÓSTICO DE CONTATOS DE DISJUNTORES BASEADO NA RESISTÊNCIA
DINÂMICA DE CONTATO E LÓGICA FUZZY"**

RONIMACK TRAJANO DE SOUZA

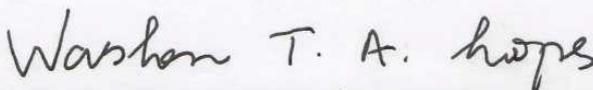
TESE APROVADA EM 10/09/2015



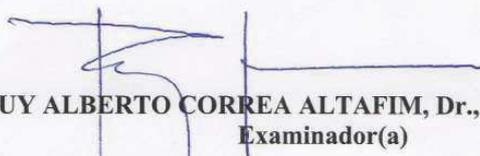
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



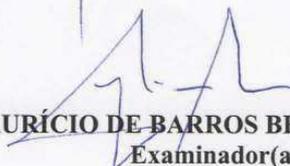
BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFPB
Examinador(a)



RUY ALBERTO CORREA ALTAFIM, Dr., USP-São Carlos
Examinador(a)



JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, D.Sc., UFPE
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradeço,

A Deus, pelas dádivas que tem realizado em minha vida.

Aos meus filhos Níckolas e Miguel, que mesmo sem perceber me mostraram esse caminho e que me rendem felicidades diárias.

A Geo, pelo amor, dedicação, companherismo, e sobretudo muita paciência.

A Edson pelo apoio e confiança na conclusão deste projeto.

A minha família pela confiança incondicional.

Aos co-executores deste trabalho Adriano, Wallison, Jalberth e Valdemir pelo apoio e ajuda sempre presentes.

Aos Funcionários do LAT (Adriano, Chico, Eduardo e Dona Selma) pela ajuda de sempre.

A Luiz e Gabriel por me orientarem no Latex.

Aos Cagepianos, que me proporcionaram excelentes momentos de aprendizado profissional, e sobretudo muita amizade.

Aos amigos Diana, Gilvan e Franklin pelo apoio nas atividades do IFPB.

Ao eng. Simão Almeida da CAGEPA e ao eng. Tércius da Energisa pelo empréstimo dos disjuntores.

Ao eng. Vladimir da Chesf pela sugestão do tema desta pesquisa.

Ronimack Trajano

Resumo

Esta tese apresenta uma nova metodologia para avaliação dos contatos de disjuntores de média e alta tensão, baseando-se na medição da resistência dinâmica (MRD) e lógica *Fuzzy*. Nos testes da MRD, uma curva de resistência é gerada, contemplando valores de resistência de contato referentes às regiões do contato principal e do contato de arco. Os testes foram realizados com disjuntores do tipo PVO (pequeno volume de óleo) de 800 A/15 kV/12,5 kA, 630 A/17,5 kV/12,5 kA e 2.000 A/72,5 kV/31,5 kA e um disjuntor do tipo SF₆ (hexafluoreto de enxofre) de 1.650 A/72,5 kV/25 kA. Para realizar os testes da MRD, um sistema de medição foi projetado e desenvolvido. O sistema utiliza um osciloscópio digital de 4 canais, uma bateria estacionária, de 12 V/220 Ah, resistências para limitar a corrente da bateria, sensores de corrente e tensão e um computador pessoal. O sistema é capaz de determinar os valores da resistência, desde o início da abertura dos contatos até sua separação total. Nesta pesquisa foi desenvolvido um algoritmo para extrair da MRD, os parâmetros característicos: resistência do contato principal e resistência do contato de arco. Desenvolveu-se também um sistema fundamentado em lógica *Fuzzy* para estimar o nível de degradação contatos em função dos parâmetros da MRD. Em função dos resultados obtidos, observou-se que o nível de degradação dos contatos é diretamente proporcional aos valores de resistência de contato, o que permite um diagnóstico preciso da condição dos contatos principal e de arco. A aplicação da lógica *Fuzzy* permitiu a estimativa do nível de degradação dos contatos.

Palavras-chaves: Curva de Resistência. Disjuntor. DRM. Lógica *Fuzzy*. Resistência de Contato. Resistência Dinâmica. Resistência Estática.

Abstract

This thesis presents a new methodology for evaluation of high voltage circuit breaker contacts, based on the dynamic resistance measurement (DRM) and fuzzy logic. In the DRM tests, a resistance curve is generated, contemplating resistance values referring to the main and arcing contact regions. The tests were performed with minimum oil circuit breakers (MOCB) of 800 A/15 kV/12,5 kA, 630 A/17,5 kV/12,5 kA and 2.000 A/72,5 kV/31,5 kA, and a SF₆ circuit breaker of 1.650 A/72,5 kV/25 kA. To perform the DRM tests, a measurement system has been designed and developed, which consists of a 4-channel digital oscilloscope, a stationary battery of 12 V/220 Ah, resistors to limit the current from the battery, current and voltage sensors and a personal computer. The system is able to determine the dynamic resistance values since the beginning of the contact opening process until total separation. In this research, an algorithm was developed to extract from the DRM curves, the characteristic parameters: main contact resistance and arcing contact resistance. A *Fuzzy* logic based system was also developed in order to estimate the contacts degradation level as a function of the DRM parameters. From the obtained results, it was observed that the contact degradation level is directly proportional to the resistance values, allowing an accurate diagnosis of the main and arcing contacts condition. The application of *Fuzzy* logic allowed the estimation of the contacts degradation level.

Keywords: Circuit Breaker, Contact Resistance, DRM, Dynamic Resistance, Fuzzy Logic, Resistance Curve, Static Resistance.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Principais Contribuições da Pesquisa	5
1.4 Organização do Trabalho	6
2 Fundamentação Teórica	8
2.1 Disjuntores de Alta Tensão	8
2.1.1 Disjuntor a SF ₆	11
2.1.2 Disjuntores a óleo	13
2.1.3 Disjuntores a ar comprimido	14
2.1.4 Disjuntor a vácuo	15
2.2 Câmara de Extinção de Arco	17
2.3 Princípio de Extinção do Arco Elétrico	22
2.4 Manutenção em Disjuntores	25
2.4.1 Avaliação do meio isolante	29
2.4.2 Avaliação da parte mecânica	30
2.4.3 Avaliação dos contatos	31

2.5	Medição da Resistência de Contato em Disjuntores	33
2.5.1	Medição da resistência estática de contato (MRE)	34
2.5.2	Medição da resistência dinâmica de contato (MRD)	39
2.6	Lógica <i>Fuzzy</i>	50
2.6.1	Sistema lógico <i>Fuzzy</i>	56
3	Revisão Bibliográfica	61
3.1	Monitoramento de Disjuntores	61
4	Material e Métodos	76
4.1	Material	76
4.1.1	Disjuntores de média tensão	77
4.1.2	Disjuntores de Alta Tensão	79
4.2	Métodos	82
4.2.1	Testes com o analisador de disjuntor SA10, fabricação ELCON	82
4.3	Ensaio da MRD com o sistema desenvolvido	83
4.3.1	Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 800 A - D1	87
4.3.2	Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 630 A - D2	88
4.3.3	Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 2.000A - D3	89
4.3.4	Ensaio da MRD no disjuntor SF ₆ de 1.650 A - D4	90
4.4	Ensaio de degradação	90
4.4.1	Ensaio de aplicação de curto-circuito	93
4.4.2	Ensaio de aplicação de sobrecorrente	95
4.4.3	Ensaio de degradação térmica	97
4.5	Avaliação da influência da corrente de teste no ensaio da MRD	99
4.6	Sistema <i>Fuzzy</i> proposto	100
4.6.1	Elaboração do sistema <i>Fuzzy</i>	101
4.6.2	Regras <i>Fuzzy</i> para o sistema proposto	109
5	Resultados e Análises	112
5.1	Análise do sistema da MRD	112
5.1.1	Projeto do sistema de medição da resistência de contato	113
5.1.2	Resistor limitador de corrente	115

5.2	Análise analítica das curvas da MRD	121
5.2.1	Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 800 A - D1	121
5.2.2	Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 630 A - D2	124
5.2.3	Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 2.000 A - D3	126
5.2.4	Ensaio da MRD no disjuntor SF ₆ de 1.650 A - D4	131
5.3	Ensaio de degradação acelerada	133
5.3.1	Ensaio de degradação com curtos-circuitos	133
5.3.2	Ensaio de degradação com sobrecorrente	135
5.3.3	Ensaio de degradação térmica	139
5.4	Ensaio da MRD em diferentes níveis de corrente de teste	141
5.5	Estudos de casos	145
5.6	Metodologia para aplicação da técnica da MRD	149
6	Conclusões	152
6.1	Contribuições da pesquisa	152
6.2	Sugestão para pesquisas futuras	155
	Referências Bibliográficas	156

Lista de Figuras

2.1	Características construtivas dos disjuntores.	11
2.2	Curva de características dielétricas em função da distância dos contatos.	11
2.3	Disjuntor tipo SF ₆	12
2.4	Disjuntores à óleo do tipo PVO e GVO.	14
2.5	Disjuntores à ar comprimido.	15
2.6	Disjuntor a vácuo de média tensão.	17
2.7	Câmara de extinção de arco disjuntor SF ₆	18
2.8	Detalhes construtivos do contato fixo do disjuntor 3AC - Siemens.	20
2.9	Contatos de disjuntores de alta tensão.	21
2.10	Processo de limpeza dos contatos - Disjuntor tipo SF ₆	22
2.11	Princípio de extinção de arco em um Disjuntor tipo SF ₆	23
2.12	Diagrama básico de operação do microhmímetro.	37
2.13	Esquema de medição da resistência estática de contato em disjuntores.	38
2.14	Perfil da curva da resistência dinâmica versus deslocamento ou tempo de abertura dos contatos de disjuntores.	40
2.15	Analisador de chaveamento.	43
2.16	Arranjo de montagem para ensaio da MRD com ambos os lados do pólo do disjuntor aterrados.	44
2.17	Arranjo de montagem para ensaio da MRD em disjuntores com somente um lado aterrado.	45
2.18	Curva típica da MRD em disjuntores.	47
2.19	Contatos móvel de disjuntor de alta tensão a ar comprimido.	49
2.20	Função de pertinência com três variáveis linguísticas.	53

2.21	Exemplo de função de pertinência da variável linguística frio.	54
2.22	Representação das funções de pertinência das variáveis linguísticas frio, conforto e quente.	54
2.23	Representação de uma função de pertinência gaussiana.	55
2.24	Representação de uma função de pertinência trapezoidal.	55
2.25	Representação de uma função de pertinência triangular.	56
2.26	Fluxograma de etapas do sistema lógico <i>Fuzzy</i>	56
2.27	Inferência <i>Fuzzy</i>	57
2.28	Representações gráficas das técnicas de defuzzificação.	60
4.1	Disjuntores de média tensão.	78
4.2	Amostras de contatos D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4.	79
4.3	Disjuntores de alta tensão.	80
4.4	Amostras de contatos D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3.	81
4.5	Ilustração do arranjo para obtenção da curva $i \times t$ do analisador de disjuntor, modelo SA10 - ELCON.	82
4.6	Curva característica $i(A) \times t(ms)$ para o analisador de disjuntor, modelo SA10 - ELCON.	83
4.7	Fluxograma de ensaio da MRD.	84
4.8	Fluxograma para obtenção dos parâmetros da MRD.	87
4.9	Fotografia do arranjo montado em laboratório para os ensaios da MRD no disjuntor de média tensão de 800 A.	88
4.10	Fotografia do arranjo montado em laboratório para os ensaios da MRD no disjuntor de média tensão de 630 A.	89
4.11	Fotografia do arranjo montado em laboratório para os ensaios da MRD no disjuntor de alta tensão tipo PVO.	90
4.12	Fotografia do arranjo montado em subestação para os ensaios da MRD no disjuntor D4.	91
4.13	Fotografia da Amostra D1-CMT1.	92
4.14	Arranjo do ensaio de degradação dos contatos com aplicação de curto-circuito na amostra D1-CMT4.	94

4.15	Sequência de ensaio de degradação com curtos-circuitos na amostra D1-CMT4. . . .	95
4.16	Detalhes da área de contato no ensaio de sobrecorrente no disjuntor PVO de média tensão de 800 A.	96
4.17	Ilustração do circuito utilizado no ensaio de degradação dos contatos com aplicação de sobrecorrente.	96
4.18	Fotografia do arranjo utilizado no ensaio de degradação dos contatos com aplicação de sobrecorrente.	97
4.19	Sequência de ensaio de degradação por sobrecorrente para o contato D1-CMT3. . . .	97
4.20	Arranjo do ensaio de degradação térmica da amostra D1-CMT1.	98
4.21	Sequência de ensaio de degradação térmica para a amostra D1-CMT1.	99
4.22	Funções de pertinência das variáveis linguísticas para Rp	103
4.23	Funções de pertinência das variáveis linguísticas para Ra	104
4.24	Funções de pertinência das variáveis linguísticas para ND.	108
5.1	Ilustração da região com contato galvânico entre os contatos fixo e móvel durante a abertura dos contatos.	113
5.2	Circuito simplificado para medição da resistência de contato com o sistema proposto.	115
5.3	Curva de capacidade da bateria.	117
5.4	Curva de potência da bateria.	118
5.5	Curva de capacidade da bateria.	119
5.6	Fotografia do sistema da MRD desenvolvido.	120
5.7	Diagrama de blocos simplificado do sistema da MRD.	121
5.8	Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.	122
5.9	Curvas da MRD_F para as amostras D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.	125
5.10	Curvas da MRD_F para as amostras D3-CAT1, D3-CAT2, D3-CAT3 e D3-CAT4, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.	127
5.11	Amostras de contatos do disjuntor D3.	129

5.12	Curvas da MRD para a amostra D3-CAT2, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.	130
5.13	Contato fixo da amostra D3-CAT2.	130
5.14	Curvas da MRD_F para as amostras D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 250 A.	131
5.15	Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT4, em função do ensaio de curto-circuito.	134
5.16	Amostra de contato D1-CMT4 antes e após os ensaios de curtos-circuitos.	136
5.17	Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT3, em função do ensaio de degradação com sobrecorrente.	137
5.18	Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT3, em função do ensaio de degradação com sobrecorrente.	138
5.19	Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT1, em função do ensaio de degradação térmica.	140
5.20	Curvas da MRD_F para D1-CMT1, em velocidade nominal de abertura dos contatos em diferentes níveis de corrente de teste.	142
5.21	Curvas da MRD_F para D1-CMT1, em velocidade nominal de abertura dos contatos em função da corrente de teste.	143
5.22	Comportamento de R_p e R_a em função da corrente de teste para D1-CMT1, em velocidade nominal de abertura dos contatos.	144
5.23	Princípios do algoritmo do sistema <i>Fuzzy</i> desenvolvido.	147
5.24	Nível de degradação da amostra D1-CMT1 pelo método de <i>defuzzificação</i> Média Ponderada dos Máximos.	148
5.25	Interface do sistema para estimativa no nível de degradação das amostras de contatos.	149

Lista de Tabelas

2.1	Origem das falhas em disjuntor.	19
2.2	Origem das falhas em disjuntor.	28
2.3	Valores máximos de resistência de contato estática.	36
3.1	Síntese da revisão bibliográfica.	75
4.1	Principais características do disjuntor de média tensão de 800 A - D1.	77
4.2	Principais características do disjuntor de média tensão de 630 A - D2.	77
4.3	Principais características dos disjuntores de alta tensão tipo PVO de 2.000 A - D3.	80
4.4	Principais características do disjuntor de alta tensão tipo SF ₆ de 1.650 A - D4.	80
4.5	Valores limites das variáveis linguísticas para os parâmetros R_p e R_a em ($\mu\Omega$).	107
5.1	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4.	123
5.2	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3.	126
5.3	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3.	128
5.4	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3.	132
5.5	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT4 no ensaio de curto-circuito.	134
5.6	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT3 no ensaio de degradação com sobrecorrente.	137

5.7	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT1 no ensaio de degradação térmica.	141
5.8	Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT1 em função da corrente de teste.	143
5.9	Nível de degradação das amostras dos disjuntores D1, D2, D3 e D4, degradados em serviço, em função dos parâmetros R_p e R_a	150

Glossário

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CIGRE	<i>Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
GVO	Grande Volume de Óleo
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MRD	Medição de Resistência Dinâmica
MRE	Medição de Resistência Estática
OLTC	<i>On-load Tap-Changers</i>
PTFE	Politetrafluoretileno (teflon)
PVO	Pequeno Volume de Óleo
Ra	Resistência Média do Contato de Arco
Rp	Resistência do Contato Principal
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória

Capítulo 1

Introdução

A falha de operação em um disjuntor pode causar desde a simples falta de energia, a saída de operação das linhas de transmissão, como também destruição de equipamentos da concessionária de energia elétrica. E no pior dos casos, a situação se agrava com a explosão de uma câmara de disjuntor (WäCKLÉN et al., 2008), colocando em risco as vidas dos envolvidos nas regiões próximas a subestação. Como consequência, acarreta-se prejuízos às unidades consumidoras e à concessionária de energia, elevando-se os custos de manutenção, perda de faturamento e, em muitos casos, multas impostas por parte das agências reguladoras.

Garantir o seccionamento de circuitos de energia elétrica, em sistema de transmissão e de distribuição, sempre foi imprescindível, sobretudo em casos de sobrecargas, de curtos-circuitos e de manutenção, onde a imediata interrupção do fluxo de corrente elétrica torna-se necessária como uma medida de proteção e de segurança de equipamentos e de vidas.

Quando do início da utilização da eletricidade como fonte de energia, em que se empregavam baixos níveis de corrente e tensão, os circuitos poderiam ser seccionados ao ar livre, por meio de chaves seccionadoras, utilizando a técnica de alongamento do arco, pela separação dos contatos, e consequente resfriamento do arco elétrico (NASRALLAH et al., 2007b).

Entretanto, com o aumento dos níveis de tensão e de curto-circuito no sistema elétrico, surgiu a necessidade de se extinguir os arcos de alta potência, que a depender da energia associada, tem a capacidade de provocar o desgaste acelerado e até a destruição dos contatos do dispositivo seccionador (NASRALLAH et al., 2007a). Com isso o princípio de interrupção pela simples separação dos contatos logo se tornou inadequado, e dispositivos especiais denominados "disjuntores" foram desenvolvidos.

Os disjuntores são dispositivos de seccionamento que de acordo com o Instituto Nacional Americano de Normas, do inglês *American National Standards Association* (ANSI) C37.100-1992 (ANSI/IEEE, 1992) são definidos como: Dispositivos mecânicos capazes de realizar a condução e interrupção da corrente elétrica sob condições normais de operação do circuito, e também realizar a condução por um tempo específico e interromper as correntes elétricas sob condições anormais do circuito, como as correntes de curto-circuito.

Os disjuntores podem ser operados de forma manual (comando manual no circuito elétrico de fechamento/abertura) ou automática (relé de proteção elétrica). Quando na ocorrência de uma falha no circuito ao qual o disjuntor está associado, os relés de proteção previamente ajustados, enviam um comando para abertura dos contatos do disjuntor, ocorrendo assim, o seccionamento do circuito. Um disjuntor instalado sem um relé de proteção resume-se simplesmente a uma chave de manobra, sem qualquer característica de proteção elétrica (FILHO, 2005).

O disjuntor é um equipamento cujo funcionamento apresenta aspectos bastante singulares. Opera, continuamente, sob tensão e corrente de carga muitas vezes em ambientes hostis, no que diz respeito à temperatura, à umidade, à poluição e a outras intempéries. Em geral, após longo período nestas condições, às vezes meses ou até anos, é solicitado a operar por razão de uma falha ou manobra do sistema elétrico (FILHO, 2005).

Quando solicitado para realizar a abertura dos contatos, todo o seu mecanismo, inerte até então, deve operar de forma rápida e eficaz de modo a limitar ao máximo os danos causados ao disjuntor, pois qualquer falha de operação poderia resultar em elevados danos materiais ao sistema elétrico.

Para que os disjuntores possam desempenhar suas funções cumprindo os requisitos de segurança e confiabilidade, faz-se necessário conhecer o seu estado de operação, principalmente das câmaras de extinção de arco, onde estão instalados os contatos principal e de arco. O contato principal é responsável pela condução da corrente de carga, em condições normais de operação e o contato de arco é responsável pela condução da corrente de arco.

Nos últimos anos diversas técnicas de monitoramento e manutenção em equipamentos de alta tensão têm sido desenvolvidas e/ou aperfeiçoadas. Especificamente para disjuntores, o guia mais atual e adequado para seleção do sistema de monitoramento é o Guia para Seleção de Monitoramento para Disjuntores do IEEE, do inglês *Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers*, publicado

em 2001. Neste guia é apresentada a metodologia denominada Modo de Falha e Análises de Efeitos, do inglês, *Failure Mode Effect Analysis (FMEA)*. O FMEA estabelece as relações entre a forma como a falha se manifesta, a causa da falha e o efeito resultante para o sistema elétrico e aos consumidores de energia elétrica, introduzindo os conceitos de avaliação de risco, onde a prioridade e análise econômica podem ser usadas para determinar quando e onde o monitoramento do disjuntor se justifica (SWEETSER et al., 2002).

Na análise do estado operativo dos disjuntores, um dos elementos avaliados são os contatos principal e de arco nas câmaras de extinção de arco. Atualmente, a avaliação do estado dos contatos nas câmaras de extinção de arco é feita por meio da medição da resistência estática de contato (MRE). No entanto, a resistência estática é determinada com os contatos do disjuntor na posição fechada, e não dá qualquer indicação do estado dos contatos de arco (LANDRY et al., 2006).

Pelo exposto, surge a necessidade de aplicação de técnicas de monitoramento eficientes, capazes de detectar com precisão as condições de operação das câmaras. Nas últimas duas décadas, pesquisas têm sido direcionadas para a medição da resistência dinâmica dos contatos (MRD), como forma de avaliação de ambos os contatos. No ensaio da MRD, as resistências dos contatos principal e de arco são avaliadas individualmente, o que permite uma estimativa do nível de desgaste de cada contato.

1.1 Motivação

Diversos relatos de falhas em disjuntores devido a danos na câmara de extinção constam na literatura. Em muitos casos, algumas dessas falhas poderiam ter sido evitadas, com a implantação de um programa de manutenção bem definido, e com a aplicação de técnicas de diagnóstico mais eficientes (HYDROPOWER, 1999).

Na grande maioria das concessionárias, a análise dos contatos nas câmaras de extinção se restringe a testes da MRE, muitas vezes aplicando equipamentos de teste inadequados (JEYARAJ; HABTAY, 2011). O ensaio da MRE infere somente sobre a condição dos contatos principais. Para avaliar a condição do contato de arco, há a necessidade de inspeção interna na câmara de extinção, indisponibilizando o disjuntor por longo tempo e demandando altos custos de manutenção, podendo ainda dar origem ou acelerar o surgimento de novos problemas no equipamento na etapa de remontagem (LANDRY et al., 2008).

Ao contrário da MRE, a MRD possibilita um diagnóstico mais eficiente e tem se caracterizado como uma técnica promissora na avaliação do estado das câmaras de extinção de arco dos disjuntores. Nos últimos anos diversos trabalhos têm sido desenvolvidos neste tema de pesquisa, entretanto, não existe ainda uma metodologia consensual de medição e análise, que defina parâmetros de referência, onde se possa correlacionar os resultados da MRD ao nível de desgaste dos contatos.

Embora apresente resultados comprovadamente mais eficientes que o ensaio da MRE, a falta de parametrização dos métodos aplicados na obtenção da curva da MRD e a análise da própria curva, dificultam a adoção da técnica da MRD por parte das concessionárias, ficando a análise dos contatos restrita a testes de resistência estática.

Por se tratar de um método em nível incipiente, há a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que demonstrem a confiabilidade e viabilidade técnica da aplicação da MRD, como forma de diagnóstico das condições operacionais dos contatos de disjuntores.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia destinada à medição, processamento e extração de parâmetros de resistência de contato, que permita classificar níveis de degradação em contatos das câmaras de extinção de arco, em disjuntores de média e alta tensão. Para atender tal objetivo, busca-se fomentar o uso da técnica da MRD, e suas restrições de medição, com aperfeiçoamento dos métodos de diagnóstico e demonstração da viabilidade da técnica da MRD, como ferramenta confiável para avaliação do estado evolutivo da degradação dos contatos.

A classificação do nível de degradação dos contatos dará subsídios de forma complementar a outras técnicas de diagnóstico, como ferramenta de apoio à decisão de retirada do equipamento de operação.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da avaliação do nível de degradação dos contatos são:

- projetar, desenvolver e aplicar um sistema alternativo para medição da resistência dinâmica de contato em disjuntores, com abertura dos contatos em velocidade nominal e velocidade

reduzida;

- realizar ensaios de levantamento das curvas da MRD de disjuntores de média e alta tensão, utilizando o sistema alternativo desenvolvido, de modo a comprovar a viabilidade de se realizar o monitoramento de contatos de disjuntores em função da medição da resistência dinâmica de contato;
- apresentar uma nova perspectiva de análise dos parâmetros da MRD na avaliação da degradação dos contatos;
- avaliar a influência no nível da corrente de teste no ensaio da MRD;
- realizar ensaios de degradação acelerada em contatos novos e degradados, de modo a avaliar a influência na degradação nos parâmetros da MRD;
- desenvolver um sistema especialista de apoio à tomada de decisão, fundamento em lógica *Fuzzy*, para aplicação em estudos de caso, de modo a quantificar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros característicos da MRD e das características do disjuntor. Optou-se por utilizar a lógica *Fuzzy* em virtude do restrito número de amostras de disjuntores utilizados. Essa restrição implica diretamente num limitado número de curvas da MRD. Segundo (LINGJIE et al., 2008), a lógica *Fuzzy* supera as dificuldades apresentadas pelos os sistemas baseados em Redes Neurais, que precisam de grandes quantidades de dados na fase de treinamento. O diagnóstico de falhas baseado em modelos *Fuzzy* apresenta como principal vantagem, o fato de permitirem adotar as características essenciais do comportamento, levando em consideração as incertezas e imprecisões associadas a cada parâmetro.

1.3 Principais Contribuições da Pesquisa

Destacam-se as seguintes contribuições deste trabalho para o estado da arte:

- No que tange a realização do ensaio da MRD, desenvolveu-se um sistema de medição de baixo custo, com características para aplicação em ensaios de resistência de contato, com alta precisão, o qual pode ser facilmente replicado e adotado em estudos de resistência de contato em disjuntores e outros equipamentos, em outras instituições de pesquisa e concessionárias de energia elétrica, tanto em laboratório, quanto em subestação.

- Em relação aos parâmetros da MRD avaliados, foi proposto uma metodologia mais criteriosa na avaliação e diagnóstico do nível de degradação dos contatos em disjuntores de média e alta tensão, não se limitando apenas a avaliação da área da curva da MRD ou a medição do comprimento do contato de arco.
- Quanto à metodologia para inserção de níveis de degradação em contatos de seccionadoras, foi aplicada a técnica de imersão em óleo mineral aquecido (ERBRINK, 2011), e outras foram idealizadas, as quais poderão ser aplicadas em diversos trabalhos futuros, no desenvolvimento e teste de sistemas de diagnóstico de degradação de contatos de disjuntores e outros equipamentos do sistema elétrico que adotem a técnica de seccionamento ou comutação de carga por meio de contatos móveis, como por exemplo, chaves seccionadoras, religadores, reguladores de tensão, entre outros.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho é composto por 6 capítulos, discutidos a seguir.

O Capítulo 2 aborda uma fundamentação teórica sobre disjuntores e suas principais características. Apresenta-se também nesse capítulo um embasamento teórico acerca da lógica *Fuzzy* e suas particularidades.

O Capítulo 3 aborda uma revisão bibliográfica acerca dos métodos de monitoramento das câmaras de extinção de arco, com ênfase para as técnicas que empregam como parâmetro de diagnóstico, a resistência de contato.

O Capítulo 4 aborda o material e procedimentos experimentais e ensaios da MRD. O objetivo dos ensaios da MRD é fornecer subsídios à identificação do estado de operação de contatos de disjuntores, de modo a possibilitar o provimento de um diagnóstico do estado dos contatos com base nas características extraídas da MRD. Neste capítulo são apresentados ainda os procedimentos de ensaios de degradação acelerada em contatos de disjuntores. Com os ensaios de degradação acelerada é possível reproduzir em laboratório, degradação nos contatos, com características similares aos contatos de disjuntores em serviço. O objetivo dos ensaios de degradação foi ampliar o banco de dados das curvas da MRD. Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. E ao final do capítulo é apresentado o sistema de apoio à tomada de decisão baseado em lógica

Fuzzy, desenvolvido para quantificar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros característicos da MRD e das características do disjuntor.

O Capítulo 5 aborda os resultados obtidos a partir do emprego da MRD, assim como, as suas respectivas análises. Neste capítulo é abordado também os resultados da aplicação do sistema desenvolvido, para aplicação em estudos de caso, de modo a quantificar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros característicos da MRD e das características do disjuntor, utilizando técnicas de apoio à tomada de decisão fundamentada na lógica *Fuzzy*.

Por fim, O Capítulo 6 aborda as conclusões e contribuições deste trabalho.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada uma base teórica para auxiliar o leitor no entendimento da pesquisa, sendo descritos os principais tópicos relacionados a disjuntores de média e alta tensão, enfocando tipos de disjuntores, características e métodos de monitoramento. Nos métodos de monitoramento é dada maior ênfase ao monitoramento através da medição da resistência de contato, foco principal desta pesquisa.

2.1 Disjuntores de Alta Tensão

Os disjuntores são equipamentos eletromecânicos cuja função precípua no sistema elétrico é interromper as correntes de defeitos, em especial as correntes provenientes de curto-circuito na rede elétrica (ANSI/IEEE, 1992). Os disjuntores devem ser mecanicamente capazes de abrir em tempos tão curtos quanto o sistema necessita, geralmente de 3 a 5 ciclos, mesmo tendo permanecido na posição fechada por vários meses, de modo a limitar os efeitos de degradação dos seus contatos, bem como para controlar o tempo de duração da falta (GARZON, 2002). Concomitantemente, eles devem ser capazes de estabelecer e interromper a corrente nominal ou inferior, e de isolar trechos da rede elétrica quando na posição aberta (FRONTIN, 2013).

Quando os contatos do disjuntor se encontram na posição fechada, eles devem apresentar entre si uma impedância muito pequena, e quando se encontram na posição aberta, tem-se idealmente uma impedância de valor infinito e na prática uma impedância extremamente elevada. O disjuntor deve ser capaz de alterar o seu estado de fechado para aberto ou de aberto para fechado a partir de quaisquer condições do circuito, quando assim solicitado, a uma taxa de variação da impedância, que é compatível com os parâmetros do circuito. Se a taxa de variação da impedância entre os

contatos do disjuntor 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, 1982).

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 segundo especificações do fabricante;
- isolar a tensão do sistema, em relação ao terra, e entre seus pólos, sob quaisquer condições do meio ambiente (sob chuva, a seco, em atmosfera poluída, etc.);
- ser compacto, com adequada resistência mecânica, de modo a suportar as vibrações ocasionadas nas operações de fechamento e abertura;
- requerer pouca manutenção.

A necessidade de realizar todas essas tarefas de forma absolutamente confiável, para impedir 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 interrupção e extinção de arco: compartimento fechado do disjuntor que envolve de forma estanque os contatos elétricos em um meio isolante (ar comprimido, óleo, gás SF₆, vácuo) utilizado para o isolamento entre os pólos e a carcaça, bem como a extinção do arco elétrico;
- mecanismo de operação: sistema mecânico composto por molas, mecanismo pneumático ou hidráulico que fornecem a energia necessária para fechar ou abrir os contatos do disjuntor. Operam de forma manual através de manoplas ou através de atuadores elétricos;

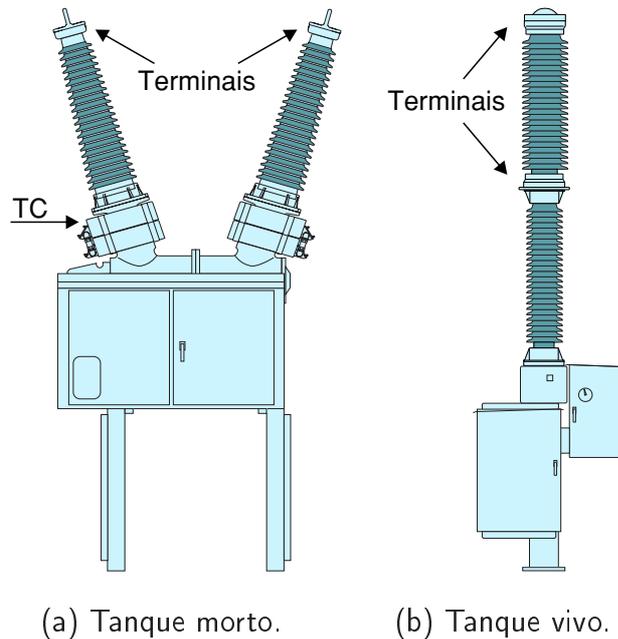
- circuito de controle: sistema elétrico, associado aos relés de proteção, com acionamento local e/ou remoto, responsável pelas ações de comando para as operações de fechamento e abertura dos contatos do disjuntor.

Os disjuntores são classificados baseando-se em critérios, tais como: tensão de aplicação, local de instalação (interno ou externo), características de construção e o mais importante, o princípio utilizado na extinção do arco elétrico proveniente da abertura em potenciais elevados (GARZON, 2002).

Quanto às características de construção, há duas categorias de disjuntores: uma onde a câmara de extinção é metálica e aterrada, denominado tanque morto (*dead tank*), e outra onde a câmara é isolada do terra, denominado tanque vivo (*live tank*). Nos disjuntores do tipo tanque morto, o óleo isolante ou gás, possui além da função de extinguir o arco elétrico, proporcionar o isolamento entre as partes energizadas e o tanque de metal ligado ao terra (BHEL, 2007). Possuem como principal vantagem a possibilidade de instalação de transformadores de corrente (TC) no próprio equipamento, em ambos os lados do pólo, em sistemas que requerem múltiplos TC para proteção, implicando uma redução de custos (SMEETS et al., 2014). Nos disjuntores do tipo tanque vivo a quantidade de óleo ou gás utilizado para interromper o arco é minimizada, tendo em vista que nenhuma quantidade adicional é necessária para o isolamento do tanque ao terra (MCDONALD, 2012). Possuem como principal vantagem o *design* compacto, o que implica em utilizar baixa quantidade de meio isolante (óleo ou gás) e necessitar de pequena área para instalação (SMEETS et al., 2014). Na Figura 2.1 são apresentadas ilustrações de disjuntores do tipo tanque morto e tanque vivo.

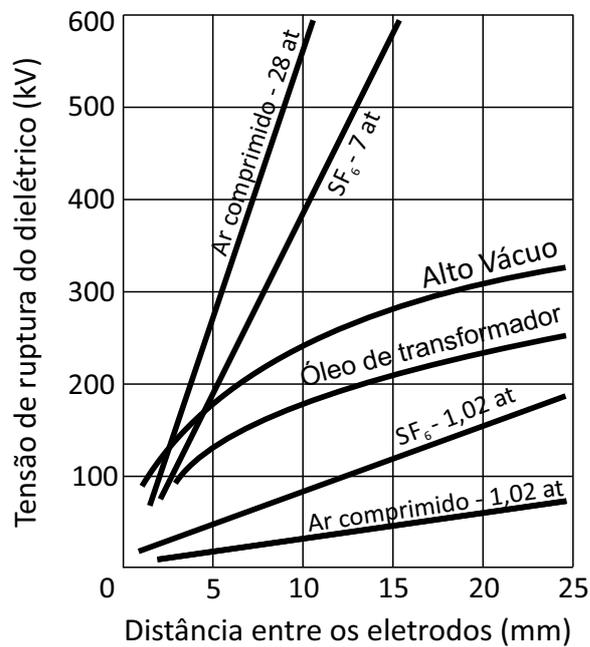
No que se refere ao princípio de extinção do arco, que se forma a partir do meio ionizado, entre os contatos já separados, a corrente só poderá ser interrompida por um disjuntor capaz de extinguir o arco elétrico (MCDONALD, 2012). As tecnologias do meio extintor para a interrupção do arco elétrico são SF₆, óleo mineral, ar comprimido e vácuo. Na Figura 2.2 é apresentado um gráfico comparativo entre tensão versus distância entre eletrodos imersos em meio isolante como óleo, ar comprimido, SF₆ e vácuo.

Figura 2.1 – Características construtivas dos disjuntores.



Fonte: (SIEMENS, 2006).

Figura 2.2 – Curva de características dielétricas em função da distância dos contatos.



Fonte: (KOLLER et al., 2012).

2.1.1 Disjuntor a SF₆

O gás SF₆ é um quimicamente muito estável, não inflamável, não corrosivo, não venenosas, incolor e inodoro. Ele tem um peso molecular de 146,06 e é um dos mais pesados gases conhecido. Além

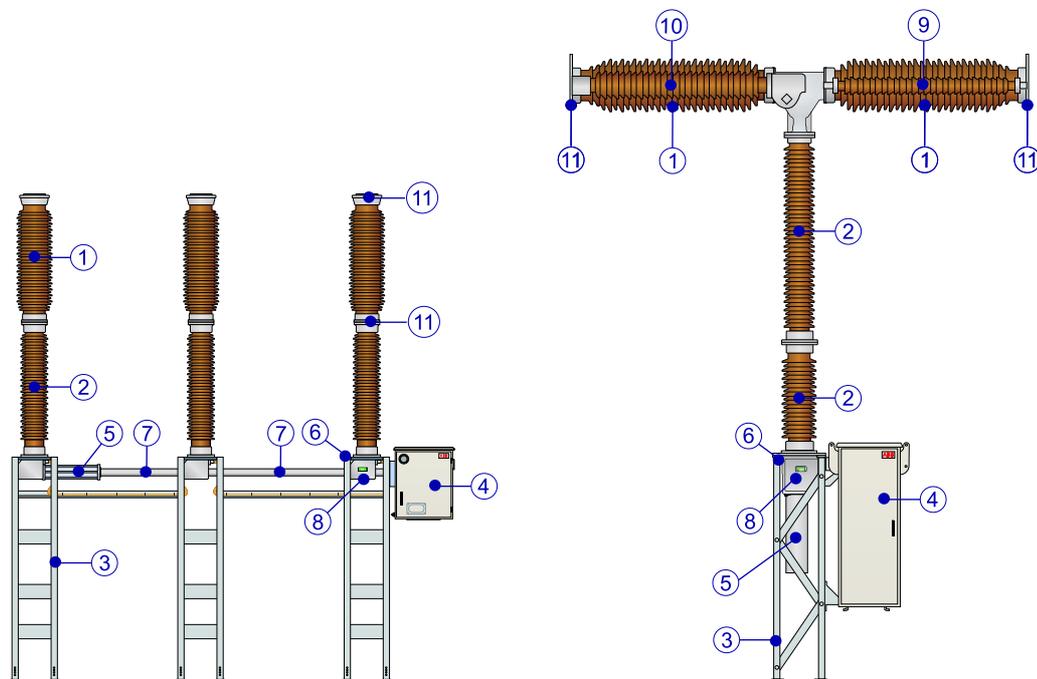
disso, é um excelente dielétrico gasoso que, sob condições semelhantes, tem mais que o dobro da capacidade dielétrica do ar, e a 3 atm de pressão, tem aproximadamente a mesma rigidez dielétrica de óleo. Tem ainda como vantagem, o fato de conservar a maior parte das suas propriedades dielétricas, mesmo quando misturado com proporções substanciais de ar (GARZON, 2002).

Os disjuntores do tipo SF₆ são utilizados em todos os níveis de tensão de 72.5 kV a 800 kV (GARZON, 2002).

Existem basicamente três tipos de disjuntores a SF₆, sendo eles: dupla pressão, que possui dois vasos de pressão, autocompressão, que possui um único vaso de pressão e arco girante, em que o arco elétrico é deslocado ao longo dos contatos (FILHO, 2005).

Na Figura 2.3 são apresentadas ilustrações de dois modelos de disjuntores a SF₆ para sistemas de alta tensão. Sendo: 1. Câmara de extinção de arco; 2. Suporte isolador; 3. Estrutura de suporte; 4. Mecanismo de operação; 5. Mecanismo de operação (fechamento/abertura); 6. Supervisor de gás; 7. Haste de operação; 8. Indicador de posição (aberto/fechado); 9. Capacitor de equalização (se necessário); 10. Resistor de pré-inserção (se necessário) e 11. Terminais primários.

Figura 2.3 – Disjuntor tipo SF₆.



Fonte: (ABB, 2013).

2.1.2 Disjuntores a óleo

Em disjuntores a óleo, a abertura dos contatos ocorre no interior da câmara de extinção que contém óleo mineral isolante naftênico ou parafínico (FLURSCHEIM, 1982). O óleo é usado como mecanismo de arrefecimento para diminuir a temperatura do arco e usar a pressão do óleo para alongar o arco através de um defletor, permitindo extinção do arco, quando a corrente passa pelo zero (MCDONALD, 2012).

Neste tipo de disjuntor os contatos móveis são geralmente de forma cilíndrica com uma ponta formada por uma liga de cobre-tungstênio muito resistente à ação corrosiva do arco elétrico (STEWART, 2004). Os contatos fixos são construídos em forma de tulipa com a extremidade ovalada (NASRALLAH et al., 2007a).

Os disjuntores a óleo se classificam em dois diferentes tipos no que se refere ao volume, sendo eles: grande volume de óleo (GVO) e pequeno volume de óleo (PVO).

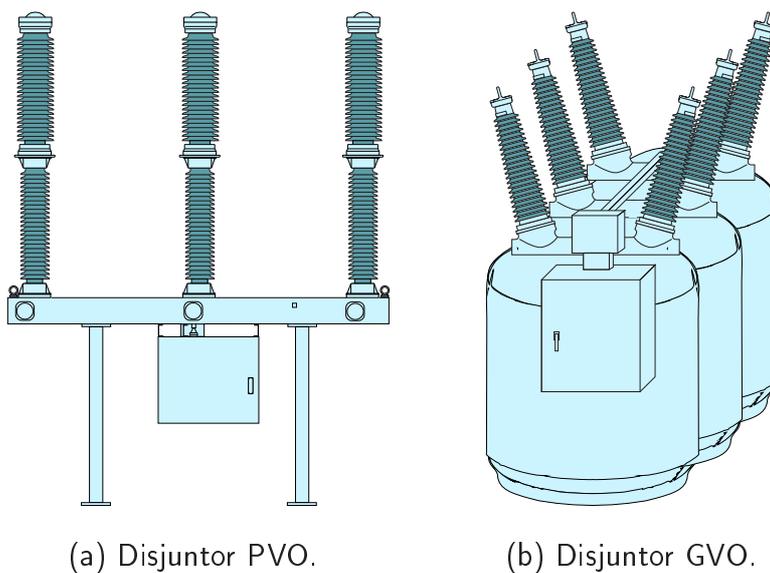
Os disjuntores do tipo GVO são utilizados para todos os níveis de tensão entre 1 kV e 330 kV. (BHEL, 2007). Nos disjuntores do tipo GVO, há duas configurações, tanque simples, com os contatos dos três pólos instalados no interior de um único recipiente contendo uma grande quantidade de óleo mineral isolante, ou com três tanques, em que cada tanque é utilizado individualmente para cada pólo (MCDONALD, 2012). Para os disjuntores GVO, o óleo mineral tem além da função de extinguir o arco elétrico, proporcionar o isolamento entre as partes energizadas e o tanque de metal ligado ao terra (BHEL, 2007).

Os disjuntores do tipo GVO possuem alta capacidade de interrupção em curto-circuito (FILHO, 2005). Entretanto, utilizam uma grande quantidade de óleo (aproximadamente 50.000 litros para 230 kV) (GARZON, 2002). Devido a grande quantidade de óleo utilizado, há um eminente risco de incêndio por ocasião de uma falha de operação no disjuntor (MCDONALD, 2012).

Os disjuntores do tipo PVO são utilizados para todos os níveis de tensão entre 1 kV e 765 kV. (BHEL, 2007). Nos disjuntores do tipo PVO a câmara de interrupção é isolada do terra por meio de isoladores, em que cada câmara é utilizado individualmente para cada pólo (GARZON, 2002).

Para os disjuntores PVO, o óleo mineral tem como única função extinguir o arco elétrico, o que os tornam compactos, entretanto, são sensíveis a TRT de pico (BHEL, 2007).

Na Figura 2.4 são apresentadas ilustrações de disjuntores do tipo PVO e GVO.

Figura 2.4 – Disjuntores à óleo do tipo PVO e GVO.

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

2.1.3 Disjuntores a ar comprimido

Os disjuntores a ar comprimido utilizam o ar comprimido como meio de extinção do arco elétrico e, na maioria das vezes, para isolamento e acionamento dos contatos móveis (GARZON, 2002).

Nos disjuntores a ar comprimido, as câmaras de extinção de arco são pressurizadas com ar a pressão acima de 10...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 (FILHO, 2005).

Neste tipo de disjuntor o ar comprimido é injetado sobre a região entre os contatos, resfriando o meio e o arco elétrico até a sua extinção (GREMMEL; KOPATSCH, 2001).

Há duas técnicas usuais empregadas para extinguir o arco elétrico por meio de ar comprimido: sopro axial e sopro radial, geralmente preferidos para aplicações de alta tensão, e sopro transversal, usado para aplicações que envolvem média tensão e correntes de interrupção muito elevadas (GARZON, 2002).

Os disjuntores a ar comprimido tem sido aplicados em sistemas de alta tensão acima de 245 kV, especialmente quando rápidas operações de abertura são requeridas (BHEL, 2007).

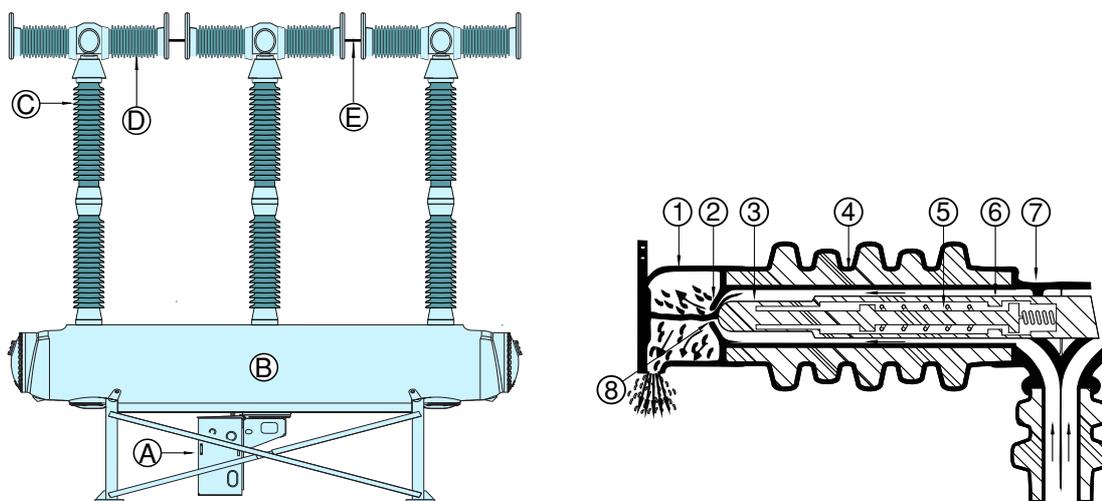
Na Figura 2.5(a) é apresentada uma ilustração um disjuntor a ar comprimido multicâmara, ligadas em série para aumentar a capacidade de interrupção e aumentar a suportabilidade do disjuntor frente a tensão de restabelecimento transitória (GARZON, 2002). Sendo: A. mecanismo de

acionamento; B. reservatório de ar comprimido C. suporte isolador; D. câmara de extinção de arco; E. conexão elétrica entre câmaras; 1. câmara de extinção de arco; 2. contato fixo; 3. contato móvel; 4. suporte isolador; 5. Tirante; 6. Tubo de contato; 7. coletor de ar; 8. contato de arco.

Na Figura 2.5(b) é apresentada a ilustração de uma câmara de extinção de arco do tipo sopro axial. Cada câmara do disjuntor é constituída por um isolador de porcelana, montado no colector de admissão de ar, com a câmara de escape fixado na extremidade oposta da porcelana.

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). A operação dos disjuntores a ar comprimido, muitos dos quais ainda continuam em operação, sempre produz um grande ruído causado pela exaustão de ar para atmosfera. Uma redução do nível de ruído produzido é obtida por meio de silenciadores (FRONTIN, 2013).

Figura 2.5 – Disjuntores à ar comprimido.



(a) Disjuntor a ar comprimido, multi câmaras.

(b) Câmara de extinção típica.

Fonte: (a) Adaptado:(LAUGHTON; SAY, 2013), (b) (BHEL, 2007).

2.1.4 Disjuntor 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 vácuo¹. Para este tipo de disjuntor, a ampola a vácuo funciona como uma

¹Para isolação elétrica, admite-se condição de vácuo uma 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)

câmara de extinção do arco, onde os contatos fixo e móvel são montados no interior da câmara à vácuo. Os materiais mais usados na fabricação dos contatos são as ligas CuBi, CuCr or CuAg. Sendo o CuCr o que apresenta as características melhores para todos os níveis de corrente de 8 kA a 63 kA (BHEL, 2007).

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 estas partículas. No caso de disjuntores a vácuo, os íons positivos e elétrons são fornecidos pela nuvem de partículas metálicas provenientes da evaporação dos contatos formando durante o processo de abertura dos contatos (BHEL, 2007).

Quando os contatos se separam, uma descarga em forma de vapor metálico é estabelecida pela corrente a ser interrompida, a qual flui através deste plasma até a próxima passagem por zero. O arco é então extinto e o vapor metálico condutivo condensa sobre superfícies metálicas em poucos microssegundos, restabelecendo rapidamente a rigidez dielétrica entre os contatos (NOGUEIRA, 2006).

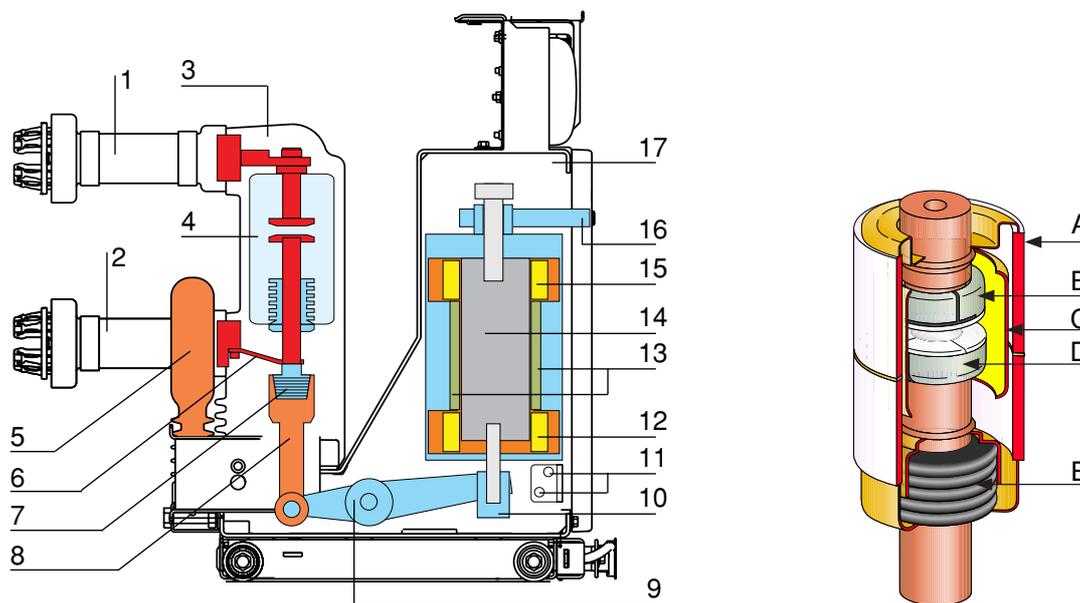
A intensidade da nuvem de vapor metálico é diretamente proporcional a intensidade da corrente de arco, desse modo, correntes de pequena intensidade não mantêm a descarga do vapor metálico, sendo interrompidas antes da passagem do zero (FILHO, 2005).

O arco que se forma nos disjuntores a vácuo não é resfriado. O plasma de vapor metálico é altamente condutivo, resultando em uma tensão de arco excepcionalmente baixa com valores limitados a 200 V (FILHO, 2005). Por este motivo, e devido à pequena duração do arco, a energia dispersada no local de extinção é muito reduzida. Isso explica a elevada expectativa de vida elétrica dos contatos.

Os disjuntores a vácuo são especialmente utilizados em sistema de média tensão, de 3 kV até cerca de 20 kV, faixa em que apresentam tecnologia dominante, frente aos outros tipos de disjuntores (GARZON, 2002). Na Figura 2.6(a) é apresentada a ilustração de um disjuntor a vácuo de média tensão, utilizado em painéis elétricos. Sendo: 1 - Terminal superior; 2 - Terminal inferior; 3 - Pólo em resina; 4 - Ampola a vácuo; 5 - Sensor de corrente; 6 - Conexão flexível; 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 2.6(b) é apresentada a ilustração de uma ampola a vácuo, com detalhes dos principais componentes,

sendo: A. Câmara cerâmica; B. Blindagem; C. Contato fixo; D. Contato móvel; E. Fole metálico.

Figura 2.6 – Disjuntor a vácuo de média tensão.



(a) Disjuntor a vácuo.

(b) Componentes do interruptor a vácuo.

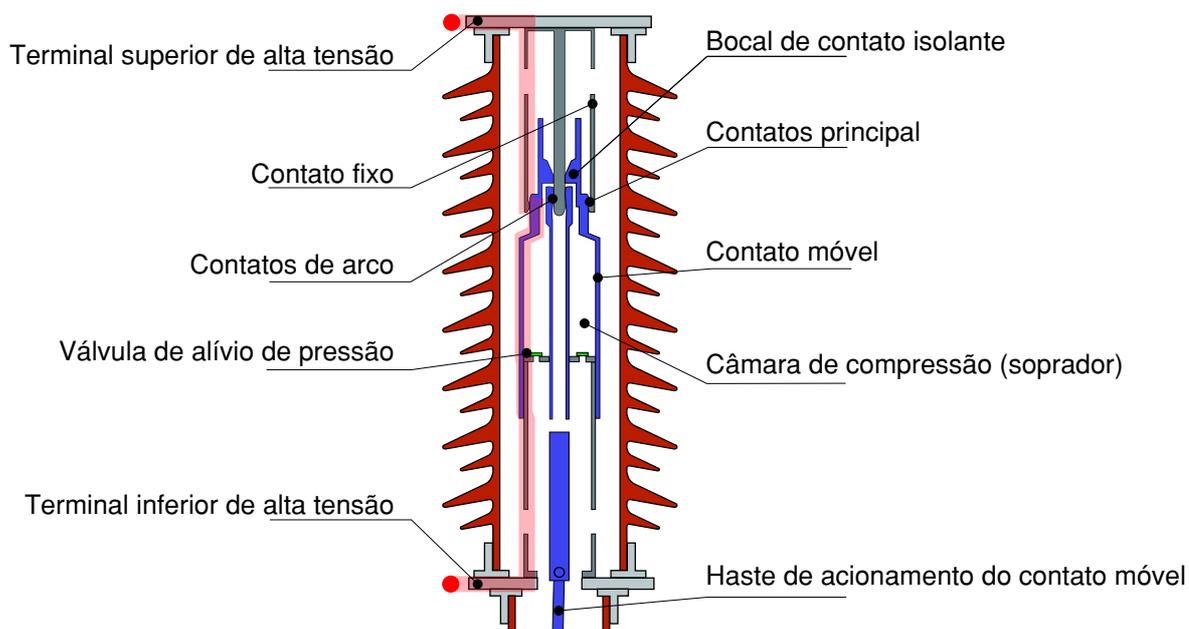
Fonte: (a) (ABB, 2009), (b) (SCHNEIDER, 2014).

2.2 Câmara de Extinção de Arco

A câmara de extinção deve ser projetada para resistir às solicitações térmicas e mecânicas do arco, proporcionando em conjunto com o meio isolante, condições favoráveis à extinção do arco elétrico. Além disso, a câmara e componentes devem ser projetados para suportar as solicitações químicas, que podem deteriorar os componentes internos e as vedações da câmara, dando origem a vazamentos do meio isolante.

O fechamento entre os pólos (lado fonte e lado carga) do disjuntor ocorre no interior da câmara de extinção. O disjuntor se encontra na posição fechada quando há o contato galvânico entre os contatos principais dos contatos fixo e móvel, de modo complementar, o disjuntor se encontra na posição aberta, quando não há o contato galvânico entre os contatos fixo e móvel. Na Figura 2.7 é apresentada a ilustração de uma câmara de extinção para um disjuntor SF₆, tipo dupla pressão, fabricação ABB.

Os contatos fixo e móvel possuem de duas regiões distintas, denominadas de contato principal e contato de arco. Com o disjuntor na posição fechada, a corrente elétrica circula entre o contato

Figura 2.7 – Câmara de extinção de arco disjuntor SF₆.

Fonte: (ABB, 2013).

principal do contato móvel e o contato principal do contato fixo.

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).

Os contatos de arco se destinam a fechar primeiro durante a operação de fechamento e abrir por último na operação de abertura dos pólos. A configuração dos contatos depende do tipo de disjuntor e da capacidade de corrente nominal e de curto-circuito (HOERAUF; SHIPP, 1991).

O processo de concepção dos contatos elétricos envolve uma combinação de materiais e geometria, que visam obter excelentes características elétricas e mecânicas, agregadas a aspectos técnicos e econômicos realacionados às fases de fabricação e manutenção (TEPPER et al., 2006).

Os contatos utilizados no circuito seccionador dos disjuntores devem apresentar capacidade de suportabilidade ao calor gerado pela corrente de carga, e principalmente pelo arco elétrico, sem que apresente degradação excessiva. Adicionalmente, eles também precisam ter boas propriedades de condução, de forma a apresentar baixa resistência elétrica entre os contatos, quando o disjuntor se

encontra na posição fechada (GARZON, 2002).

No que tange às propriedades de condução, os contatos fabricados a partir de tungstênio apresentam excelentes propriedades de resistência ao arco elétrico, devido ao seu elevado ponto de fusão (3.653 K), sendo utilizados na fabricação dos contatos de arco. A alta resistividade ($5,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) do tungstênio os tornam inadequados para serem utilizados como contato principal. Os contatos produzidos a partir de ligas de tungstênio têm geralmente a sua superfície banhada com prata para melhorar a condutividade (NASRALLAH et al., 2007a).

Por outro lado, os contatos a base de cobre e prata apresentam maior condutividade, mas apresentam propriedades relativamente inferiores de resistência ao arco elétrico, quando comparados ao tungstênio, sendo utilizados principalmente na fabricação dos contatos principais (GARZON, 2002). Na Tabela 2.1 são apresentadas as características elétricas e térmicas dos principais materiais utilizados na fabricação de contato elétrico.

Tabela 2.1 – Origem das falhas em disjuntor.

Material	Resistividade ρ ($10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$)	Módulo de Elasticidade H (10^3 kg/cm^2)	Temperatura de Amolecimento (K)	Temperatura de Fusão (K)
Ouro	2,2	2 - 7	373	1136
Prata	1,63	3 - 7	423	1233
Alumínio	2,9	1,8 - 4	423	931
Zinco	6,16	3 - 4	443	692
Cobre	1,8	4 - 7	463	1356
Níquel	9	7 - 20	793	1728
Prata	11	4 - 8	813	2046
Molibdênio	4,8	18	1172	2883
Tungstênio	5,5	12 - 40	1273	3653

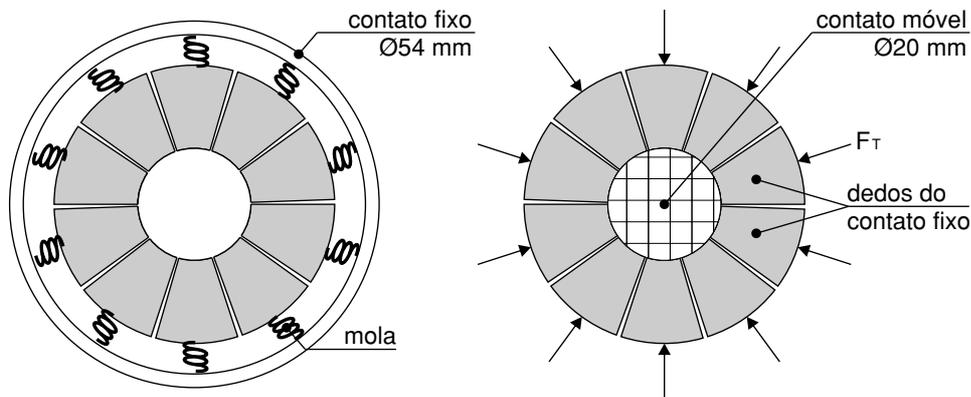
Fonte: (GARZON, 2002).

No que se refere à geometria, os contatos são geralmente construídos de duas formas. A primeira, o contato é formado por uma haste sólida oca ou não, que se desloca durante a abertura e fechamento, denominado contato móvel. A segunda, o contato é formado por uma carcaça cilíndrica com dedos de contato, que permanece imóvel durante a abertura e fechamento, denominado contato

fixo (NASRALLAH et al., 2007a).

Na Figura 2.8 é apresentada uma ilustração dos detalhes construtivos do contato fixo de um disjuntor de média tensão tipo PVO, modelo 3AC, fabricação Siemens.

Figura 2.8 – Detalhes construtivos do contato fixo do disjuntor 3AC - Siemens.



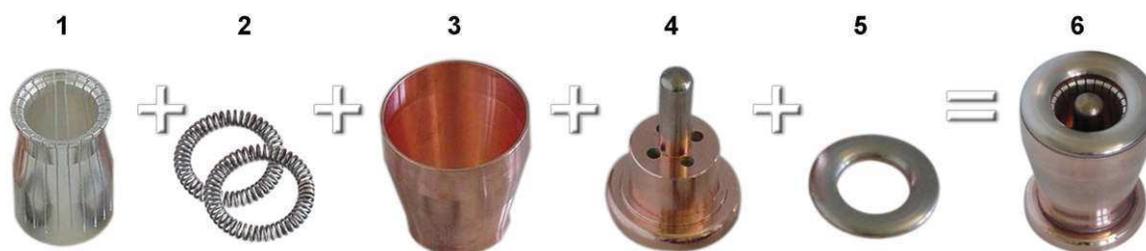
Fonte: Próprio autor.

Os dedos de contato têm por objetivo melhorar o contato galvânico entre os contatos fixo e móvel, sendo a pressão em cada dedo do contato exercida por molas (LEVI, 2011). Segundo (LANDRY et al., 2008) *apud* (PAULKE et al., 2002) a resistência de contato (R_c) formada entre os dedos do contato fixo e o contato móvel pode ser determinada pela Equação 2.1. Sendo: ρ - resistividade específica do material; H_k - módulo de elasticidade do material; F_T - força total sobre o contato.

$$R_c = \frac{\rho \times \sqrt{\pi \times H_k}}{2 \times \sqrt{F_T}} \quad (2.1)$$

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). Na Figura 2.9(a) são apresentadas ilustrações das partes que compõem um tipo comum de contato fixo. Na Figura 2.9(b) são apresentadas ilustrações de diferentes tipos de contato móvel, sendo o contato de arco a região mais escura na extremidade do contato. Sendo: 1 - dedos de contato principal; 2 - mola de pressão dos dedos de contato; 3 - carcaça cilíndrica do contato fixo; 4 - haste do contato de arco; 5 - anel de arco e 6 - contato fixo.

Figura 2.9 – Contatos de disjuntores de alta tensão.



(a) Contato fixo.



(b) Contato móvel.

Fonte: (PLANSEE, 2014), (b)(VIP, 2014).

Outra característica da geometria dos contatos é que sua configuração possa contribuir para proporcionar a remoção de parte dos subprodutos neles depositados, provenientes dos gases e partículas dos contatos formados em virtude do arco voltaico.

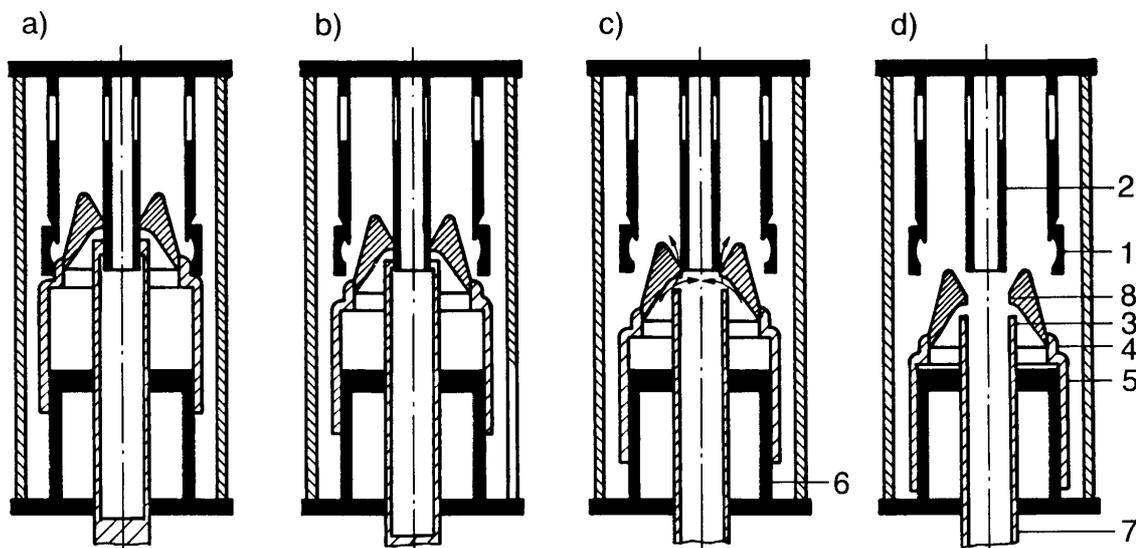
Os subprodutos depositados nos contatos podem diminuir os níveis de isolamento interna provocando reiginição do arco durante a abertura dos contatos em baixas correntes (PONS et al., 1993). Além disso, os subprodutos podem formar uma camada isolante no contato aumentando a resistência entre os contatos na posição fechada (NASRALLAH et al., 2007b).

A ação de limpeza nos contatos é executada na operação de fechamento, quando o contato móvel desliza sobre os dedos do contato fixo, até parar na posição fechada, proporcionando um melhor contato galvânico e contribuindo para remoção dos subprodutos depositados na superfície dos contatos (NASRALLAH et al., 2007b).

Na Figura 2.10 é ilustrado o princípio utilizado na limpeza dos contatos, durante uma operação de fechamento dos contatos do disjuntor. No estágio *a*), os contatos se encontram na posição aberta, e no estágio *d*), os contatos se encontram na posição fechada. Nos estágios *b*) e *c*), onde há um contato galvânico entre os contatos fixo e móvel, o contato móvel desliza sobre o contato

fixo, auxiliando na limpeza entre os eles.

Figura 2.10 – Processo de limpeza dos contatos - Disjuntor tipo SF₆.



Fonte: (GREMMEL; KOPATSCH, 2001).

2.3 Princípio de Extinção do Arco Elétrico

O arco elétrico é uma descarga elétrica auto-sustentável, que se forma entre pelo menos dois eletrodos, separados através de um material normalmente não condutivo. Quando estabelecido, ele apresenta uma baixa queda de tensão entre os eletrodos e, é capaz de conduzir grandes correntes, comportando-se como uma resistência não-linear (GARZON, 2002).

O arco elétrico é constituído por plasma térmico que é composto de íons e elétrons provenientes do dielétrico (ar, óleo, SF₆) e a partir de vapores metálicos, proveniente dos contatos do disjuntor (ZIANI; MOULAI, 2009). O arco elétrico produzido tem uma elevada quantidade de energia, podendo sua temperatura atingir aproximadamente 30.000 K (CAO et al., 2011). Os níveis de temperatura alcançados variam em função da intensidade do arco e do meio extintor utilizado (FILHO, 2005).

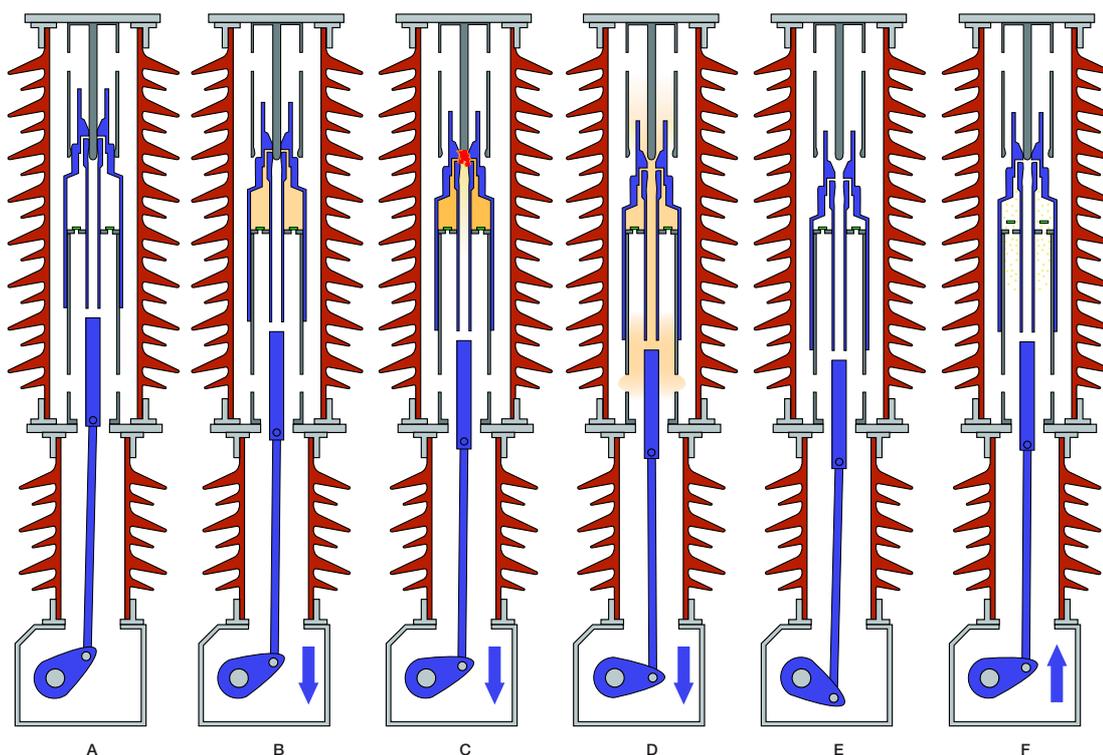
Na operação de abertura dos contatos do disjuntor, quando há corrente elétrica entre os contatos, o fluxo de corrente elétrica, formado a partir dos gases ionizados, pode continuar através do arco elétrico, mesmo com os contatos separados.

Para se extinguir o arco elétrico, a forma mais eficiente é deionizar a zona do arco, injetando um fluxo constante de gás deionizado ou outro composto que tenha característica isolante, como ar,

óleo ou SF₆ (GUPTA et al., 2010). O composto reduz a temperatura do meio ionizado, resfriando-o e contribuindo para a extinção do mesmo (PINNEKAMP, 2007). Com isso, o arco é extinto na próxima passagem da corrente por zero. O fluxo contínuo do composto deioniza o meio entre os contatos e estabelece a rigidez dielétrica para evitar uma reignição do arco (STEWART, 2004).

A Figura 2.11 apresenta o processo de extinção do arco, de um disjuntor SF₆ do tipo autocompressão, de acordo com a seguinte sequência de operação.

Figura 2.11 – Princípio de extinção de arco em um Disjuntor tipo SF₆.



Fonte: (ABB, 2013).

Estágio A - Disjuntor na posição fechada: a corrente de carga é conduzida através dos contatos principais.

Estágio B - Processo de separação dos contatos principais: com os contatos em movimento, há a separação dos contatos principais. A corrente é comutada para os contatos de arco. Há o aumento da pressão no compartimento da câmara do soprador.

Estágio C - Processo de separação dos contatos de arco: após a separação dos contatos de arco, o arco elétrico é estabelecido entre os contatos já separados. O calor do arco provoca o aumento da pressão na câmara do soprador.

Estágio D - Extinção do arco: a corrente se aproxima de zero e o gás da câmara do soprador é

injetado sobre os contatos de arco através do bocal, causando o arrefecimento do arco e extinguindo-o. A pressão excessiva na câmara do soprador é liberada através do bocal.

Estágio E - Contatos abertos: os contatos estão agora totalmente abertos. O mecanismo de operação amortece o movimento de abertura até a posição final dos contatos.

Estágio F - Fechamento dos contatos: durante o fechamento dos contatos, o compartimento da câmara onde ocorreu o arco é recarregado com gás frio, tornando-se apta para a próxima operação de abertura.

Após a interrupção de um arco elétrico em corrente alternada, surge uma tensão entre os contatos já separados do seccionador. Esta tensão é denominada tensão de restabelecimento transitória (TRT)(IVANKOVIĆ et al., 2009). Quando há o seccionamento do circuito seguida da ocorrência de um arco elétrico, o meio extintor age sobre o arco extinguindo-o. Entretanto, se a taxa de aumento ou amplitude da TRT atinge níveis superiores a suportabilidade dielétrica do meio extintor para um determinado espaçamento, haverá a ruptura dielétrica, com sucessivas reignições do arco, até que a distância entre os contatos se torne suficientemente grande, para que sua capacidade dielétrica exceda a tensão entre os contatos do disjuntor (BOJIĆ et al., 2013). As reignições de arco são fenômenos indesejados, que podem ocasionar a falha no disjuntor (KAM et al., 2011).

Há uma série de teorias relativas à interrupção da corrente elétrica e reignição do arco elétrico, e a maioria destas baseiam-se em duas teorias originais de Cassie ou Slepian (GARZON, 2002), (STEWART, 2004):

Segundo a teoria de Cassie: "[...] se a energia dissipada a partir da coluna de arco na passagem da corrente por zero, exceder o fornecimento de energia a partir do circuito elétrico externo haverá reignição do arco [...]".

Segundo a teoria de Slepian: "[...] se, após a interrupção da corrente na passagem por zero, a rigidez dielétrica do meio entre os contatos aumenta a uma taxa maior que a tensão transitória, não haverá reignição do arco [...]".

Na interrupção de correntes de carga, com fator de potência do circuito próximo a uma unidade, a TRT é uma tensão com relativa baixa frequência. Neste caso, o pico da tensão de arco é muito baixo e a alta resistência do circuito irá amortecer as oscilações de tensão após a interrupção da corrente de arco (STEWART, 2004).

Na interrupção de correntes de carga puramente indutivas ou bem próximos, por causa do

fator de potência em atraso, a tensão sobre os contatos do disjuntor atinge valores bem próximos ao valor da tensão de crista do sistema. Quando a corrente é extinta antes da passagem por zero, a TRT assume uma característica oscilatória, com isso, o valor de crista da tensão entre os contatos pode se aproximar do dobro do valor da tensão de crista do sistema (STEWART, 2004).

Na interrupção de correntes de carga puramente capacitivas, bancos capacitores, cabos ou linhas aéreas a vazio, a corrente está 90° adiantada da tensão, assim quando os contatos do disjuntor se abrem, se estabelece um arco entre os contatos, até que a corrente atinja o zero da onda senoidal. A corrente capacitiva interrompida é geralmente muito menor que as correntes de curto-circuito do disjuntor, e quando está é interrompida antes da passagem por zero, haverá a reignição do arco. Devido a natureza oscilatória da tensão, poderá haver sucessivas reignições do arco, podendo a tensão entre os contatos do disjuntor atingir valores de cinco vezes o pico da tensão da rede ou valores superiores (ARAÚJO; NEVES, 2005), (GARZON, 2002). Na prática, estas tensões teóricas excessivas não são obtidas, valores entre 2,5 e 3,5 vezes as tensões normais da crista são geralmente o máximo observado (STEWART, 2004).

Em resumo, o desgaste dos contatos é mais incisivo na abertura de circuitos tipicamente capacitivos, tendo em vista que as seguidas reignições do arco, demandam uma maior quantidade de energia sob os contatos, proporcionando uma maior degradação dos mesmos.

2.4 Manutenção em Disjuntores

A deterioração de equipamentos elétricos e materiais é um processo normal, e se inicia tão logo o equipamento é instalado. Se a deterioração não é monitorada ou sua manutenção é negligenciada, ela pode atingir níveis que podem causar falhas elétricas e avarias no equipamento.

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 que seguem um padrão de manutenção baseado nos resultados de inspeções e monitoramento, incorporando-se análises estatísticas e experiência acumulada, podem proporcionar uma vida bem mais longa de serviços mais longos do que o esperado. Se as avaliações dessas ações

determinarem que um disjuntor está em boas condições, o mesmo pode continuar a operar em vez de ser substituí-lo. Entretanto, todos esses procedimentos devem estar embasados em métodos eficientes de diagnóstico para se obter confiabilidade nas decisões.

A desmontagem de disjuntores que não possuem defeitos implica gastos desnecessários, podendo ainda dar origem ou acelerar o surgimento de novos problemas no equipamento, na etapa de remontagem (LANDRY et al., 2006). Por outro lado, manter disjuntores em serviço sem a confiabilidade necessária pode provocar falhas irreparáveis no disjuntor e risco à segurança dos operadores e do sistema elétrico ao qual o equipamento está associado (GARZON, 2002).

Assim, adotar técnicas e metodologias de diagnóstico do estado de operação dos disjuntores é prover mecanismos para que se possa avaliar o grau de confiabilidade do equipamento no desempenho das suas funções (FUJIE et al., 1998).

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). Técnicas eficazes de monitoramento são necessárias para identificar problemas, reconhecer os mecanismos da deterioração e proporcionar meios para prevenir, retardar ou eliminar a deterioração, antes que os níveis de degradação se tornem críticos.

As técnicas usuais de manutenção consistem em se realizar inspeções de rotina e testes elétricos e mecânicos no disjuntor. Essas técnicas devem produzir dados precisos para o correto diagnóstico do estado do disjuntor. As técnicas usualmente adotadas são (GILL, 2008):

- tempo de fechamento dos contatos (intervalo de tempo desde o início do comando até ocorrer o contato galvânico dos contatos em todos os pólos);
- tempo de abertura dos contatos (intervalo de tempo desde o início do comando até ocorrer a separação galvânica dos contatos em todos os pólos);
- sincronização de operação dos contatos;
- testes de vibração durante nas operações de abertura e fechamento;
- 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 e,
- resistência dos contatos.

Um programa de manutenção bem definido e corretamente aplicado minimiza acidentes, reduz paradas não planejadas, e aumenta o tempo médio entre falhas de equipamentos elétricos, reduzindo os custos com reparos, bem como o tempo de inatividade do equipamento, e melhoria da segurança pessoal e patrimonial.

A manutenção dos disjuntores merece atenção especial devido à sua importância para a segurança no fornecimento de energia e para a proteção de outros equipamentos. A falta de manutenção em um disjuntor pode provocar desde a simples falta de energia a rompimentos nas linhas de transmissão e destruição de equipamentos do sistema elétrico.

A origem e consequência das falhas em disjuntores têm sido estudadas há muitos anos. O CIGRE Working Group 13.06 (Reliability of High Voltage Circuit-Breakers) publicou dois relatórios que apresentam as origens das falhas e defeitos em disjuntores em serviço, dentre outras informações.

O primeiro relatório, publicado em 1981, apresenta dados referentes a disjuntores de todas as tecnologias, avaliados no período de 1974 a 1977, limitado a disjuntores instalados após 1964, com tensão de serviço superior a 63 kV. No estudo foram analisados 77.892 disjuntores de 102 concessionárias de 22 países, incluindo o Brasil.

O segundo relatório, publicado em 1994, apresenta dados referentes a disjuntores a SF₆ de pressão única, avaliados no período de janeiro de 1978 a dezembro de 1991, com uma tensão nominal de 72,5 kV ou superior. No estudo foram analisados 70.708 disjuntores de 102 concessionárias de 22 países, destas 14 concessionárias localizadas no Brasil.

O segundo estudo se restringiu a investigar as falhas e os defeitos que ocorrem no disjuntor, não considerando falhas e defeitos de qualquer equipamento auxiliar ou condutores elétricos que não são partes integrantes do disjuntor. Como resultado foram registradas 3.833 falhas, destas 475 falhas foram classificadas com Maior Falha ² e 3.358 como Menor Falha ³ O relatório agrupa as falhas em

²Maior Falha (MF) - falha de um disjuntor que compromete uma ou mais de suas funções essenciais, que provoca mudança nas condições de operação do sistema para remoção da falha, ou resultará na remoção obrigatória de serviço para manutenção não-programada. Intervenção necessária no prazo de 30 minutos (FLETCHER; DEGEN, 1995).

³Menor Falha (mF) - falha de um dispositivo ou acessórios do disjuntor que não compromete uma ou mais de suas funções essenciais, e que não proporciona grandes riscos na operação do equipamento (FLETCHER; DEGEN, 1995).

cinco grupos. A Tabela 2.2 apresenta as porcentagens associadas aos grupos Maior Falha e Menor Falha.

Tabela 2.2 – Origem das falhas em disjuntor.

Falha	Primeiro Relatório (1981)		Segundo Relatório (1994)	
	Maior Falha	Menor Falha	Maior Falha	Menor Falha
Mecanismo de operação	44,00%	39,40%	-	-
Outras partes mecânicas	10,40%	9,90%	70,30%	85,60%
Elétrica (circuito principal)	13,90%	0,90%	10,60%	2,70%
Elétrica (circuito auxiliar)	24,50%	10,20%	19,10%	11,70%
Sistema de gás SF ₆	7,20%	39,60%	-	-

Fonte: (FLETCHER; DEGEN, 1995).

A depender das características da unidade, bem como das condições de operação do disjuntor, o período de manutenção pode variar para cada equipamento. Usualmente, os equipamentos são inspecionados cerca de 6 meses após a instalação, mantendo um monitoramento sistemático em intervalos que variam de 1 a 3 anos, dependendo das condições operacionais e ambientais impostas ao equipamento (GILL, 2008). A frequência das inspeções e manutenções é mais intensa quando os seguintes fatores estão presentes (GILL, 2008):

- atmosfera agressiva (presença de elementos no ar que possam causar o desgaste e oxidação do equipamento);
- excesso de poeira ou sujeira;
- temperatura ambiente alta e umidade alta;
- equipamentos mais antigos;
- interrupções frequentes de falhas no circuito.

Embora existam diferentes tipos e modelos de disjuntores, com características particulares, o princípio de operação é comum a praticamente todos os modelos. A manutenção de disjuntores é normalmente efetuada com o equipamento desenergizado. Antes de proceder a uma ação de

manutenção no disjuntor, o mesmo é desconectado do circuito, ficando o mesmo fora de serviço, a fim de testá-lo. Deve-se ainda aterrará-lo e garantir que o mesmo não venha a ser reenergizado de forma indevida durante a fase de testes. Em seguida, verificar-se as condições de isolamento, para se determinar se é seguro realizar os demais testes para avaliação do equipamento. A avaliação das condições do disjuntor em serviço é realizada através de ensaios que podem ser divididos, de uma maneira geral, na avaliação de três grandes componentes (SANTOS et al., 2013):

- meio isolante;
- parte mecânica;
- contatos.

Conforme os resultados obtidos na avaliação dos parâmetros apresentados anteriormente, procede-se a uma análise do estado operativo do disjuntor. Em virtude do diagnóstico do seu estado operativo, alguns serviços de manutenção podem ser necessários, neste caso, o disjuntor é submetido a uma rotina ajustes ou reparos, sendo o disjuntor submetido a novos ensaios após a realização dos serviços de manutenção.

2.4.1 Avaliação do meio isolante

A principal função do disjuntor no sistema elétrico é interromper as correntes de defeitos. Portanto, 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. A avaliação do isolamento do equipamento visa garantir que o disjuntor mantenha suas características técnicas normais, garantindo a segurança dos operadores e a adequada operação do próprio equipamento no sistema.

Os disjuntores podem apresentar dois meios dielétricos, o meio isolante e o meio extintor. A razão principal da separação entre o meio extintor e o meio isolante visa à substituição ou tratamento de somente parte do dielétrico deteriorado, reduzindo assim o tempo de manutenção (SANTOS et al., 2013).

O meio isolante é responsável por isolar partes do disjuntor que estão sob tensão nominal, proporcionando o isolamento entre as partes energizadas e a terra e entre os pólos. O meio isolante é

submetido a menos agentes contaminantes quando comparado ao meio extintor, conseqüentemente, sua deterioração é mais lenta que o meio extintor (GILL, 2008).

O meio extintor é responsável pelas ações de extinguir o arco elétrico, com isso, tende a deteriorar-se com maior rapidez, em virtude da contaminação dos gases e subprodutos gerados durante a extinção do arco (SANTOS et al., 2013).

A avaliação do isolamento de disjuntores compreende basicamente os seguintes testes (GILL, 2008):

- 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 (SF_6 ou ar comprimido) para impedir seu fechamento ou sua abertura sob pressões inferiores a níveis prefixados.
- verificação da presença de subprodutos do gás SF_6 com o objetivo de mitigar a emissão da molécula de SF_6 , que quando dissociada pode se recombinar com outras moléculas, principalmente com a água, formando compostos como o SOF_4 , SOF_2 , SO_2F_2 , SO_2 , HF (PENG et al., 2013). Esses subprodutos podem danificar as vedações do disjuntor e provocar os preocupantes vazamentos. Por meio de métodos adequados de detecção e análise dos subprodutos, se pode eficientemente diagnosticar que tipo de falha ocorreu em um GIS (seccionador com isolamento a gás) (ZENG et al., 2014).

2.4.2 Avaliação da parte mecânica

A parte mecânica do disjuntor requer cuidados especiais, pois dela depende o bom desempenho do disjuntor. Para se avaliar a condição mecânica do disjuntor, partes móveis do equipamento são avaliadas periodicamente, com intuito de observar se o comportamento mecânico está dentro de

limites pré-estabelecido. Na avaliação mecânica no equipamento são realizados principalmente, os seguintes testes (GILL, 2008):

- tempo de abertura dos contatos (intervalo de tempo desde o início do comando até a separação galvânica dos contatos em todos os pólos);
- sincronização da operação dos contatos;
- testes de vibração em serviço e durante operações de abertura e fechamento do disjuntor.

Tempo de fechamento dos contatos (intervalo de tempo desde o início do comando até ocorrer o contato galvânico em todos os pólos);

2.4.3 Avaliação dos contatos

Um dos principais componentes do disjuntor são os contatos fixos e contatos móveis que têm a função de conduzir a corrente elétrica em condições normais e anormais do sistema. Embora os contatos fixo e móvel sejam fabricados a partir de materiais que apresentam boa capacidade para suportar os efeitos do arco elétrico, esses contatos sofrem avarias que resultam na diminuição do desempenho do disjuntor (MCDONALD, 2012).

O desgaste dos contatos elétricos dos disjuntores é um processo previsível e normal. O processo se inicia tão logo o equipamento entra em operação. Embora se conheça as principais causas de desgaste dos contatos, a sua deterioração deve ser monitorada, com objetivo de evitar que os contatos atinjam níveis de desgaste que possam causar diminuição do desempenho do disjuntor, causando falhas de operação. As principais causas de desgaste dos contatos são (LANDRY et al., 2006):

- atrito entre os contatos;
- corrente elétrica de carga;
- arco elétrico.

Atrito entre os contatos

Com os contatos do disjuntor na posição fechada, a pressão entre os contatos deve ser suficiente para garantir uma baixa resistência entre eles, de modo a não proporcionar sobreaquecimento

na câmara de extinção, durante a condução da corrente elétrica. Entretanto, o nível de pressão entre os contatos deve ser cuidadosamente projetado, caso contrário, pode haver um maior desgaste por atrito entre eles, nas operações de abertura e fechamento dos contatos, proporcionando o aumento da resistência entre os mesmos (NASRALLAH et al., 2007a).

O atrito entre os contatos também pode causar o desalinhamento de dedos de contato, de modo que a pressão sobre os contatos não fique uniformemente distribuída. Com a perda de pressão entre os contatos há um conseqüente aumento no valor da resistência de contato.

Para os disjuntores conduzindo baixas correntes, onde o efeito térmico não é predominante, o atrito entre os contatos é o principal agente de desgaste dos contatos (SANTOS et al., 2013).

Para disjuntores novos, durante o processo de montagem da câmara de extinção, as câmaras são testadas e alinhadas criteriosamente, para que os contatos não exerçam demasiado atrito entre as partes. Normalmente, somente os fabricantes possuem a capacidade de avaliar e corrigir alguma anormalidade na câmara (SANTOS et al., 2013).

Corrente elétrica de carga

Com o disjuntor na posição fechada, os contatos estão galvanicamente conectados um ao outro, devido à pressão mecânica aplicada entre eles. Nessa posição, o contato galvânico se dá entre o contato principal do contato móvel e o contato principal do contato fixo. Conseqüentemente, a condução da corrente elétrica se estabelece através dos contatos principais fixo e móvel.

Em condições normais de operação, a condução da corrente elétrica de carga pode ser conduzida ininterruptamente durante meses (FILHO, 2005). Essa corrente de carga é o principal agente causador da degradação dos contatos principais, através do efeito térmico da corrente elétrica. Entretanto, os contatos dos disjuntores são projetados para conduzir e suportar termicamente os efeitos da corrente elétrica do sistema, sem que apresente degradação significativa em curtos períodos de tempo.

A corrente de carga, aliada às partículas de materiais transferidas entre contatos durante os ciclos de operação do disjuntor, provoca o aumento da resistência dos contatos principais (CHEN; SAWA, 1995). Com a degradação dos contatos há um conseqüente aumento no valor da resistência entre os contatos principais, provocando o aquecimento indesejado no interior da câmara de extinção do disjuntor, mesmo em condições normais de operação do sistema. A temperatura na câmara pode atingir níveis que provoquem o deterioramento do material isolante, com possibilidade de descargas

entre os pólos ou entre pólo e a terra (NASRALLAH et al., 2007a).

Arco elétrico

A energia liberada pelo arco elétrico tem a capacidade de provocar o desgaste acelerado dos contatos. Com a degradação dos contatos de arco, há um conseqüente aumento no valor da resistência entre os mesmos (LI et al., 2000).

O alto nível de desgaste dos contatos de arco dos disjuntores reflete diretamente em uma diminuição significativa da capacidade de extinção de altas correntes, durante a operação em falta no circuito elétrico associado (LANDRY et al., 2008). Com isso, haverá um aumento do risco, por excesso de calor no interior do disjuntor, com possibilidade de alcançar temperaturas em níveis superiores para o qual o disjuntor foi projetado, e assim, deteriorando o material isolante e provocando um desgaste anormal do equipamento.

Independentemente da causa de desgaste dos contatos, seja através da corrente elétrica ou através do atrito mecânico entre eles, a resistência de contato deve ser monitorada. Se os contatos não são mantidos com uma superfície regular, sem corrosão excessiva, sua resistência elétrica aumenta, resultando em uma redução significativa na capacidade do contato para conduzir a corrente elétrica, colocando em risco o desempenho seguro do disjuntor (GILL, 2008).

Se os componentes internos do disjuntor puderem ser avaliados sem a necessidade de desmontagem, será possível acompanhar a evolução do desgaste dos componentes de maneira eficiente, fazendo com que o processo de manutenção seja otimizado. Uma maneira de avaliar o estado dos contatos é por meio da medição da resistência de contato, com os contatos do disjuntor na posição fechada, sem a necessidade de remoção do meio isolante da câmara de extinção de arco (OHLEN et al., 1995); (GARZON, 2002); (LANDRY et al., 2006); (WäCKLÉN et al., 2008); (GILL, 2008); (TURCOTTE; GAUTHIER, 2008); (STANISIC; NEIMANIS, 2010); (JEYARAJ; HABTAY, 2011); (SODHA et al., 2012); (MCDONALD, 2012); (TINGTING et al., 2014); (LIN et al., 2014); (BHOLE; GANDHARE, 2015).

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.

Para atender a esses requisitos, é indispensável que a área entre os contatos seja maximizada, e os contatos sejam produzidos a base de materiais capazes de suportar os efeitos térmicos e mecânicos impostos ao disjuntor em serviço. Além disso, a força aplicada aos contatos deve ser adequada, com configuração e massa dos contatos que possibilite uma velocidade de operação, suficientes para limitar a erosão dos contatos (GARZON, 2002).

Para se avaliar o estado dos contatos dos disjuntores, o método mais utilizado é a medição da resistência de contato, com aplicação direta da lei de Ohm. Aplica-se um sinal de corrente CC entre os contatos fechados e mede-se a queda de tensão entre eles, sendo a resistência calculada a partir da divisão entre a queda de tensão nos contatos pela corrente aplicada (NASRALLAH et al., 2007a).

O diagnóstico do estado do disjuntor por meio da análise do valor da resistência de contato tem como fundamentação as imperfeições micrométricas dos contatos das câmaras de extinção de arco (HOLM et al., 1949). A degradação dos contatos contribui substancialmente para o aumento da resistência de contato entre os eletrodos (LANDRY et al., 2006).

2.5.1 Medição da resistência estática de contato (MRE)

O ensaio de medição de resistência de contato é realizado para avaliar a condição do contato principal do disjuntor. 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 destes problemas no disjuntor pode causar o aquecimento localizado ou a deterioração dos contatos (GARZON, 2002).

As MRE são geralmente realizadas antes e após as operações de desmontagem e limpeza realizados sobre os contatos do disjuntor (PONS et al., 1993), (GILL, 2008). As operações de desmontagem e limpeza são geralmente precedidas de decisões técnicas implantadas em função da análise de resultados obtidos através do monitoramento periódico do disjuntor. Na maioria das

empresas os planos de manutenção de disjuntores normalmente estabelecem em condições normais de operação do equipamento, um número máximo de manobras, tempo de serviço e/ou correntes interrompidas que o disjuntor realizou, antes de promover um ensaio e/ou a inspeção para avaliação do disjuntor (ADAM et al., 2007).

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 o contato (buchas terminais), sem a necessidade de remoção do meio isolante da câmara de extinção de arco (GILL, 2008). No ensaio é utilizada uma fonte de corrente contínua a fim de se evitar erros na medição da resistência causada por uma eventual componente indutiva do circuito sob teste (STANISIC; NEIMANIS, 2010).

Na realização do ensaio de resistência de contato, sugere-se adotar alta corrente, com o objetivo de mitigar os efeitos de películas isolantes na superfície dos contatos, as quais promovem o aumento da resistência de contato. A alta corrente proporciona o aquecimento do pólo, minimizando os efeitos das películas isolantes (LANDRY et al., 2008).

As películas isolantes podem estar presentes nos disjuntores a óleo a partir da formação de películas de óleo isolante devido a carbonização do óleo (LEMELSON, 1973). Nos disjuntores a ar, os contatos podem ser oxidados, criando uma película isolante sobre a superfície dos contatos (GARZON, 2002). Nos disjuntores a SF₆ há a formação de fluoretos metálicos sob a forma de um pó não condutor, formado a partir de certos compostos (CuF₂, AlF₃, WF₆, etc.) que são depositados sobre os contatos do disjuntor (LANDRY et al., 2008).

Para minimizar os efeitos das películas isolantes são sugeridos dois padrões nos ensaios de medição de resistência de contato. De acordo com a norma IEC 62271-100, a resistência de contato deve ser medida com uma corrente mínima de teste de 50 A (IEC, 2001). A norma IEEE C37.09 especifica que a corrente de ensaio deve ser de no mínimo 100 A e limitada a corrente nominal do disjuntor (IEEE, 2007).

O cronograma de medição da resistência de contato dos disjuntores pode variar para cada instalação. A frequência das inspeções e manutenções é mais intensa em equipamentos mais antigos, bem como quando o disjuntor está submetido a severas condições operacionais, como interrupções frequentes por falhas no circuito, manobra de banco de capacitores, temperatura ambiente alta e umidade alta, dentre outras (GILL, 2008).

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, ou com valores de disjuntor similar ou ainda com valores recomendados pelo fabricante (GILL, 2008). Entretanto, não há um consenso sobre os valores limites. Segundo (GILL, 2008), um fator 2 de aumento ou uma diferença de 50% na resistência entre os três pólos, é considerado um indício de significativa de deterioração.

Na Tabela 2.3 são apresentados valores máximos sugeridos para resistência de contato estática, em função da tecnologia utilizado como meio extintor, dos níveis de tensão e corrente do disjuntor.

Tabela 2.3 – Valores máximos de resistência de contato estática.

Tipo de disjuntor	Tensão de operação (kV)	Corrente nominal (A)	Resistência estática de contato ($\mu\Omega$)
Disjuntores a óleo	7,2 - 15	600	300
		1200	150
		2000	75
		4000	40
	23 - 24	Todos	500
	46	Todos	700
	69	600	500
		1200	500
		2000	100
		115 - 230	Todos
Disjuntores a gás	5 - 15	600	100
	Todas	1200	50
		2000	50

Fonte: (WESTERN, 1998).

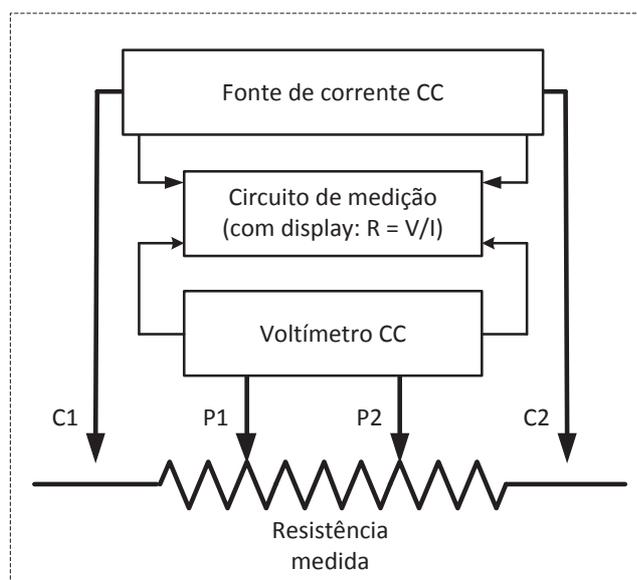
O ensaio de resistência estática de contato é realizado com a utilização de um micro-ohmímetro. O micro-ohmímetro é um equipamento portátil projetado para medição de resistência de contato de objetos de teste com característica não indutiva. A medição é feita individualmente em cada pólo do disjuntor. Nos ensaios de MRE é utilizado o método de medição a quatro fios, visto

que o valor usualmente obtido da resistência está na faixa de (10-1000 $\mu\Omega$) (STANISIC; NEIMANIS, 2010). O controle do sinal de corrente do micro-ohmímetro pode ser do tipo manual ou automático.

No controle manual a corrente CC é injetada no circuito pelo operador do equipamento, nesse caso, a corrente aumenta de 0 (zero) até a corrente máxima do equipamento.

Com controle automático é gerado um sinal de corrente CC, com rampas de teste automaticamente reguladas antes da medição e diminuindo a corrente após a medição, ou seja, durante o valor da resistência é obtido com um sinal CC puro, eliminando os transitórios magnéticos. Os modelos de micro-ohmímetros pesquisados neste trabalho apresentam variação de corrente de 10 A a 600 A. Na Figura 2.12 é apresentada o diagrama de blocos de um microhmímetro. Sendo: C1 e C2 - Sensores de Corrente; P1 e P2 - Sensores de Potencial.

Figura 2.12 – Diagrama básico de operação do microhmímetro.



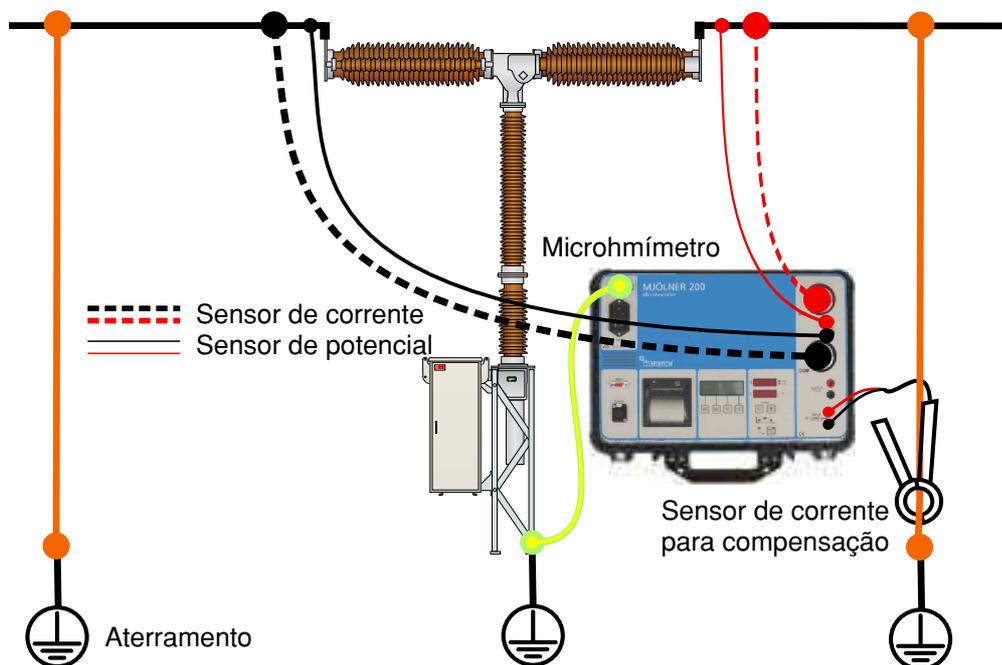
Fonte: (LANGAN et al., 2004).

Na realização de ensaios de resistência de contato em equipamentos, como disjuntores, por exemplo, os sensores do micro-ohmímetro são conectados conforme apresentado na Figura 2.13. A resistência de contato do disjuntor é determinada a partir dos terminais superior e inferior com o disjuntor na posição fechada. Com o disjuntor desenergizado, aterrado e com os contatos fechados é aplicada uma corrente contínua e mede-se a resistência de contato ou queda de tensão entre os contatos.

Os procedimentos para realização do ensaio da MRE podem ser assim enumerados (LANDRY et al., 2006):

1. conectar os sensores de corrente e tensão do micro-ohmímetro a um dos pólos do disjuntor;
2. instalar o sensor de corrente externo a um dos cabos de aterramento e ao micro-ohmímetro, para medição da corrente de compensação (alguns modelos de micro-ohmímetro não dispõem da função de compensação de corrente);
3. acionar o botão para determinação da resistência (o micro-ohmímetro aplica a corrente através dos sensores de corrente, mede automaticamente a queda de tensão, com o auxílio dos sensores de tensão e determina o valor da resistência, em função da tensão e corrente, apresentando o valor calculado no display do equipamento);
4. Repetir os passos anteriores para os demais pólos do disjuntor.

Figura 2.13 – Esquema de medição da resistência estática de contato em disjuntores.



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

Outro fator importante no arranjo da MRE é a segurança durante a realização do ensaio, observa-se na Figura 2.13 que além dos 4 sensores (dois de corrente e dois de tensão) presentes no arranjo, mais três condutores de aterramento para segurança do operador e do equipamento. Nesse

arranjo a corrente que flui através do terra é medida, o analisador faz a compensação das correntes, e determina a resistência considerando-se apenas a fração da corrente que flui pelos contatos do disjuntor (WÄCKLÉN et al., 2008).

2.5.2 Medição da resistência dinâmica de contato (MRD)

Atualmente, a avaliação do estado dos contatos nas câmaras de extinção de arco é feita por meio da MRE, entretanto, baixos valores de resistência não implicam contatos em bom estado.

A imprecisão do ensaio de MRE se deve ao fato do ensaio ser realizado com os contatos completamente fechados, ou seja, há o contato galvânico apenas entre os contatos principais, com isso, o ensaio avalia somente a resistência entre os contatos principais do contato móvel e do contato fixo. Como consequência, em muitos casos há a necessidade de inspeção interna na câmara de extinção, indisponibilizando o disjuntor por longo tempo e demandando altos custos de manutenção (LANDRY et al., 2006).

Para se produzir dados mais concisos na avaliação da resistência de contato, pesquisas têm sido direcionadas para a medição da resistência dinâmica dos contatos em disjuntores de alta tensão, como forma de avaliar o estado interno das câmaras. No ensaio da MRD, a resistência dos contatos principal e de arco é avaliada individualmente, o que permite uma estimativa do nível de desgaste de cada contato (OHLEN et al., 1995).

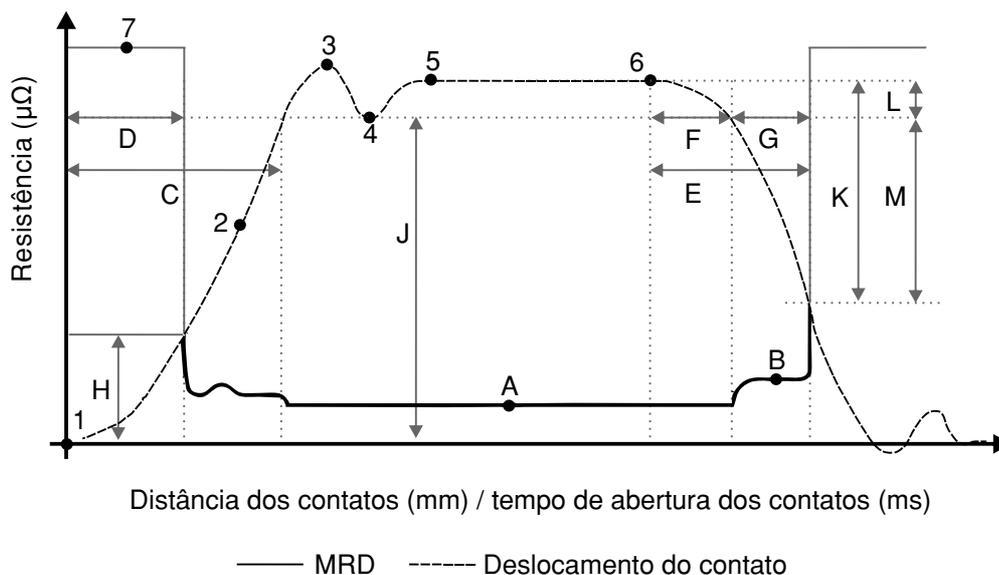
A curva gerada na MRD permite uma avaliação mais precisa do estado dos contatos principais e contatos de arco, quando comparado aos resultados obtidos no ensaio de resistência estática (LANDRY et al., 2006). A curva da MRD é formada basicamente por dois patamares. O primeiro patamar, que apresenta menor resistência de contato, se refere a região do contato principal. O segundo patamar, que apresenta uma resistência maior, se refere a região do contato de arco (LANDRY et al., 2006).

Os resultados da MRD são usualmente apresentados em curvas de resistência $R(\mu\Omega)$ versus tempo de abertura $t(\text{ms})$ dos contatos. Caso o deslocamento do contato móvel seja monitorado durante o ensaio, pode-se gerar também uma curva de resistência $R(\mu\Omega)$ versus deslocamento do contato móvel $d(\text{mm})$.

Na Figura 2.14 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 2.14 – Perfil da curva da resistência dinâmica versus deslocamento ou tempo de abertura dos contatos de disjuntores.



Fonte: (CLEGG et al., 1996).

O ensaio da MRD é bastante semelhante do ensaio de medição de resistência estática de contato. Entretanto, em vez de se obter um único valor de resistência, quando os contatos do disjuntor estão fechados (valor estático), a resistência é medida em diversos pontos da região dos contatos, durante o deslocamento do contato móvel no processo de abertura dos contatos (OHLEN et al., 1995).

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):

- a 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.

No ensaio da MRD a corrente de teste é injetada em um dos pólos do disjuntor na posição fechada alguns milissegundos antes do movimento de abertura dos contatos. Quando os contatos começam a se mover, os sinais de corrente e queda de tensão entre os contatos são continuamente medidos, e por meio da aplicação direta da Lei de Ohm, uma série de valores de resistência é determinada. Com isso são obtidos valores de resistência em vários pontos de contato, resultando em uma curva de resistência, denominada resistência dinâmica de contato. A curva gerada apresenta valores de resistência entre os contatos desde a conexão plena entre os contatos móvel e fixo, até a separação total dos contatos, incluindo medições nos vários pontos de conexão parcial entre os contatos móvel e fixo.

Nos ensaios da MRD também é utilizado o método de medição a quatro fios, por apresentar maior precisão, conforme discutido anteriormente.

Para os ensaios da MRD se faz necessária a aplicação de instrumentos com maiores recursos tecnológicos que os micro-ohmímetros, visto que são coletados diversos valores de resistência de contato, o que impossibilitaria a leitura dos valores no display de um micro-ohmímetro devido à constante atualização dos dados.

Para obtenção da curva de resistência dinâmica é necessário inicialmente dispor de um sistema que permita injetar uma corrente CC e medir a queda de tensão entre os terminais do disjuntor durante todo o processo de abertura dos contatos. Simultaneamente, em cada instante de tempo durante a abertura dos contatos, devem ser registrados os sinais de corrente e queda tensão nos contatos. Opcionalmente, a resistência de contato para cada instante de tempo pode ser determinada

internamente pelo equipamento, ou posteriormente através de software, com aplicação direta da lei de Ohm.

O ensaio da MRD tem sido realizado pelas equipes de manutenção como o auxílio de analisadores de disjuntor (analisador de chaveamento), o qual possui um micro-ohmímetro incorporado, sendo a MRD efetuada com injeção de corrente contínua de teste na faixa de 200 a 250 A. A faixa de corrente varia conforme modelo de cada fabricante.

Os analisadores de disjuntor operam conectados ao circuito do sistema de controle do disjuntor, ou seja, através da operação das botoeiras do analisador é possível executar as operações de fechamento/abertura do disjuntor, operação necessária para monitoramento da maioria dos testes no disjuntor.

Os modelos de analisadores de disjuntores disponíveis comercialmente apresentam basicamente as seguintes funções:

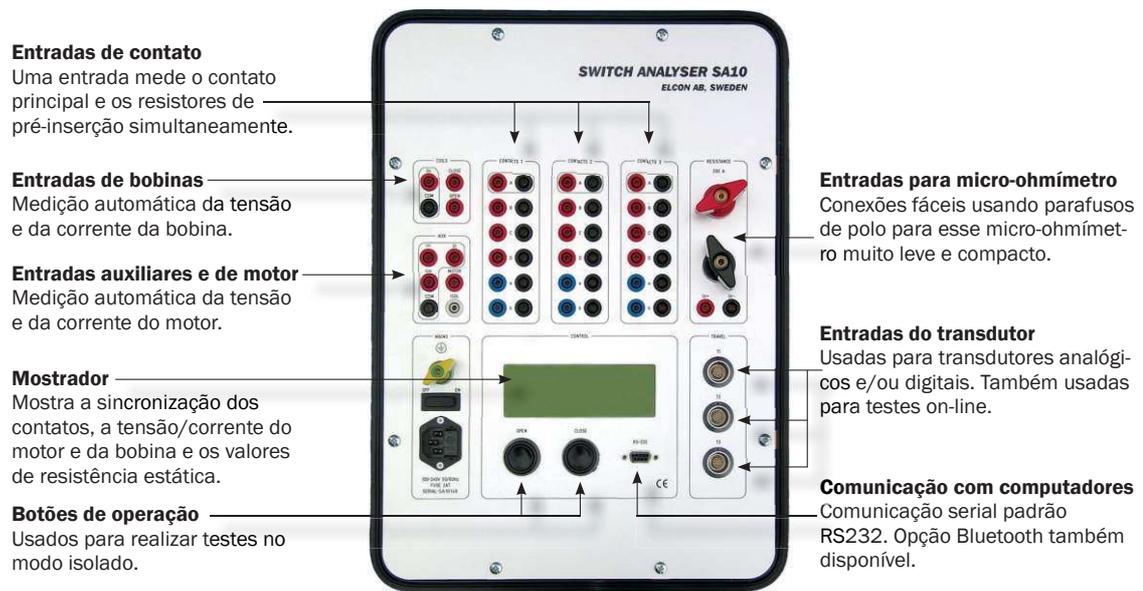
- medição do tempo de fechamento e/ou abertura simultânea dos 3 contatos principais;
- avaliação do sincronismo entre os pólos do disjuntor;
- determinação das correntes máximas e tempos de atuação nas bobinas de fechamento e de abertura;
- determinação automática da resistência de contatos.

Na Figura 2.15 é apresentada uma ilustração do painel de analisador de chaveamento comercial, com detalhamento dos bornes de conexão.

De forma análoga ao ensaio de resistência estática é injetada uma corrente contínua de teste que circula entre os contatos principais e de arco do disjuntor, simultaneamente, mede-se a queda de tensão sobre os contatos (buchas terminais) durante uma operação de abertura dos contatos. A resistência é determinada internamente no instrumento, pela aplicação direta da lei de Ohm, dividindo-se o valor da queda de tensão entre os contatos pela corrente de teste injetada durante todo o processo de abertura dos contatos, resultando em uma curva de resistência, que apresenta de forma distinta a resistência dos contatos principais e dos contatos de arco.

Para realização do ensaio da MRD em subestações energizadas algumas intervenções no equipamento de teste são necessárias. Essas intervenções podem ou não interferir significativamente

Figura 2.15 – Analisador de chaveamento.



Fonte: (ELCON, 2010).

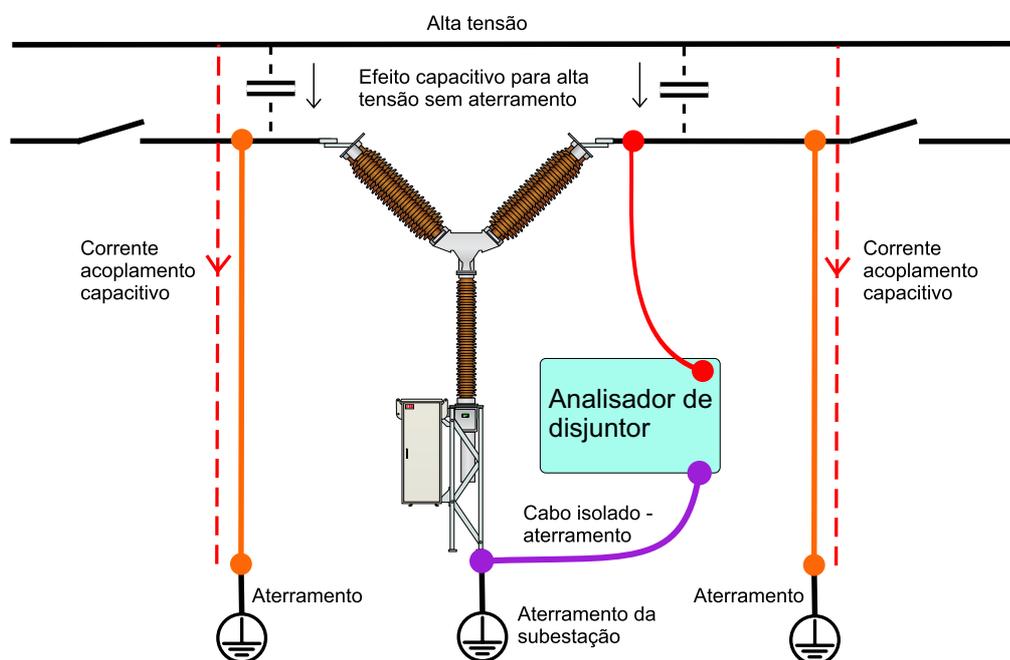
na precisão dos resultados. Quando o disjuntor está fora de serviço para ensaios, este está inserido em um ambiente de subestação, geralmente, onde há acoplamento capacitivo dos condutores de alta tensão energizados, que induzem correntes em todos condutores paralelos. As correntes induzidas que fluem através dos cabos de aterramento do disjuntor podem atingir níveis próximos de 20 mA, o que pode ser suficiente para provocar acidentes elétricos com os operadores envolvidos no ensaio, adicionalmente, durante uma falta o equipamento de medição pode ser submetido a potenciais que podem provocar acidentes elétricos com os operadores, bem como danificar o equipamento de medição (STANISIC; NEIMANIS, 2010).

De modo a proporcionar maior segurança na realização do ensaio, os ensaios da MRD são realizados conforme dois métodos, sendo eles:

- **ambos os lados do pólo do disjuntor são aterrados** - a principal vantagem é o aumento na segurança dos operadores durante o ensaio, sendo um método mais simples, o que gera economia de tempo, visto que o número de tarefas é reduzida quando o cabo de aterramento não necessita ser desconectado e reconectado, com isso, em muitos casos as solicitações aos órgãos reguladores de intervenções nos equipamentos das subestação podem ser evitadas. No entanto, os regulamentos de segurança devem ser sempre seguidos. A desvantagem é que a medição apresenta menor precisão, pois a corrente injetada pelo instrumento de teste tem agora

tem dois caminhos, sendo um pelos contatos do disjuntor e o outro pelo cabos de aterramento do ensaios, e não é, portanto, igual a corrente que flui através do objeto de teste (WäCKLÉN et al., 2008). Para os ensaios em disjuntores, os contatos tem uma baixa resistência em comparação com a malha de terra e, portanto, a parcela maior da corrente, tipicamente 90%, flui através do objeto dos contatos (WäCKLÉN et al., 2008). Na Figura 2.16 é apresentado um esquema típico de montagem utilizado no ensaio da MRD com ambos os lados do pólo do disjuntor aterrado;

Figura 2.16 – Arranjo de montagem para ensaio da MRD com ambos os lados do pólo do disjuntor aterrados.

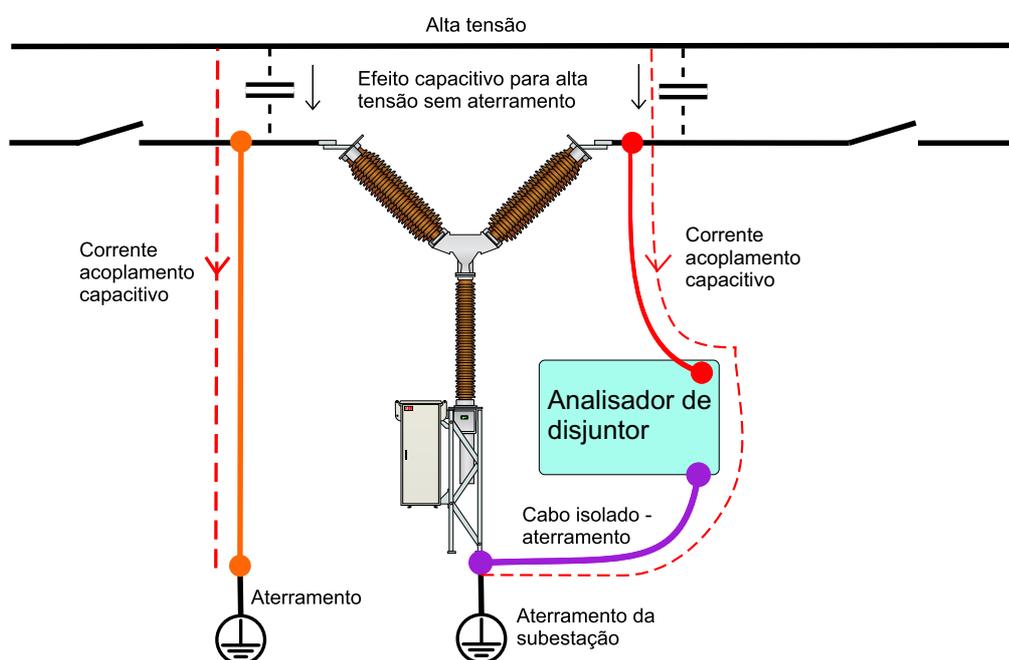


Fonte: Adaptado (CLAESSON et al., 2007), (ABB, 2013).

- **somente um dos lados do pólo do disjuntor é aterrado** - neste método os resultados da medição serão mais precisos que o teste com ambos os lados aterrado, entretanto, ainda há influência nos valores medidos devido à corrente induzida que circula pelos cabos de testes. A maior desvantagem é o risco para a segurança dos operadores. Este arranjo não é permitido por organismos de normalização e regulamentação da maioria dos países, sendo recomendado que o ensaio seja executado com ambos os lados aterrados durante todo o ensaio (CLAESSON et al., 2007). Outro ponto, é que a remoção do cabo de aterramento, quando permitido, demora muito tempo e é, em alguns casos, permitido apenas para pessoas devidamente autorizadas

e não pelo técnico que realizará o ensaio (CLAESSON et al., 2007). Com isso, o disjuntor necessita ser retirado de serviço por mais tempo, tornando o método menos vantajoso em comparação ao método com ambos os lados do pólo do disjuntor são aterrado e, mais difícil de ser executado com a segurança requerida. Na Figura 2.17 é apresentado um esquema típico de montagem utilizado no ensaio da MRD, em que somente um dos lados do pólo do disjuntor é aterrado.

Figura 2.17 – Arranjo de montagem para ensaio da MRD em disjuntores com somente um lado aterrado.



Fonte: Adaptado (CLAESSON et al., 2007), (ABB, 2013).

Para compensar os erros nos dois métodos apresentados, alguns fabricantes desenvolveram medidores de resistência de contato com compensação da corrente induzida (WäCKLÉN et al., 2008). Na Figura 2.13 foi apresentado um esquema típico de montagem adotado no ensaio da MRE, utilizando-se de um micro-ohmímetro comercial com ambos os lados do pólo do disjuntor aterrados, e com compensação da componente da corrente que flui através cabo de aterramento.

Os procedimentos para realização do ensaio da MRD podem ser assim enumerados (LANDRY et al., 2006):

1. conectar as entradas de contatos das bobinas (abertura e fechamento) do disjuntor ao analisador;

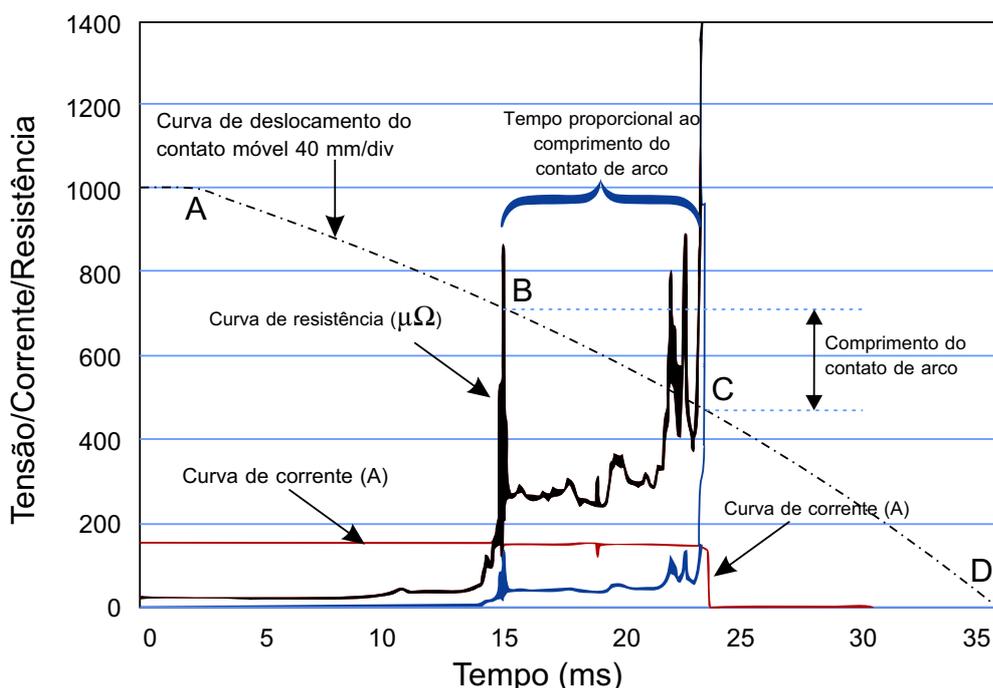
2. conectar os sensores de corrente e tensão do micro-ohmímetro (incorporado ao analisador) a um dos pólos do disjuntor, similarmente ao ensaio de MRE;
3. selecionar a função de medição de resistência de contato;
4. realizar a operação de fechamento dos contatos do disjuntor;
5. acionar o botão de abertura dos contatos. Alguns milissegundos antes da abertura dos contatos do disjuntor, o analisador injeta a corrente entre os contatos do disjuntor e mede a resistência de contato. O analisador de disjuntor determina a curva de resistência de contato durante todo o processo de abertura dos contatos, a partir dos valores de tensão e corrente entre os terminais do disjuntor;
6. repetir os passos anteriores para os demais pólos do disjuntor.

Em função dos resultados do ensaio da MRD, os seguintes defeitos em disjuntores podem ser identificados (OHLEN et al., 1995):

- desalinhamentos dos contatos;
- falha na limpeza dos contatos principal e de arco;
- erosão (degradação) do contato de arco;
- erosão (degradação) do contato principal;
- estado de operação do mecanismo de acionamento dos contatos;
- resistência dos contatos principal e de arco;
- estado de operação do sistema de amortecimento;
- curva de deslocamento e velocidade do contato móvel;
- desalinhamento do contato móvel proveniente da montagem;
- desalinhamento do pistão do mecanismo de condução da corrente e haste de operação;
- integridade mecânica de vários componentes da câmara.

Na Figura 2.18 é apresentada uma curva típica da MRD, obtida com um analisador de disjuntor. Na curva em questão são indicadas além da curva de resistência dinâmica, as curvas de corrente, tensão e deslocamento do contato móvel. A diferença entre as curvas apresentadas na Figura 2.14 e na Figura 2.18 deve-se ao fato de que a primeira, é uma curva ideal, para um contato novo, enquanto a segunda, é uma curva real, obtida para um contato com estágio de degradação avançado (STANISIC, 2011).

Figura 2.18 – Curva típica da MRD em disjuntores.



Fonte: Adaptado (STANISIC, 2011).

Analisando a curva da MRD apresentada na Figura 2.18, destacam-se como parâmetros principais:

- o ponto A representa o instante de tempo onde os contatos se encontram totalmente fechados, de onde se inicia o processo de abertura dos contatos. Os pontos B e C representam o instante de tempo da separação dos contatos principais e de arco, respectivamente. Entre os pontos C e D os contatos já estão separados galvanicamente, entretanto, o disjuntor ainda não se encontra com os contatos totalmente abertos. O ponto D representa o instante de tempo onde os contatos se encontram totalmente abertos, onde se conclui o processo de abertura dos contatos. Curva de corrente (A): aplicado um sinal contínuo de aproximadamente 160 A

durante a abertura dos contatos;

- curva de tensão (mV): queda de tensão medida entre os terminais de entrada e saída de um dos pólos, que reflete diretamente a queda de tensão entre os contatos durante a abertura dos contatos;
- curva de resistência ($\mu\Omega$): apresenta a relação entre os sinais medidos de queda de tensão e corrente aplicados entre os contatos durante todo o processo de abertura dos contatos;
- curva de deslocamento do contato móvel: apresenta a distância percorrida pelo contato móvel durante a abertura dos contatos, desde o estágio inicial, contatos totalmente fechado, até o estágio final, contatos totalmente abertos. A diferença entre os pontos A e B no eixo vertical representa o comprimento do contato principal (≈ 58 mm). A diferença entre os pontos B e C no eixo vertical representa o comprimento do contato de arco (≈ 42 mm);

Para o diagnóstico da condição dos contatos dois parâmetros são avaliados:

- a área da curva da MRD em ($\Omega.s$ ou $\Omega.mm$), obtida entre o eixo da abscissa (s ou mm) e a curva de resistência (Ω) são os parâmetros avaliados para determinar o nível de degradação do contato. Os resultados obtidos são geralmente confrontados com as curvas da MRD obtidas durante o comissionamento da subestação. A curva da MRD obtida no comissionamento é denominada de *impressodigital* ou assinatura do disjuntor, e servirá de referência para as demais intervenções no equipamento. A partir da comparação com curvas obtidas com o contato novo ou em medições anteriores, define-se a condição do contato. Se durante a análise da curva constata-se que houve um aumento na área da curva, ou seja, aumento da resistência de contato, implaca-se então, que houve intensificação no desgaste do contato, indicando um maior o nível de degradação nos contatos (LANDRY et al., 2008).
- o comprimento do contato de arco, obtido a partir da diferença entre os pontos B e C no eixo vertical representa o comprimento do contato de arco. A partir da comparação com o comprimento do contato de arco obtido com o contato novo ou em medições anteriores, define-se a condição do contato. Se em uma medição constata-se que houve diminuição no comprimento do contato de arco, houve então intensificação no desgaste do contato, quanto menor

o comprimento do contato de arco, maior o nível de degradação (TURCOTTE; GAUTHIER, 2008).

Os disjuntores que são classificados como alto valor de resistência de contato, devem ser submetidos a processos de desmontagem para substituição ou limpeza dos contatos, o que não é uma tarefa simples, tendo em vista que se faz necessário solicitar autorização aos órgãos reguladores. Podendo ainda durante o processo de desmontagem e remontagem inserir defeitos no sistema de vedação da câmara de extinção de arco, desalinhamento dos contatos, falha no sistema de acionamento, etc (GARZON, 2002).

O acentuado desgaste dos contatos pode levar o disjuntor a falhas irreparáveis e risco à segurança dos operadores e do sistema. Deve-se encontrar um equilíbrio de forma que uma inspeção interna na câmara de extinção somente seja realizada quando se tem fortes indícios de que os contatos estão com significativo desgaste, evitando-se ao máximo a abertura da câmara desnecessariamente (SANTOS et al., 2013).

Nas Figuras 2.19(a), (b), (c) e (d) são apresentadas fotografias de contatos móvel de um disjuntor a ar comprimido novo e em três diferentes níveis de degradação.

Figura 2.19 – Contatos móvel de disjuntor de alta tensão a ar comprimido.



(a) Novo. (b) Degradação baixa. (c) Degradação média. (d) Degradação alta.

Fonte: (LANDRY et al., 2006).

De modo a reduzir custos de manutenção, tempo de indisponibilidade do disjuntor e intrusão desnecessária no equipamento, o diagnóstico a partir do ensaio de medição da resistência de contato deve refletir o nível de confiabilidade de operação dos contatos do disjuntor, tanto em condições

normais ou anormais do sistema.

Embora a MRD se caracterize como uma técnica promissora na avaliação do estado das câmaras de extinção de arco dos disjuntores, não existe ainda modelo conclusivo, que correlacione a curva da resistência dinâmica ao nível de desgaste dos contatos.

A partir de um banco de dados amplo e uso de técnicas de apoio à decisão, é possível implementar um sistema especialista de caracterização do nível de deterioração dos contatos com base em parâmetros características da MRD e das características do disjuntor, bem como referências de fabricantes, possibilitando o diagnóstico do estado dos contatos nos disjuntores de forma mais eficiente.

Sendo o objetivo deste trabalho desenvolver um sistema especialista de caracterização do nível de deterioração dos contatos, se faz necessária a adoção de técnicas de apoio a tomada de decisão para determinação do nível de degradação dos contatos.

Para o desenvolvimento desta Tese, o número de disjuntores e amostras de contatos disponibilizados é restrito. Essa restrição implica diretamente num limitado número de curvas da MRD. Diante disso, optou-se por utilizar a lógica *Fuzzy*, tendo em vista que ela se enquadra como uma ferramenta adequada para avaliação de casos onde há limitação do número de elementos do banco de dados. Optou-se por não adotar a técnica de Redes Neurais Artificiais, tendo em vista que seria necessário um maior número de amostras de disjuntores e contatos, nos mais diversos níveis de degradação. Segundo (LINGJIE et al., 2008) a lógica *Fuzzy* supera as dificuldades apresentadas pelos os sistemas baseados em Redes Neurais, que precisam de grandes quantidades de dados na fase de treinamento. O diagnóstico de falhas baseado em modelos *Fuzzy* apresenta como principal vantagem, o fato de permitirem adotar as características essenciais do comportamento, levando em consideração as incertezas e imprecisões associadas a cada parâmetro.

2.6 Lógica *Fuzzy*

As incertezas podem ocorrer quando, se tratando de um problema probabilístico, não se consegue descrever com exatidão a distribuição da probabilidade e da importância de alguma variável do processo, conseqüentemente, não sendo possível aplicar os métodos corretos para a análise e diagnóstico do problema.

Um problema típico que apresenta estas características é a classificação do grau de degra-

dação de equipamentos elétricos. A classificação muitas vezes não é óbvia, ou mesmo simples de se avaliar, visto que existe uma grande variedade de fatores que podem influenciar na decisão final sobre o estado do equipamento.

Independentemente do tipo de equipamento analisado, os responsáveis técnicos no momento da decisão fazem uso de suposições, aproximações ou simplificações, que podem colocar dúvidas a respeito da confiabilidade dos resultados. Entretanto, a consideração de fatores com algum grau de incerteza, diante de uma determinada situação, depende do conhecimento prévio desses fatores, para os quais se possam efetuar aproximações e cálculos que leve a alguma modelagem matemática, de modo a resultar em uma conclusão pertinente. Para solução de problemas com essas peculiaridades a utilização de lógica *Fuzzy*, conhecida também com lógica Nebulosa, vem sendo aplicada (CHANG et al., 2012), (GE; ASGARPOOR, 2010), (NÉMETH et al., 2009).

Apresentada inicialmente por (ZADEH, 1965), a teoria dos conjuntos *Fuzzy* é uma generalização da teoria clássica. Na teoria clássica um elemento simplesmente pertence ou não pertence a um conjunto, entretanto, na teoria *Fuzzy*, o elemento poderá pertencer ao conjunto com grau de pertinência que varia no intervalo $[0,1]$, em que o valor 0 indica que o elemento não pertence ao conjunto, o valor 1 indica que o elemento pertence completamente ao conjunto. Os valores no intervalo de $(0,1)$, indicam que o elemento pertence parcialmente ao conjunto.

Na lógica clássica um evento possui somente duas alternativas: verdadeiro ou falso. Na teoria *Fuzzy* o evento está sujeito a uma função de pertinência a qual propõe que isso seja uma questão de grau, ou seja, os valores verdade são expressões linguisticamente, (verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso, ...), onde cada termo linguístico é interpretado como um subconjunto *Fuzzy* do intervalo unitário $[0,1]$.

A função de pertinência é a representação gráfica da magnitude de participação de cada elemento no conjunto. Ela representa um mapeamento matemático de cada valor numérico possível para as variáveis linguísticas, de modo a aproximar os termos linguísticos a um modelo matemático, possibilitando conclusões válidas sobre o problema.

Neste contexto a lógica *Fuzzy* fornece subsídios para a resolução de problemas com alto grau de incerteza, além da flexibilidade das respostas obtidas, sem perder informações importantes durante a manipulação dos dados (SIMÕES; SHAW, 2007).

A lógica *Fuzzy* pode ser aplicada em situações na quais se deseja modelar e manipular

matematicamente informações de forma a se assemelhar ao raciocínio humano. A lógica *Fuzzy* permite o desenvolvimento de sistemas que representam decisões humanas, onde a lógica e a matemática convencional são insuficientes ou ineficientes nas tomadas de decisão (JANÉ, 2004).

Segundo (AMENDOLA et al., 2004), o primeiro conceito está associado a definição de conjuntos *Fuzzy*. Um subconjunto A de um conjunto U é considerado subconjunto *Fuzzy* de U se for descrito como um conjunto de pares ordenados, que pode ser descrito matematicamente pela Equação 2.2.

$$A = \{(x, \mu_A(x)); \quad x \in U \quad \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (2.2)$$

em que:

$\mu_A(x)$ é uma função de pertinência que determina com que grau x está em A .

Sendo que:

$\mu_A(x) = 1$, se x pertence totalmente ao conjunto A ,

$0 < \mu_A(x) < 1$, se x pertence parcialmente ao conjunto A ,

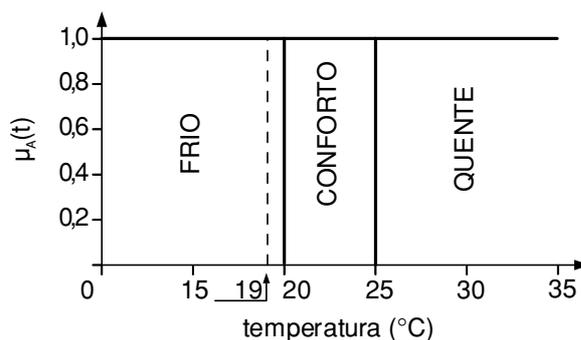
$\mu_A(x) = 0$, se x não pertence ao conjunto A .

Um exemplo bem prático que ilustra a utilização da lógica *Fuzzy* é na avaliação da temperatura térmica. Analisando-se de forma intuitiva de sentir a temperatura pode-se considerar que a sensação de conforto térmico sentida numa sala pelos seus ocupantes é gradativa e não brusca.

Para exemplificar as funções de pertinência, considera-se a Figura 2.20, em que três variáveis térmicas: frio, conforto e quente são representadas por curvas. Estas variáveis são relativas a uma análise sobre temperatura e conforto, em que a variável $\mu_A(t)$ representa o grau de pertinência. Na lógica *Fuzzy* essas curvas são denominadas de funções de pertinência, uma função de pertinência para cada variável *Fuzzy*.

A quantidade de funções de pertinência e seu formato são escolhidos com base na experiência e conhecimento, e nas características do processo a ser controlado ou avaliado. Quanto maior o número de conjuntos (variáveis linguísticas) maior a precisão, contudo, as solicitações computacionais são mais significativas (SIMÕES; SHAW, 2007). Segundo (SIMÕES; SHAW, 2007) um número prático de variáveis linguísticas é algo entre 2 e 7.

Supondo que uma temperatura abaixo de 20°C signifique frio, um ambiente com temperatura igual a 19°C estaria frio segundo a teoria clássica. Caso a situação fosse analisando pela teoria *Fuzzy*,

Figura 2.20 – Função de pertinência com três variáveis linguísticas.

Fonte: Próprio autor.

a situação seria enquadrada segundo uma função de pertinência modelada por um especialista em temperatura de conforto, que poderia resultar em maior pertinência na faixa de temperatura fria, e menor pertinência na faixa de temperatura ideal, permitindo que essa temperatura esteja enquadrada em uma faixa ligeiramente abaixo da faixa de conforto.

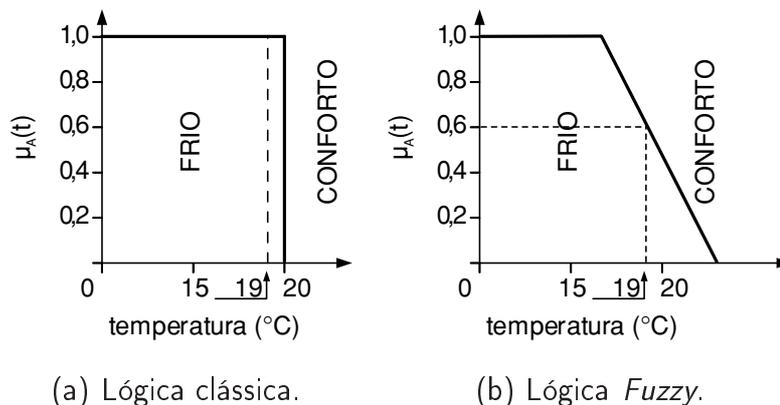
A teoria de conjuntos *Fuzzy* é baseada no fato de que alguns conjuntos existentes no mundo real não possuem limites precisos. Um conjunto *Fuzzy* é um agrupamento impreciso e indefinido, onde a transição de não pertinência para pertinência é gradual, não abrupta (SIMÕES; SHAW, 2007).

A função de pertinência $\mu_A(x)$ pode ser uma função contínua ou discreta. No exemplo apresentado, os conjuntos discutidos são finitos, isto é, consistem de um número finito de elementos discretos de uma variável, em seu universo de discurso. O universo de discurso representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir. A razão para isto é que no campo da engenharia, a teoria *Fuzzy* é implementada em computadores digitais, que requerem valores finitos e discretos (SIMÕES; SHAW, 2007). Portanto, as funções de pertinência serão também consideradas como finitas e discretas. No citado exemplo, a Figura 2.21(b) ilustra o comportamento da função com 0,6 de pertinência no conjunto frio.

A representação da função de pertinência da Figura 2.21 para as duas variáveis linguísticas frio e conforto, também podem ser representadas em um único gráfico, com a identificação dos limites entre as variáveis linguísticas. A Figura 2.22 ilustra o funcionamento da função com 0,6 de pertinência no conjunto de temperatura fria ou 0,4 de pertinência no conjunto de temperatura de conforto.

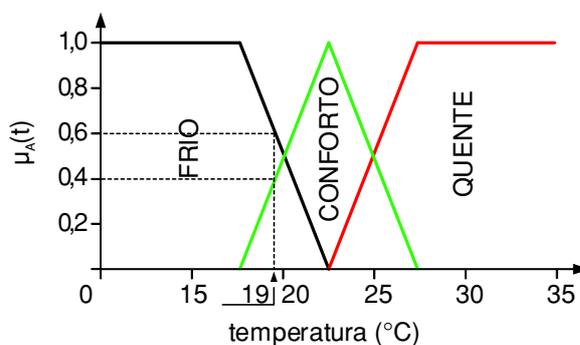
No exemplo apresentado a função de pertinência pode ser modelada diferentemente, por meio de diversos tipos de curvas, mas comumente três são utilizadas: gaussiana, trapezoidal e trian-

Figura 2.21 – Exemplo de função de pertinência da variável linguística frio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.22 – Representação das funções de pertinência das variáveis linguísticas frio, conforto e quente.



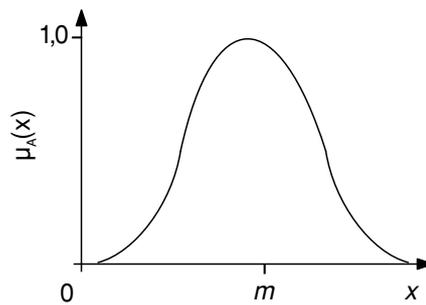
Fonte: Próprio autor.

gular (AMENDOLA et al., 2004). Por esta razão, neste trabalho, apenas para estes formatos serão discutidas as principais características.

Função de pertinência gaussiana: Segundo (AMENDOLA et al., 2004), as funções de pertinência gaussianas são caracterizadas por um conjunto de dois valores (m e σ), os quais representam a média e o desvio padrão, respectivamente, podendo ser representada pela Equação 2.3 e ilustrada pela Figura 2.23.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ não pertence ao domínio,} \\ \frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} & \text{se } x \text{ pertence ao domínio.} \end{cases} \quad (2.3)$$

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de a , b , c e d , onde a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é

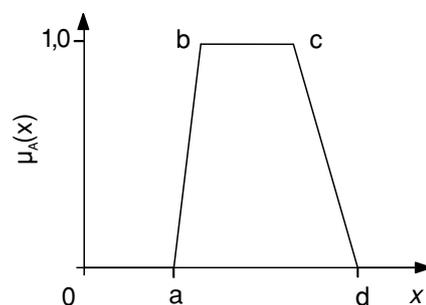
Figura 2.23 – Representação de uma função de pertinência gaussiana.

Fonte: Próprio autor.

máxima e igual a 1.

Função de pertinência trapezoidal: Segundo (AMENDOLA et al., 2004), as funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores (a , b , c e d), em que a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1. As arestas (a , b) e (c , d) possuem os valores intermediários, podendo ser representada pela Equação 2.4 e ilustrada pela Figura 2.24.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b, \\ 1 & \text{se } b < x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d, \\ 0 & \text{se } x > d. \end{cases} \quad (2.4)$$

Figura 2.24 – Representação de uma função de pertinência trapezoidal.

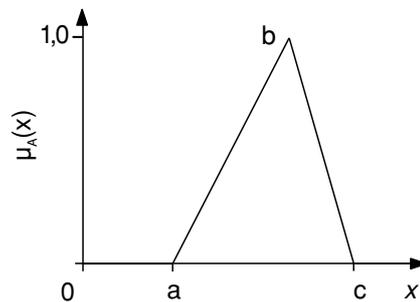
Fonte: Próprio autor.

Função de pertinência triangular: Segundo (AMENDOLA et al., 2004), as funções de pertinência triangulares são caracterizadas por um conjunto de três valores (a , b e c), em que a e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero,

e b em que a pertinência é máxima e igual a 1. As arestas (a, b) e (b, c) possuem os valores intermediários, podendo ser representada pela Equação 2.5 e ilustrada pela Figura 2.25.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c, \\ 0 & \text{se } x > c. \end{cases} \quad (2.5)$$

Figura 2.25 – Representação de uma função de pertinência triangular.

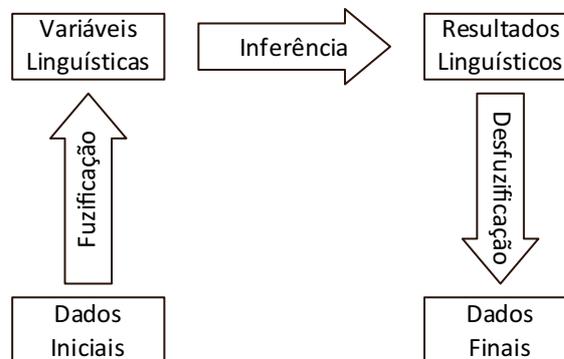


Fonte: Próprio autor.

2.6.1 Sistema lógico *Fuzzy*

O sistema lógico *Fuzzy* é um conjunto de métodos baseados no conceito de conjunto difuso e operações difusas, que possibilita uma modelagem mais realista e flexível de sistemas. O raciocínio *Fuzzy* é composto por três etapas, ou processos, que são: a fuzzificação, a inferência e a defuzzificação. A Figura 2.26 ilustra o fluxograma de todas as etapas do sistema lógico *Fuzzy*.

Figura 2.26 – Fluxograma de etapas do sistema lógico *Fuzzy*.



Fonte: (COX et al., 1998).

Fuzzificação

A primeira etapa do raciocínio *Fuzzy* é a fuzzificação, na qual se consideram como entradas dados precisos, resultantes de medições ou observações. É nesta etapa que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *Fuzzy* por uma função de pertinência (AMENDOLA et al., 2004).

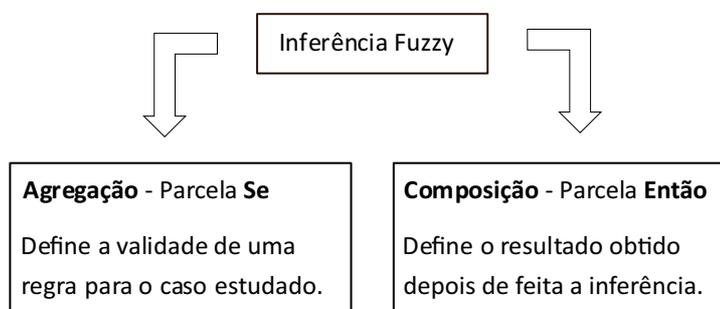
A fuzzificação consiste em transformar um dado numérico em um termo de linguagem natural. Por exemplo, a temperatura do ambiente é chamada de variável *Fuzzy*. A variável *Fuzzy* é atribuída a um conjunto *Fuzzy*, como *frio*, *conforto* ou *quente*. Estes tipos de atribuições são chamados de valores *Fuzzy*. A fuzzificação avalia o grau de pertinência da entrada numérica fornecida *temperatura* gerando variáveis *Fuzzy*, podendo então ser utilizadas no processo seguinte de inferência.

Inferência

A etapa da inferência é o momento em que serão criadas as regras ou proposições em função da associação das variáveis já definidas. Essas regras compõem o que é conhecido como base de conhecimento e, é essa base que associa as diversas funções de pertinência da entrada para serem interpretadas na fase de inferência *Fuzzy*. Esta fase tem por finalidade relacionar as possíveis variáveis entre si, por meio de regras pré-estabelecidas (JANÉ, 2004)

Esta fase do sistema lógico *Fuzzy* pode ser dividida em dois componentes: agregação e composição, conforme ilustrado na Figura 2.27. O primeiro diz respeito à chamada parcela *Se* das regras que irão reger o processo de inferência, e o segundo, refere-se à parcela *Então* do conjunto de regras assim chamadas, *Se-Então*. Estes componentes definem o processo de inferência lógica *Fuzzy*, controlando as relações entre variáveis linguísticas por meio de seus respectivos operadores lógicos.

Figura 2.27 – Inferência *Fuzzy*.



Fonte: (JANÉ, 2004).

Segundo (SIMÕES; SHAW, 2007), nas regras de inferência *Fuzzy* há dois tipos básicos

de implicações *Fuzzy*: o modus ponens (modo afirmativo) e o modus tollens (modo negativo), onde ambos operam de forma a se basear em premissas ou condições, que geram uma determinada conclusão.

No modus ponens há uma inferência progressiva.

Premissa 1 $x = A$

Modus ponens: Premissa 2: Se $x = A$, então $y = B$

Consequência: $y = B$

No modus tollens há uma inferência regressiva.

Premissa 1 $x = \text{não-B}$

Modus tollens: Premissa 2: Se $x = A$, então $y = B$

Consequência: $y = \text{não-A}$

As operações de implicação *Fuzzy* recebem como dados de entrada os valores $\mu A(x)$ recebidos da fuzzificação, e os valores de saída $\mu B(x)$ contidos na inferência. Da inferência resulta um conjunto difuso, o qual será convertido em escalar (valor condensado ou defuzzificado), fornecendo a saída do sistema.

Defuzzificação

Nesta etapa o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *Fuzzy* será convertido em um número. O objetivo é obter um único valor numérico que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos da variável linguística de saída.

Há na literatura algumas técnicas de defuzzificação, onde a seleção de uma delas é dependente da aplicação em desenvolvimento. A seguir são mostradas algumas das principais técnicas destacadas por (SIMÕES; SHAW, 2007) para um domínio discreto .

Método do Centro de Área ou Centróide: o valor numérico obtido representa o centro de gravidade da distribuição de possibilidade de saída do sistema *Fuzzy*. O centro de gravidade da distribuição pode ser determinado por meio da Equação 2.6, em que $\mu_{OUT}(u_i)$ é a área de uma função de pertinência e u_i é a posição do centróide composto, para o qual contribuem as duas funções de pertinência indicadas.

$$u = \frac{\sum_{j=1}^N u_j \mu_{OUT}(u_j)}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(u_j)} \quad (2.6)$$

Método da Média dos Máximos: produz um valor numérico que representa o valor médio de todos os valores centrais ativados. Neste método ignoram-se as áreas das funções de pertinência. O valor médio dos valores centrais pode ser determinado por meio da Equação 2.7, sendo u_m a posição do m -ésimo elemento, em que a função $\mu_{OUT}(u_i)$ tenha um máximo, e M é o número total desses elementos.

$$u = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (2.7)$$

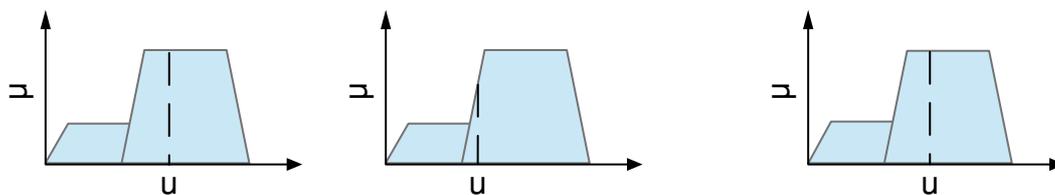
Método da Média Ponderada dos Máximos: produz um valor numérico considerando a média ponderada dos valores centrais ativados, sendo os pesos os graus de pertinência. O valor médio ponderado dos valores máximos pode ser determinado por meio da Equação 2.8, em que $\mu_{OUT}(u_i)$ indicam os pontos em que ocorrem os máximos das funções de pertinência.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}} \quad (2.8)$$

Na Figura 2.28 estão as representações gráficas das técnicas de defuzzificação descritas acima.

As particularidades de um sistema *Fuzzy* variam conforme a necessidade do sistema projetado. Em um sistema baseado em regras, onde se estabelece uma relação *Fuzzy* entre dados de entrada-saída, pode-se com relativa facilidade adaptar o projeto, com alteração de regras ou funções de pertinência, de modo a buscar a melhor adaptação ao problema proposto.

Mais detalhes acerca da teoria de lógica *Fuzzy* podem ser obtidos em (SIMÕES; SHAW, 2007).

Figura 2.28 – Representações gráficas das técnicas de defuzzificação.

(a) Centróide.

(b) Média dos máximos.

(c) Média ponderada dos máximos.

Fonte: Próprio autor.

No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica consistente acerca do monitoramento de disjuntores, com ênfase ao diagnóstico em função da resistência de contato.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões das pesquisas e estudos de caso mais relevantes sobre monitoramento e diagnóstico da condição dos contatos de disjuntores em função dos resultados de ensaios da MRD. Também serão relatadas pesquisas sobre o uso da lógica *Fuzzy* na avaliação dos resultados do monitoramento de equipamentos elétricos de potência.

3.1 Monitoramento de Disjuntores

O diagnóstico de disjuntores de potência com base no monitoramento e avaliação dos contatos elétricos tem sido desenvolvido há muitas décadas. Nos últimos anos algumas pesquisas têm sido desenvolvidas a partir utilização da MRD como principal parâmetro de avaliação e diagnóstico da condição dos contatos dos disjuntores.

As técnicas de diagnósticos e monitoramento podem ser usados para otimizar práticas de manutenção, substituição e permanência de disjuntores instalados no sistema (SWEETSER et al., 2002). No tocante ao monitoramento de disjuntores de alta tensão, o guia com as principais técnicas de monitoramento mais aplicado é o Guia para Seleção de Monitoramento para Disjuntores do IEEE, do inglês *Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers* (IEEE, 2001).

O diagnóstico das condições operacionais da câmara de extinção de arco de disjuntores de média e alta tensão tem sido realizado por meio da medição da resistência de contato, seja adotando a técnica da resistência estática ou pela técnica da resistência dinâmica de contato. Quaisquer dos métodos adotados devem produzir resultados que traduzam diretamente a capacidade de operação da câmara de extinção de arco em condições normais ou anormais do sistema.

Os primeiros estudos sobre resistência de contato datam da década de 1940, com Ragnar

Holm (HOLM et al., 1949). As primeiras descrições e comentários sobre a MRD datam do final da década de 1980 (LANDRY et al., 2006) e, desde então alguns aprimoramentos da técnica foram propostos para produzir resultados mais precisos.

(OHLEN et al., 1995) estudaram a aplicação da resistência dinâmica na análise da condição dos contatos em disjuntores. Os autores afirmam que a necessidade de comparação dos resultados com dados de fabricação e/ou resultados de testes anteriores, para tomada de decisão sobre intervenção ou não para manutenção no disjuntor dificulta a aplicação de novas metodologias. Entretanto, os autores acreditam que a MRD irá se consolidar como um método confiável no monitoramento dos contatos de disjuntores. Na obtenção das curvas da MRD os autores afirmam que a utilização de alta corrente de teste é mais viável para se reproduzir a condição dos contatos. Para a obtenção das curvas da MRD, os autores propõem um sistema com aquisição de dados de alta precisão, com pelo menos 12 bits de resolução, para os sinais de corrente e tensão e uma taxa de amostragem mínima de 20 kHz, tendo em vista que os disjuntores apresentam uma velocidade nominal de abertura típica de 10 m/s ou maior, o que resultaria em pelo menos uma amostra a cada 0,5 mm. Ainda segundo os autores, a MRD durante a abertura apresenta condições mais estáveis de medição, visto que durante o fechamento há saltos mecânicos do contato, proveniente do atrito entre os contatos, que podem provocar erros na medição. Na análise da MRD a curva de resistência versus tempo será a assinatura do disjuntor, e poderá ser utilizada como base para comparação com outras medições para o mesmo tipo de disjuntor, sendo o desgaste dos contatos associado ao comprimento do contato de arco. A pesquisa relata dois casos:

- estudo de caso 1: na avaliação de um disjuntor a SF₆ 145 kV/50 kA foi realizada uma rotina de testes para degradação dos contatos, com aplicação de uma sobrecorrente de 15 kA, durante 9 ms, utilizando-se de um circuito de testes desenvolvido. No período de 13 meses de ensaios foram registradas 340 operações sem falha. Após as 340 operações o disjuntor apresentou falha na abertura e o mesmo foi inspecionado. Os contatos de arco apresentaram significativa erosão, quando comparado com o contato quando novo;
- estudo de caso 2: na avaliação de um disjuntor Sprecher HGF 1012 SF₆, após o acúmulo de energia de 32 kA²s (integral de Joule) em interrupções com falhas, foi detectada uma redução no comprimento do contato de arco de 42 mm (contato novo) para 34 mm (contato

degradado), representando uma erosão/desgaste de aproximadamente 8 mm no comprimento do contato de arco.

Os estudos desenvolvidos por (OHLEN et al., 1995) apresentaram resultados relevantes quanto à aplicação da MRD como uma técnica eficiente na avaliação dos disjuntores. Entretanto, o diagnóstico por meio 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 significativa do seu comprimento. Os autores não relataram casos de análise onde se registrou uma degradação intermediária, se limitando a casos de extrema degradação dos contatos, para os quais o comprimento do contato de arco estava visivelmente fora de padrão, facilitando a interpretação dos resultados. No estudo não foi adotada uma modelagem matemática para análise das curvas da MRD, sendo a tomada de decisão restrita à medição do comprimento do contato de arco. O estudo apresentaria resultados mais fundamentados se fossem avaliados além do comprimento do contato de arco, os parâmetros como resistência do contato principal e resistência do contato de arco, o que possibilitaria a aplicação de um modelo matemático em função destes três parâmetros.

(LANDRY et al., 2006) descreveram uma metodologia de medição da resistência dinâmica, sendo a MRD obtida durante a abertura dos contatos. A metodologia foi aplicada em quatro conjuntos de contatos em diferentes níveis de degradação. Conforme resultados obtidos com a nova metodologia, os autores sugerem que para se obter dados precisos no ensaio, há a necessidade da redução da velocidade de abertura dos contatos do disjuntor (de 0,002 a 0,2 m/s). Segundo os autores, a MRD na velocidade nominal de abertura resulta em curvas não reproduzíveis entre medições, ou seja, duas curvas obtidas em medições consecutivas são muito distintas, sendo as curvas obtidas na mesma intervenção do disjuntor. Além disso, as curvas obtidas nos ensaios em velocidade nominal possuem muitos picos, dificultando a identificação do ponto de separação dos contatos principais, e conseqüentemente dificultando o diagnóstico do contato. Os autores afirmam que em velocidade reduzida, os pontos de separação dos contatos principais e de arco podem ser facilmente visualizados na curva da MRD. O sistema proposto pelos autores para o ensaio da MRD prevê a necessidade de injeção de uma corrente contínua de teste com pelo menos 100 A de amplitude. Adicionalmente, o sistema utiliza um módulo de aquisição de dados para gravação dos sinais de corrente e queda de

tensão nos terminais do disjuntor com as seguintes características: 3 canais analógicos de entrada, com resolução de 12 bits, frequência de amostragem maior que 10 kHz; tempo de aquisição total de 30 - 100 s; possibilidade de conexão com um computador portátil para processamento dos dados. Para o diagnóstico da condição dos contatos o principal parâmetro avaliado é a área da curva da MRD em ($\Omega.s$). Quanto maior a área da curva da MRD maior o nível de degradação do contato.

O método apresentado por (LANDRY et al., 2006) apresenta com principal vantagem a possibilidade de realização do ensaio da MRD com aplicação da corrente mínima sugerida pela norma ANSI C37.09, que especifica uma corrente de ensaio mínima de 100A. Outra vantagem é a facilidade de análise e interpretação dos resultados do ensaio da MRD que vincula a área da curva da MRD, expressa em ($\Omega.s$), ao nível de degradação dos contatos principais e de arco. Entretanto, o método se torna inviável para a maioria dos modelos de disjuntores, tendo em vista que para redução da velocidade de abertura dos contatos, há a necessidade de instalação de acessórios no mecanismo de abertura dos contatos, que demandando maiores custos e maior tempo de indisposição do disjuntor. Outro fator a se considerar, é que a ação intrusiva de instalação desses acessórios pode inserir defeitos no mecanismo de operação responsável pelo fechamento e abertura dos contatos do disjuntor. Quanto ao nível de corrente de sugerido (100 A), alguns subprodutos depositados nos contatos podem contribuir para o aumento da resistência, refletindo diretamente no incremento da área da curva da MRD, que indicaria que o contato apresenta um desgaste maior que o real, provocando um incorreto diagnóstico do estado do contato.

(LANDRY et al., 2008) estudaram a aplicação da resistência dinâmica na análise da condição dos contatos em disjuntores a SF₆, propondo uma estratégia para realização da MRD com base em três parâmetros relevantes: velocidade de abertura dos contato (baixa ou nominal); corrente contínua aplicada para obtenção da MRD na faixa de 100-2800 A e a presença de fluoretos metálicos depositados sobre os contatos do disjuntor. Segundo os autores a presença de fluoretos metálicos nos contatos, comumente presente em disjuntores a SF₆ podem falsear o valor da resistência dos contatos, o que pode provocar erros de diagnóstico da condição dos contatos. Os autores propuseram alguns encaminhamentos para mitigar possíveis erros durante a obtenção da MRD, em função de um prognóstico das condições dos contatos, bem como do tipo do mecanismo de acionamento dos contatos. Sendo o direcionamento da MRD aplicado em função dos três parâmetros anteriormente apresentados. Para aquisição dos dados foi utilizado o sistema proposto por (LANDRY et al., 2006).

Os resultados obtidos por meio dos ensaios conduziram à formulação das seguintes considerações:

- nos disjuntores a gás SF₆ que são suscetíveis à formação de fluoretos metálicos nos contatos, a MRD deve ser realizada em velocidade nominal de abertura dos contatos, precedida do aquecimento do contato principal por uma corrente de 2.800 A, por pelo menos 15 minutos, com o objetivo de provocar a evaporação dos fluoretos metálicos depositados na superfície dos contatos, bem como de sucessivas operações de abertura para limpeza dos contatos de arco.
- nos disjuntores que não utilizam o gás SF₆ como meio extintor, os quais não são suscetíveis à formação de fluoretos metálicos nos contatos, em que possa ser realizada a operação de abertura dos contatos em baixa velocidade, a MRD deve ser executada em baixa velocidade, conforme sugerido por (LANDRY et al., 2006). Para os demais tipos de disjuntores, a MRD deve ser executada em velocidade nominal de abertura com aplicação de corrente de pelo menos 700 A.

O método apresentado por (LANDRY et al., 2008) apresenta com principal vantagem uma alternativa para mitigar os efeitos dos fluoretos metálicos no ensaio da MRD. Outra vantagem é a facilidade de análise e interpretação dos resultados do ensaio da MRD que vincula a área da curva da MRD, ao nível de degradação dos contatos principais e de arco. Entretanto, a aplicação do método no que tange ao nível de corrente inviabiliza a realização do ensaio com os analisadores de disjuntores comercializados, tendo em vista que o nível de corrente desses equipamentos se limita a 250 A em sua maioria. Como alternativa se faz necessário o desenvolvimento de um complexo sistema para realização do ensaio da MRD, que demanda pessoal qualificado, maior tempo de indisposição do disjuntor e maiores custos para realização do ensaio. Há ainda de se considerar a restrição de espaço em algumas subestações para realização do ensaio em segurança.

(LINGJIE et al., 2008) desenvolveram um modelo de diagnóstico de falha para disjuntores de alta tensão do tipo SF₆. Os autores sugerem o monitoramento *online* de parâmetros característicos dos disjuntores, com base em análise estatística sobre a condição operacional de disjuntores e histórico de falhas. O modelo tem como parâmetros os dados de falhas apresentados pelos estudos do CIGRE Working Group 13.06 *Reliability of High Voltage Circuit-Breakers* e pela histórico dos sistema de energia da concessionária China *Electric Power Research Institute*. O modelo é fundamentado em lógica *Fuzzy*, para estimar o tipo de falha no disjuntor em função dos parâmetros monitorados. No

modelo são monitorados 15 parâmetros do disjuntor e diagnosticados 14 tipos de falhas. Para cada um dos 15 parâmetros monitorados é estabelecida uma relação de pertinência com os 14 tipos de falha. Segundo os autores, a lógica *Fuzzy* supera as dificuldades apresentadas pelos os sistemas baseados em redes neurais, que precisam de grandes quantidades de dados na fase de treinamento. O diagnóstico de falhas baseado em modelos *Fuzzy* apresenta como principal vantagem, o fato de permitirem adotar as características essenciais do comportamento, levando em consideração as incertezas e imprecisões associadas a cada parâmetro.

O estudo desenvolvido por (LINGJIE et al., 2008) endossa à aplicação da lógica *Fuzzy* no monitoramento de equipamentos, principalmente para os casos em que há um banco de dados limitado, simplificado os resultados, mas não comprometendo a eficiência do sistema. Adicionalmente, o estudo sugere o monitoramento indireto dos contatos em função da temperatura da câmara, o que pode prover excelentes resultados sobre condição dos contatos principais para disjuntores em serviço.

(PANCU et al., 2008) 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. Segundo os autores, a eletroerosão dos contatos está diretamente associada ao número de comutações e ao valor rms da corrente de curto-circuito associado a cada comutação, além do período de duração do arco elétrico.

Adicionalmente, o nível de erosão dos contatos depende ainda de parâmetros termofísicos dos materiais dos contatos e das condições ambientais que o disjuntor está submetido. Com base no nível da corrente de curto-circuito, dois equacionamentos para se determinar o número de operações seguras que o disjuntor pode executar foram propostos, um quando a corrente de curto-circuito é menor que 35% da capacidade do disjuntor, e outra para correntes de curto-circuito maior que 35% da capacidade do disjuntor. Com base na modelagem matemática proposta, um sistema de processamento de dados utilizando um microcontrolador foi desenvolvido e programado para estimar o número de operações do disjuntor. Por meio de sensores instalados no disjuntor e\ou na subestação, os parâmetros (corrente de curto-circuito, tempo de arco e condições ambientais) foram utilizados como dados de entrada no microcontrolador. Com a manipulação dos dados de entrada o sistema fornece uma estimativa do nível de erosão dos contatos, o desgaste linear do contato de arco (comprimento do arco) e estimativa do número operações do disjuntor. Segundo os autores, com a estimativa da eletroerosão real dos contatos será possível indicar o momento da substituição dos contatos, o que permite que haja um

controle mais eficiente sobre a manutenção e operação dos disjuntores.

O sistema proposto por (PANCU et al., 2008) apresenta com principal vantagem a possibilidade de monitoramento em tempo real do disjuntor. Entretanto, a pesquisa não apresenta resultados de validações entre o sistema proposto e inspeções de contatos de câmaras de extinção em serviço, sendo apresentado apenas um comparativo do número de operações do sistema proposto com dados de manufatura disponibilizado por um fabricante. Embora não se conheça o grau de eficiência do sistema proposto, presume-se que o sistema seja mais eficiente que as curvas de número de manobras admissíveis versus corrente de interrupção do disjuntor, disponibilizados pelos fabricantes, visto que as curvas são modeladas em função da máxima corrente registrada durante o curto-circuito, independentemente do tempo de duração do curto-circuito, enquanto que o sistema proposto utiliza o valor rms da corrente de curto-circuito e tempo do curto-circuito. Para se avaliar a eficiência do sistema, o trabalho deveria ter confrontado os resultados obtidos com o sistema proposto e comparado com a MRD e/ou outras técnicas já consolidadas.

Outra dificuldade de aplicação do sistema proposto, é que o mesmo necessita monitorar os parâmetros de curto-circuito desde o comissionamento do equipamento, inviabilizando a técnica para disjuntores já instalados.

(STANISIC; NEIMANIS, 2010) desenvolveram um sistema eletrônico portátil como alternativa para medição da resistência de contato estática ou dinâmica. Os autores destacam que o uso de baterias de alguns sistemas convencionais para o ensaio da MRD torna o sistema bastante pesado, bem como a desvantagem dos conversores CC/CC presentes em alguns equipamentos geram alto nível de ruído de chaveamento, que necessita ser filtrado, aumentando a complexidade do sistema de medição. Para aplicação da corrente de teste para a MRD, os autores propuseram a substituição das baterias por um ultra capacitor (100 - 600 F) com baixíssima resistência interna (0,5 - 3 $m\Omega$), que produziria uma corrente de teste de aproximadamente 250 A. Adicionalmente, o sistema utiliza um módulo de aquisição de dados para gravação dos sinais de corrente e queda de tensão por meio de um conversor A/D de 12 bits, o que proporcionaria uma exatidão das medições de $\pm 0,5\%$. O sistema proposto possui um circuito de controle para injeção da corrente e aquisição dos dados.

O sistema proposto por (STANISIC; NEIMANIS, 2010) apresenta com principal vantagem a possibilidade de independência dos sistemas atualmente comercializados. Entretanto, a pesquisa não apresenta resultados da MRD obtida com o sistema proposto, o que possibilitaria avaliar a

aplicabilidade e eficiência do sistema.

(JEYARAJ; HABTAY, 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 técnicas convencionais, de modo a economizar tempo e dinheiro por parte das concessionárias. Segundo os autores há uma relutância muito grande por parte das concessionárias na adoção de novas metodologias, ficando a análise de disjuntores restrita a testes de resistência estática e medição dos tempos de operação na abertura e no fechamento dos contatos, muitas vezes por meio de inadequados equipamentos de teste. Os autores destacaram a importância da aplicação de técnicas como a MRD, medição da capacitância dinâmica (MCD) e sinais acústicos relacionados a vibração dos contatos na avaliação de disjuntores de alta tensão em serviço. Segundo os autores nenhuma técnica em particular fornecerá um diagnóstico completo do disjuntor. Além disso, as técnicas devem ser claras e de fácil interpretação, caso contrário, a tomada de decisão será demorada, inviabilizando a implantação da técnica, sendo que a eficiência da técnica depende do tempo necessário para realizar os ensaios, bem como da qualidade dos resultados e facilidade de interpretação. Em função de alguns estudos de caso, a técnica da MRD associada com sensores de deslocamento do contato móvel foi avaliada, sendo os seguintes estudos de caso analisados:

- estudo de caso 1: Na avaliação do disjuntor SF₆ de um reator de barramento de 400 kV com 8 anos e 1400 operações, o ensaio da MRD resultou em uma curva fora do padrão, não sendo identificado anormalidade nos outros ensaios do disjuntor. Após a abertura da câmara foi identificado deformação no contato arco móvel, parafuso de fixação do contato principal móvel solto, bocal de teflon trincado, arranhões no contato principal móvel;
- estudo de caso 2: Na avaliação do disjuntor de um reator de barramento de 400kV, 50MVAR, o ensaio de resistência estática resultou em valores acima do convencional. O ensaio da MRD resultou em uma curva fora do padrão. Após a abertura da câmara foi identificado deformação no conjunto do contato móvel e na câmara de compressão.

O estudo desenvolvido por (JEYARAJ; HABTAY, 2011) apresenta resultados relevantes quanto à consolidação da MRD como uma técnica eficiente na avaliação dos disjuntores. Nos disjuntores estudados foi possível a realização do ensaio mais qualitativo da MRD, visto que os mesmos

dotavam de sensores de deslocamento do contato móvel, o que permitiu a avaliação da parte mecânica, além da avaliação dos contatos. Entretanto, os autores não relataram casos de análise onde se registrou uma degradação intermediária, limitando-se a casos de extrema degradação dos contatos, para os quais a curva da MRD é visivelmente fora de padrão, facilitando a interpretação dos resultados. No estudo não foi adotada uma modelagem matemática para análise das curvas da MRD, sendo a tomada de decisão sobre a revisão ou inspeção interna definida heurísticamente, com base na avaliação visual de assinaturas da MRD.

(SODHA et al., 2012) avaliaram a aplicação da MRD em disjuntores de alta tensão em serviço por meio da análise de alguns estudos de caso. Os autores destacam a importância da MRD durante o comissionamento da subestação, denominada de *impressodigital* ou *assinatura*, a qual é referência para intervenções posteriores no equipamento. Os autores destacam a importância de um banco de dados da MRD, obtidas a cada intervenção no equipamento, de forma que esse banco de dados seja uma referência para o disjuntor analisado, bem como para outros disjuntores do mesmo modelo. Assim, por meio do monitoramento periódico, com base em condições de operação, tem-se uma evolução da assinatura do disjuntor (curva da MRD), com isso, diversos defeitos ficam amplificados na assinatura, e por meio do cruzamento de curvas da MRD obtidas em diferentes intervenções podem ser identificados. Os autores destacam que a aplicação e análise da técnica da MRD requer pessoal qualificado, com conhecimento em disjuntores, desde o mecanismo de operação até a configuração da câmara de extinção de arco. Para se avaliar a aplicação da MRD foram analisados os resultados obtidos em 4 estudos de caso, com ensaios da MRD realizados com um analisador típico, com injeção de corrente de 100 A e frequência de amostragem de 10 kHz, bem como com sensores de deslocamento do contato móvel. Os seguintes estudos de caso foram analisados:

- estudo de caso 1: o ensaio identificou folga em um dos parafusos do sistema de acoplamento do contato móvel, não sendo identificado nos outros ensaios do disjuntor.
- estudo de caso 2: detectado desgaste nos dedos de contato de arco do contato móvel.
- estudo de caso 3: detectado problemas no fechamento do contato móvel, identificando que o contato não estava fechando completamente.
- estudo de caso 4: identificação de defeitos de fabricação em disjuntores. Como instalação de câmara com menor capacidade de extinção e menor nível de isolamento que o especificado;

torque do mecanismo de acionamento menor que o necessário para o disjuntor; desalinhamento dos contatos.

Segundo os autores a implantação da técnica tem reduzido consideravelmente a taxa de falha de disjuntores, gerando economia de recursos, visto que os disjuntores não mais têm sido abertos periodicamente, mas com base em condições de operação, além de auxiliar os fabricantes de disjuntores na melhoria da qualidade de fabricação. A decisão sobre a revisão ou inspeção interna sendo tomada apenas com base na avaliação de assinaturas da MRD.

O estudo desenvolvido por (SODHA et al., 2012) apresenta contribuição relevante quanto à consolidação da MRD como uma técnica eficiente na avaliação dos disjuntores. O sucesso do estudo deve-se principalmente a eficiência da metodologia, tendo em vista que as assinaturas da MRD foram obtidas desde o comissionamento dos disjuntores. Nos disjuntores estudados foi possível a realização de um ensaio mais qualitativo da MRD, visto que os mesmos dotavam de sensores de deslocamento do contato móvel, o que permitiu a avaliação da parte mecânica, além da avaliação dos contatos. O estudo não relata casos de insucesso nos resultados obtidos, embora o nível de corrente aplicado nos testes (100 A) esteja abaixo do nível sugerido, principalmente para avaliação dos disjuntores a SF₆ (estudo de caso 3 (PANCU et al., 2008), (LANDRY et al., 2008)), em virtude da possível presença de fluoretos metálicos na superfície dos contatos. Entretanto, os autores não relataram casos de análise onde se registrou uma degradação intermediária, se limitando a casos de extrema degradação dos contatos, para os quais a curva da MRD é visivelmente fora de padrão, facilitando a interpretação dos resultados. No estudo não foi adotada uma modelagem matemática para análise das curvas da MRD, sendo a tomada de decisão sobre a revisão ou inspeção interna definida heurísticamente, com base na avaliação visual de assinaturas da MRD.

(SANTOS et al., 2013) desenvolveu um sistema fundamentado em lógica *Fuzzy* para apoio a programação da manutenção de disjuntores de alta tensão. O sistema estima uma data para uma intervenção no disjuntor em função de um banco de dados. O banco de dados é oriundo de um sistema de gerenciamento da manutenção de uma concessionária de serviços elétricos, sendo composto por dados de ensaios, características técnicas, ordem de serviço e valores de referência dos fabricantes. Os ensaios de avaliação do isolamento, avaliação dos contatos e avaliação da parte mecânica compõem um banco de dados com 76.147 resultados de ensaios cadastrados, entre 1983 e 2012. O banco de

dados de ordem de serviço (OS) classifica o serviço realizado, seja de melhoria, ajuste, preventiva ou corretiva, registrados no período de 2002 a 2012, totalizando 1.122 OS. Como saída, para cada ensaio realizado o sistema estima um período para a próxima intervenção no equipamento.

O estudo desenvolvido por (SANTOS et al., 2013) apresenta contribuição relevante quanto à aplicação da lógica *Fuzzy* no monitoramento de disjuntores. Todavia, o banco de dados é composto por relatórios de ensaios de teste tradicionais em disjuntores, como por exemplo, resistência estática de contato, que de acordo com os estudos de (LANDRY et al., 2006), (LANDRY et al., 2008), (TURCOTTE; GAUTHIER, 2008), (BHOLE; GANDHARE, 2015), em muitos casos apresenta comprovada ineficiência, o que compromete a confiabilidade dos resultados.

(RAZI-KAZEMI et al., 2013) desenvolveram um sistema para identificar os disjuntores mais críticos para monitoramento *online*, tendo em vista que em função do número de disjuntores no sistema elétrico, é financeiramente inviável o monitoramento *online* de todos eles. O sistema de identificação é fundamentado em lógica *Fuzzy*. O sistema *Fuzzy* foi desenvolvido considerando-se índices de avaliação hierárquica, heurísticamente definida, construído com base em dados de testes, dados de manutenção, frequência de falhas e condições ambientais de operação. Os parâmetros são processados no sistema *Fuzzy* que determina quais os disjuntores com estado de operação mais suscetível à falhas, para os quais deve ser implantado um sistema de monitoramento *online*.

O estudo desenvolvido por (RAZI-KAZEMI et al., 2013) utiliza um maior banco de dados na avaliação da condição quando comparado ao estudo desenvolvido por (SANTOS et al., 2013), tendo em vista que além dos resultados de manutenção, também utiliza dados de monitoramento em tempo real das condições operacionais do disjuntor. Todavia, o banco de dados é composto por relatórios de ensaios de teste tradicionais em disjuntores, como por exemplo, resistência estática de contato, que de acordo com os estudos de (LANDRY et al., 2006), (LANDRY et al., 2008), (TURCOTTE; GAUTHIER, 2008), (BHOLE; GANDHARE, 2015), em muitos casos apresenta comprovada ineficiência, o que compromete a confiabilidade dos resultados.

(UKIL et al., 2013) avaliaram o desgaste dos contatos de arco em função da emissão de sinais acústicos e monitoramento da vibração dos contatos nas operações de abertura. No estudo foram avaliados três contatos, sendo o primeiro contato novo, o segundo contato com degradação média e um terceiro contato com degradação alta. Em função dos sinais acústicos medidos foi possível identificar os contatos com maior desgaste, sendo os resultados confrontados com sensores

de deslocamento dos contatos para aferição da técnica. Os autores destacaram a importância da aplicação de técnicas não evasivas, como a avaliação dos sinais acústicos relacionados a vibração dos contatos na avaliação de disjuntores de alta tensão em serviço.

O estudo desenvolvido por (UKIL et al., 2013) apresenta uma significativa contribuição para consolidação da técnica da análise acústica dos sinais nas operações de abertura dos contatos. No estudo não foi adotada uma modelagem matemática para análise das frequências presentes nos sinais de emissão acústica, sendo a tomada de decisão sobre o estado do contato definida em função do comprimento do contato, o que pode ser feito analisando somente a curva de deslocamento do contato móvel.

(TINGTING et al., 2014) avaliou a influência da corrente de teste no ensaio da MRD. No estudo foi desenvolvido um sistema para injeção de corrente de testes de até 1 kA. Adicionalmente, o sistema utiliza um módulo de aquisição de dados para gravação dos sinais de corrente e queda de tensão por meio de um conversor A/D de 12 bits e 1 MHz. Nos estudos foram utilizados dois pares de contatos, sendo um contato novo e um contato com elevado nível de degradação. Nos ensaios da MRD foram estabelecidos 8 níveis de corrente de testes, incluindo 140 A, 240 A, 370 A, 460 A, 600 A, 700 A, 800 A e 870 A, sendo realizados 5 ensaios da MRD para cada contato. Segundo os autores, a corrente de ensaio tem menos influência no contato com maior degradação. A reprodutibilidade entre curvas foi avaliada em função de parâmetros da Transformada de Fourier (FFT).

O sistema proposto por (TINGTING et al., 2014) apresenta com principal vantagem a possibilidade de independência dos sistemas atualmente comercializados. Entretanto, o estudo se limita a utilização de apenas dois contatos, com condições operacionais bem distintas (um novo e um muito degradado). A utilização de um número maior de amostras, em níveis distintos de degradação possibilitaria avaliar melhor a influência da corrente nos parâmetros da MRD.

(LIN et al., 2014) desenvolveram um modelo de avaliação da condição de operação de disjuntores fundamentado em lógica *Fuzzy*, processo analítico hierárquico e probabilidade. O modelo de avaliação utiliza quatro parâmetros de avaliação: características elétricas, características mecânicas, características isolamento e uma miscelânea de outros fatores (condições operacionais, tempo de serviço e dados de manutenção). No modelo é utilizado um sistema de índice de avaliação hierárquica, heurísticamente definida, construído com base em dados de testes, dados de monitoramento por meio de dispositivos eletrônicos, dados de manutenção e condições ambientais de operação. Em função

do parecer de especialistas em disjuntores, para os quatro parâmetros de avaliação são atribuídos pesos e nível de hierarquia. Os parâmetros são processados em um sistema *Fuzzy* que determina a probabilidade de falha do disjuntor.

O estudo desenvolvido por (LIN et al., 2014) apresenta basicamente o mesmo método de avaliação do estudo desenvolvido por (RAZI-KAZEMI et al., 2013). Ambos utilizam um maior banco de dados na avaliação da condição quando comparados ao estudo desenvolvido por (SANTOS et al., 2013), tendo em vista que além dos resultados de manutenção, também utiliza dados de monitoramento em tempo real das condições operacionais do disjuntor. Todavia, o banco de dados é composto por relatórios de ensaios de teste tradicionais em disjuntores, como por exemplo, resistência estática de contato, que de acordo com os estudos de (LANDRY et al., 2006), (LANDRY et al., 2008), (TURCOTTE; GAUTHIER, 2008), (BHOLE; GANDHARE, 2015), em muitos casos apresenta comprovada ineficiência, o que compromete a confiabilidade dos resultados.

(BHOLE; GANDHARE, 2015) avaliaram a aplicação da MRD em disjuntores de alta tensão em serviço por meio da análise de alguns estudos de caso. Os autores destacam a importância da MRD no diagnóstico de problemas mecânicos como erros de montagem durante a fabricação, remontagem incorreta do equipamento após intervenções, além da identificação de desgaste nos contatos e nos componentes da câmara de extinção de arco. Contudo, os autores advertem que o correto diagnóstico sobre o equipamento é dependente de especialistas em disjuntores, os quais devem conhecer os aspectos construtivos de cada modelo avaliado. Os autores fazem algumas ressalvas sobre o trabalho de (LANDRY et al., 2006), no tocante as intervenções para ajustes no mecanismo de acionamento. Segundo os autores, para realização de ensaios em baixa velocidade, há a possibilidade de inserção de novos defeitos no mecanismo de acionamento. Adicionalmente, a MRD em baixa velocidade pode não dar as informações corretas sobre os contatos, tendo em vista que o disjuntor somente opera em velocidade nominal. Para se avaliar a aplicação da MRD foram analisados os resultados obtidos em 4 estudos de caso, com ensaios da MRD realizados com um analisador típico, com injeção de corrente de 100 A e frequência de amostragem de 10 kHz, bem como com sensores de deslocamento do contato móvel. Os seguintes estudos de caso foram analisados:

- estudo de caso 1: o ensaio identificou folga nos parafusos da junta do cilindro soprador do sistema de acoplamento do contato móvel, não sendo identificado nos outros ensaios do dis-

juntor.

- estudo de caso 2: o ensaio detectou a instalação de um contato de arco para 145 kV em um disjuntor de 245 kV.
- estudo de caso 3: o ensaio identificou folga na fixação do contato de arco móvel.
- estudo de caso 4: o ensaio identificou folga na fixação do anel de fixação bocal de PTFE (teflon) do conjunto do contato principal.

O estudo desenvolvido por (BHOLE; GANDHARE, 2015) apresenta basicamente as mesmas contribuições do estudo desenvolvido por (SODHA et al., 2012), visto que ambos apresentam contribuição relevante quanto à consolidação da MRD como uma técnica eficiente na avaliação dos disjuntores. Nos disjuntores estudados foi possível a realização de um ensaio mais qualitativo da MRD, visto que os mesmos dotavam de sensores de deslocamento do contato móvel, o que permitiu a avaliação da parte mecânica, além da avaliação dos contatos. O estudo não relata casos de insucesso nos resultados obtidos, embora o nível de corrente aplicado nos testes (100 A) esteja abaixo do nível sugerido, principalmente para avaliação dos disjuntores a SF₆ (estudo de caso 3 (PANCU et al., 2008), (LANDRY et al., 2008)), em virtude da possível presença de fluoretos metálicos na superfície dos contatos. Os autores não relataram casos de análise específica de degradação dos contatos, se restringindo a casos de avaliação mecânica. Em virtude da falta de casos de avaliação da degradação, não foi adotada nenhuma análise das curvas da MRD, sendo a tomada de decisão sobre a revisão ou inspeção interna definida heurísticamente, com base na avaliação visual das curvas de deslocamento do contato.

Na revisão bibliográfica verifica-se que de forma geral, que não há um consenso na metodologia de ensaio e avaliação dos disjuntores em função da resistência de contato. Verifica-se também, que praticamente todos os trabalhos avaliados, se referem a classificação de padrões de curvas da MRD para contatos com avançado nível de degradação, o que simplifica bastante o diagnóstico.

A seguir, na Tabela 3.1, como forma de destacar as publicações referentes ao diagnóstico de disjuntores e a inserção desta pesquisa no estado da arte, apresenta-se resumidamente a revisão bibliografia em forma de tabela.

Tabela 3.1 – Síntese da revisão bibliográfica.

Referência	Técnica Empregada	Técnica de Diagnóstico
(OHLEN et al., 1995)	Ensaio da MRD e curva de deslocamento do contato móvel	Comprimento do contato
(LANDRY et al., 2006)	Ensaio da MRD	Área da curva da MRD
(LANDRY et al., 2008)	Ensaio da MRD	Área da curva da MRD
(LINGJIE et al., 2008)	Monitoramento <i>online</i> de 15 parâmetros do disjuntor	Lógica <i>Fuzzy</i>
(PANCU et al., 2008)	Estimativa do desgaste do contato durante um curto circuito	Nível da corrente e tempo de duração do curto circuito
(STANISIC; NEI-MANIS, 2010)	Ensaio da MRD	Não empregada
(JEYARAJ; HARTAY, 2011)	Ensaio da MRD e curva de deslocamento do contato móvel	Análise heurística da MRD
(SODHA et al., 2012)	Ensaio da MRD com obtenção da curva de deslocamento do contato móvel	Análise heurística da MRD
(SANTOS et al., 2013)	Técnicas convencionais: Avaliação do isolamento, contatos e da parte mecânica	Lógica <i>Fuzzy</i>
(RAZI-KAZEMI et al., 2013)	Técnicas convencionais: Características do isolamento, elétricas, mecânicas, condições operacionais e frequência de falhas	Lógica <i>Fuzzy</i> e Probabilidade
(UKIL et al., 2013)	Análise dos sinais de vibração e emissão acústica	Comprimento do contato
(LIN et al., 2014)	Técnicas convencionais: Características do isolamento, elétricas, mecânicas, condições operacionais e frequência de falhas	Lógica <i>Fuzzy</i> e Probabilidade
(TINGTING et al., 2014)	Avaliação da MRD em função da corrente de teste	Não empregada
(BHOLE; GANDHARE, 2015)	Ensaio da MRD e curva de deslocamento do contato móvel	Análise heurística da MRD

Capítulo 4

Material e Métodos

Este capítulo descreve o material e os métodos empregados na determinação e validação de parâmetros de monitoramento da degradação de disjuntores de média e alta tensão. O trabalho compreende cinco etapas, assim distribuídas:

- Ensaios da MRD com um analisador de disjuntor comercial com abertura dos contatos em velocidade nominal e abertura dos contatos em velocidade reduzida;
- Projeto, desenvolvimento e aplicação de um sistema alternativo para realização do ensaio da MRD;
- Ensaios de levantamento das curvas da MRD de disjuntores a óleo, utilizando o sistema alternativo desenvolvido, com abertura dos contatos em velocidade nominal com diversos níveis de corrente de teste;
- Ensaios de envelhecimento acelerado com sobrecorrente aplicada na frequência industrial, ensaios de envelhecimento acelerado com seções de aplicação de curtos-circuitos e ensaios de envelhecimento acelerado por meio de degradação térmica (imersão dos contatos em óleo mineral isolante naftênico aquecido);
- Desenvolvimento e aplicação de rotina computacional para avaliação do nível de degradação dos casos analisados utilizando as técnicas de apoio à decisão com aplicação de lógica *Fuzzy*.

4.1 Material

Para a avaliação do processo de degradação dos contatos de disjuntores, por meio da medição da resistência de contato, faz-se necessário o acompanhamento da evolução da degradação dos contatos

por meio do monitoramento das curvas da MRD. As curvas devem ser obtidas em intervenções anteriores, preferencialmente na fase de comissionamento do disjuntor ou por meio do confronto de curvas obtidas em outros disjuntores de mesmas características (GRIJP et al., 1996), (LANDRY et al., 2006), (SODHA et al., 2012).

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados quatro modelos de disjuntores, sendo dois de média tensão (do tipo PVO) e dois de alta tensão (um do tipo PVO e outro do tipo SF₆). O disjuntor do tipo SF₆ ainda se encontra em operação na subestação de 69 kV da CAGEPA no município de Boqueirão-PB, os demais disjuntores foram ensaiados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

4.1.1 Disjuntores de média tensão

As principais características dos dois modelos de disjuntores de média tensão utilizados estão apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2 .

Tabela 4.1 – Principais características do disjuntor de média tensão de 800 A - D1.

Tipo: 3AC2711-4	Nº: 0003709	Ano Fabr.: 1978
Un: 15 kV	In: 800 A	Icc: 12,5 kA
F: 60 Hz	Meio isolante: Óleo mineral	Fabricação: Siemens

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.2 – Principais características do disjuntor de média tensão de 630 A - D2.

Tipo: PL 15C	Nº: 9351	Ano Fabr.: 1985
Un: 17,5 kV	In: 630 A	Icc: 12,5 kA
F: 60 Hz	Meio isolante: Óleo mineral	Fabricação: Beghim

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.1(a) é apresentada uma fotografia do disjuntor PVO de média de tensão tipo de 800 A e na Figura 4.1(b) apresentada uma fotografia do disjuntor de média de tensão de 630 A, utilizados.

Figura 4.1 – Disjuntores de média tensão.

(a) Disjuntor D1.



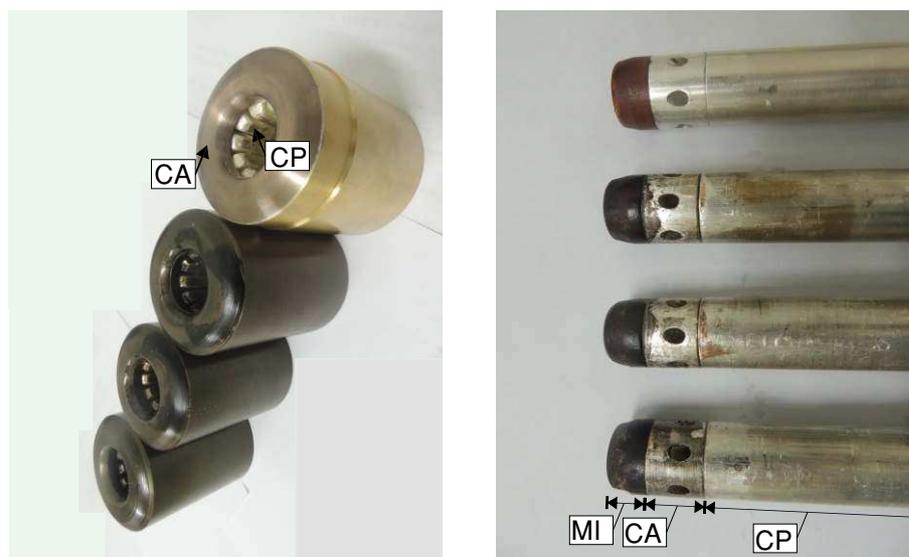
(b) Disjuntor D2.

Fonte: Próprio autor.

No disjuntor D1 estão sendo utilizadas três amostras referentes a contatos degradados em serviço, em níveis distintos de degradação, denominadas de amostras (D1-CMT1, D1-CMT2 e D1-CMT3) e, uma quarta amostra (D1-CMT4) referente a contatos novos. A cada seção de ensaios da MRD, as amostras de contatos foram instaladas em um único pólo do disjuntor. Cada amostra do contato é constituída por um contato fixo e um contato móvel, com corrente nominal de 800 A. As quatro amostras do disjuntor possuem as mesmas características de fabricação.

Quanto as características de configuração dos contatos do disjuntor D1, o contato principal é constituído por dez dedos de contato e o contato de arco é constituído por uma carcaça cilíndrica, conforme detalhes construtivos apresentados na Figura 2.8.

Na Figura 4.2(a) e Figura 4.2(b) estão apresentadas fotografias dos contatos fixo e móvel, respectivamente, referentes às amostras D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4. Sendo: MI - material isolante na ponta do contato; CA - Contato de Arco e CP - Contato Principal.

Figura 4.2 – Amostras de contatos D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4.

(a) Contatos fixo.

(b) Contatos móvel.

Fonte: Próprio autor.

No disjuntor de média tensão do tipo PVO (D2) estão sendo utilizadas três amostras referentes a contatos degradados em serviço, denominadas de amostras D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3. Cada amostra do contato é constituída por um contato fixo e um contato móvel, com corrente nominal de 630 A. As três amostras dos disjuntores D2 possuem as mesmas características de fabricação. Os contatos do disjuntor D2 não foram removidos do equipamento, tendo em vista que o disjuntor fora emprestado apenas para ensaios da MRD, sem autorização para intervenção na câmara de extinção.

4.1.2 Disjuntores de Alta Tensão

As principais características dos dois modelos de disjuntores de alta tensão utilizados estão apresentadas nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Na Figura 4.3(a) e na Figura 4.3(b) são apresentadas, respectivamente, fotografias dos disjuntores de alta tensão do tipo PVO e SF₆, utilizados.

Tabela 4.3 – Principais características dos disjuntores de alta tensão tipo PVO de 2.000 A - D3.

Tipo: HPF 409K	Nº: 11.761/3	Ano Fabr.: 1981
Un: 72,5 kV	In: 2.000 A	Icc: 31,5 kA
F: 60 Hz	Meio isolante: Óleo mineral	Fabricação: Sprecher Schun
Tipo: HPF 409K	Nº: 11.761/7	Ano Fabr.: 1981
Un: 72,5 kV	In: 2.000 A	Icc: 31,5 kA
F: 60 Hz	Meio isolante: Óleo mineral	Fabricação: Sprecher Schun

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.4 – Principais características do disjuntor de alta tensão tipo SF₆ de 1.650 A - D4.

Tipo: FX 11	Nº: 3929/1/1	Ano Fabr.: 1993
Un: 72,5 kV	In: 1.650 A	Icc: 25 kA
F: 60 Hz	Meio isolante: SF ₆	Fabricação: Sprecher Energie

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.3 – Disjuntores de alta tensão.



(a) Disjuntores tipo PVO, modelo HPF 409K.

(b) Disjuntor tipo SF₆, modelo FX 11.

Fonte: Próprio autor.

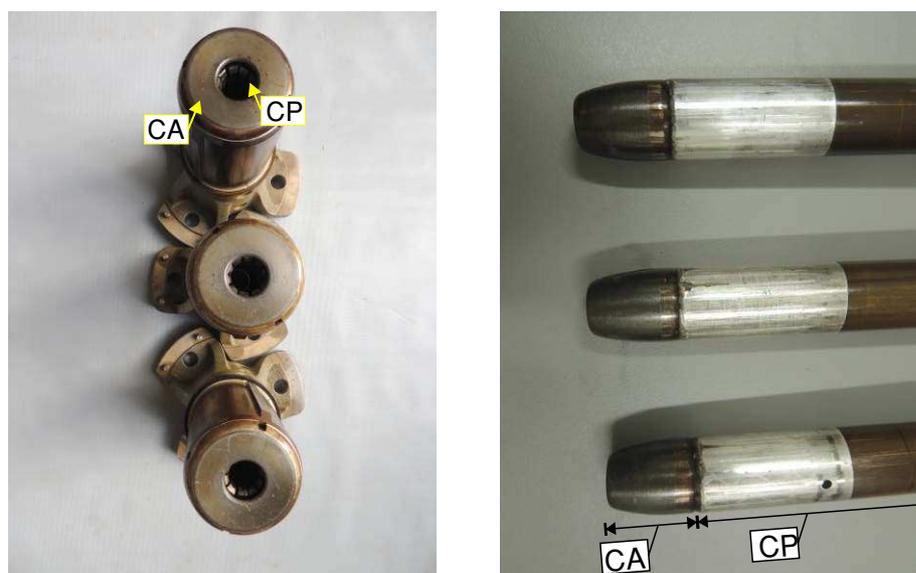
Nos disjuntores de alta tensão do tipo PVO estão sendo utilizadas quatro amostras, sendo

três referentes a contatos degradados em serviço, em níveis distintos de degradação, denominadas de amostras D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3 e uma quarta amostra denominada de amostras D3-CAT4 com baixíssima degradação. Cada amostra do contato é constituída por um contato fixo e um contato móvel, com corrente nominal de 2.000 A. As três amostras dos disjuntores D3 possuem as mesmas características de fabricação.

Na Figura 4.4(a) e na Figura 4.4(b) estão apresentadas fotografias dos contatos fixo e móvel, respectivamente, das amostras D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3. Sendo: CA - Contato de Arco e CP - Contato Principal.

Quanto as características de configuração dos contatos do disjuntor D3, o contato principal é constituído por dez dedos de contato e o contato de arco é constituído por uma carcaça cilíndrica. Os contatos foram desmontados do disjuntor para fins de registro fotográfico e inspeção visual do nível de degradação.

Figura 4.4 – Amostras de contatos D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3.



(a) Contatos fixo.

(b) Contatos móvel.

Fonte: Próprio autor.

No disjuntor de alta tensão do tipo SF₆ estão sendo utilizadas três amostras referentes a contatos degradados em serviço, denominadas de amostras D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3. Cada amostra do contato é constituída por um contato fixo e um contato móvel, com corrente nominal de 1.650 A. As três amostras dos disjuntores D4 possuem as mesmas características de fabricação.

Os contatos do disjuntor D4 não foram removidos do equipamento, tendo em vista que o disjuntor se encontra em serviço, sendo que o mesmo fora emprestado apenas para ensaios da MRD, sem autorização para intervenção na câmara de extinção.

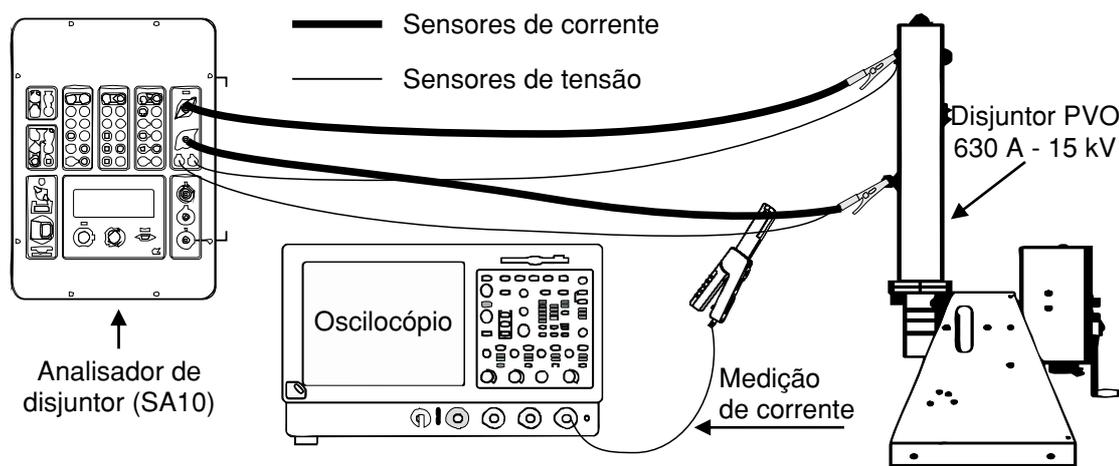
4.2 Métodos

4.2.1 Testes com o analisador de disjuntor SA10, fabricação ELCON

Inicialmente foram realizados testes de funcionamento para o levantamento das características de operação e potencialidades do analisador de disjuntor SA10 de fabricação da Elcon. Nos ensaios com o SA10 foi utilizado o disjuntor D2. A finalidade dos testes é avaliar a aplicabilidade do analisador na obtenção da MRD em diferentes velocidades de abertura dos contatos.

Na Figura 4.5 é apresentada uma ilustração do arranjo utilizado no ensaio de obtenção da curva de injeção de corrente com o SA10. A curva característica de corrente do SA10 foi obtida no disjuntor de média tensão PVO de 630 A com os contatos fechados. Utilizando-se de um sensor de corrente por efeito hall com relação 10 mV/A e um osciloscópio foi feita a medição do sinal da corrente em função do tempo. Na Figura 4.6 é apresentada a curva de injeção de corrente em função do tempo para o SA10, obtida no osciloscópio.

Figura 4.5 – Ilustração do arranjo para obtenção da curva $i \times t$ do analisador de disjuntor, modelo SA10 - ELCON.



Fonte: Próprio autor.

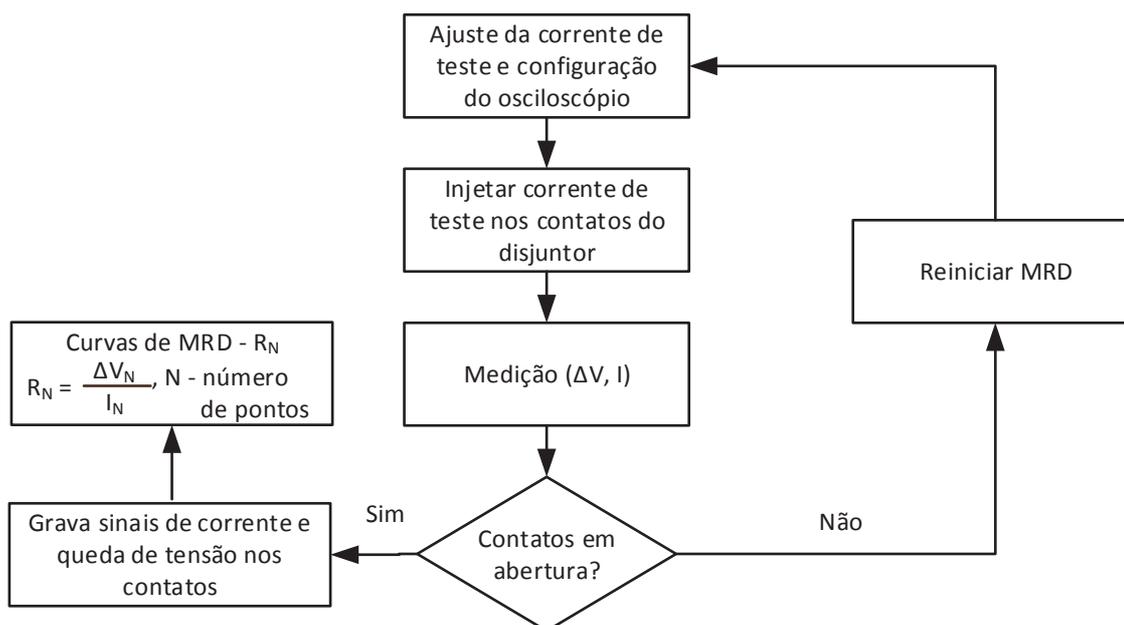
Analisando a configuração do sinal medido, o valor de pico do sinal foi de 1,90 V (1,9 div x

utilizados, descritos na seção 4.1, ensaios de medição da resistência de contato dinâmica foram realizados, utilizando-se o sistema desenvolvido. As características do sistema de medição são:

- 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 ($0,0362 \Omega$ - $1,087 \Omega$ / 3.883 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);
- aquisição dos sinais (corrente e queda de tensão nos contatos) utilizando-se de osciloscópio digital, com taxa de amostragem de 125 kHz;
- confecção das curvas de resistência através de rotina computacional desenvolvida em Matlab®.

Na Figura 4.7 é apresentado o fluxograma de ensaio da MRD para os disjuntores de média e de alta tensão. A etapa de configuração dos parâmetros do ensaio da MRD compreende o ajuste do nível da corrente de teste e configuração do osciloscópio para medição dos sinais para determinação da resistência de contato.

Figura 4.7 – Fluxograma de ensaio da MRD.



Fonte: Próprio autor.

Com o objetivo de produzir resultados mais consistentes, que permitam assegurar o correto diagnóstico do disjuntor, os resultados da MRD não devem ser provenientes de um único ensaio.

Preferencialmente, os parâmetros da MRD devem ser obtidos a partir de vários ensaios, de modo a avaliar a similaridade de resultados entre ensaios. De posse dos resultados dos ensaios, os parâmetros da MRD devem ser extraídos, aplicando técnicas adequadas de processamento matemático.

Neste trabalho, cada pólo do disjuntor foi submetido a uma seção de ensaio da MRD que contempla dez medições, resultando em dez curvas da MRD (MRD₁, MRD₂, MRD₃, MRD₄, MRD₅, MRD₆, MRD₇, MRD₈, MRD₉ e MRD₁₀), para cada pólo. Em função das dez curvas da MRD obtidas nos ensaios, uma curva MRD_M é calculada. A curva MRD_M é resultado da curva média entre as dez curvas obtidas nos ensaios da MRD.

Para extração dos parâmetros da MRD, cinco curvas, dentre as dez obtidas nos ensaios são selecionadas. Optou-se por utilizar somente cinco das dez curvas medidas, tendo em vista que durante alguns ensaios foram obtidas curvas da MRD fora dos padrões de uma MRD típica.

A não padronização das curvas da MRD é provocada principalmente por vibrações mecânicas, em níveis anormais no disjuntor, que provocam vibrações principalmente no contato móvel durante o ensaio da MRD, o que compromete a fidelidade dos resultados.

As cinco curvas selecionadas são as que apresentam maior similaridade com a curva MRD_M.

Para determinação da similaridade entre curvas foi adotado o coeficiente de determinação R². Segundo (DUFOR, 2011) e (GOUDARZI et al., 2014), o R² é uma medida da capacidade que um modelo ajustado por um parâmetro, ou um conjunto de parâmetros, possui em representar um determinado conjunto de dados.

O R² é definido de acordo com a Equação 4.1, apresentada a seguir:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}}, \quad (4.1)$$

Sendo (SQ_{res}) é a soma dos quadrados dos resíduos e (SQ_{tot}) é soma total dos quadrados, sendo representados pelas Equações 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$SQ_{res} = \sum_{j=1}^m \|v_m(j) - v_s(j)\|^2, \quad (4.2)$$

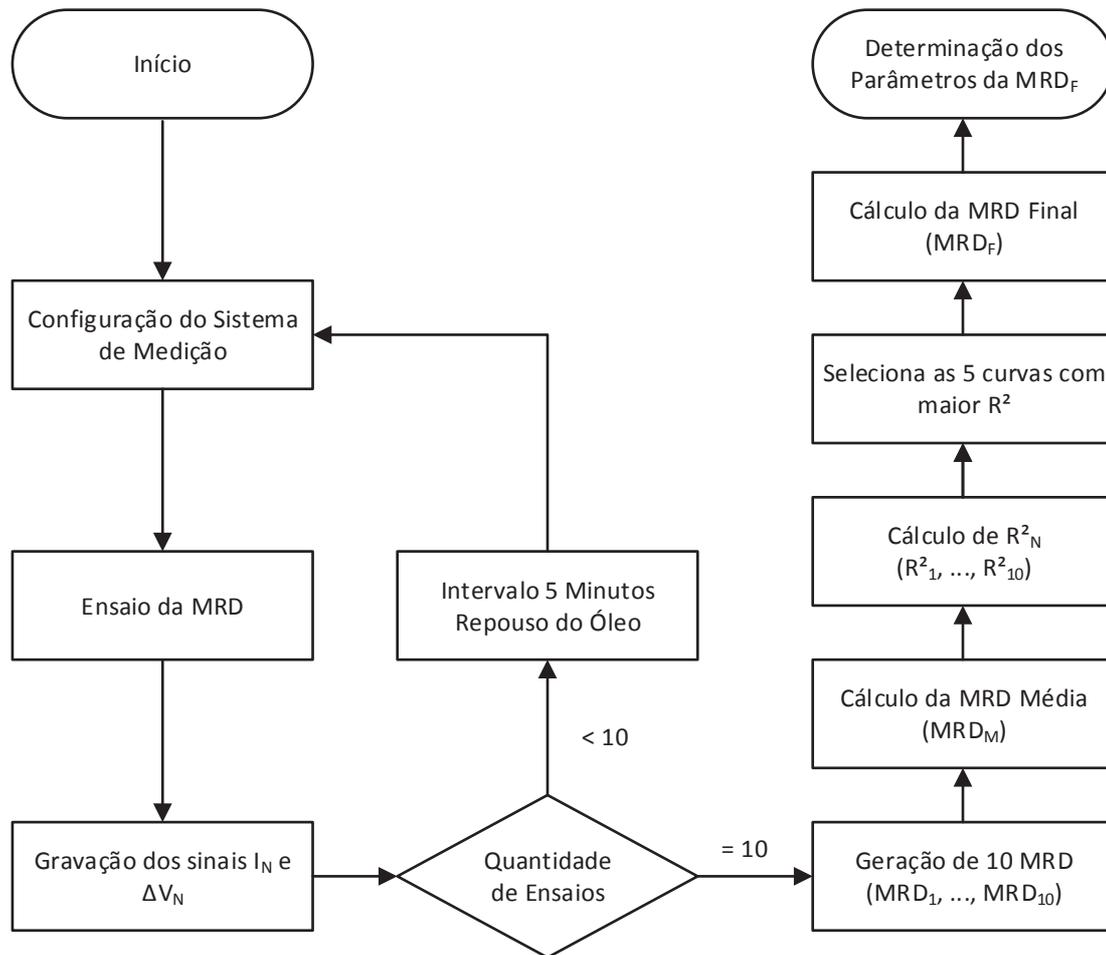
e,

$$SQ_{tot} = \sum_{j=1}^m ||v_m(j) - \bar{v}_m(j)||^2, \quad (4.3)$$

Sendo, v_m e v_s , respectivamente, os valores de referência e observados; m é o número de amostras; \bar{v}_m é o valor médio de referência.

Cada uma das curvas ($MRD_1 \dots MRD_{10}$) são confrontadas com a curva MRD_M e determinado o respectivo coeficiente de determinação (R^2), resultando assim, em dez coeficientes de determinação ($R_1^2, R_2^2, R_3^2, R_4^2, R_5^2, R_6^2, R_7^2, R_8^2, R_9^2$ e R_{10}^2).

Com as cinco curvas selecionadas, uma nova curva da MRD_F é determinada. A curva MRD_F é resultado da curva média entre as cinco curvas com maior coeficiente R^2 . A partir da MRD_F são extraídos dois parâmetros R_p e R_a . O parâmetro R_p representa a resistência do contato principal, determinada com os contatos completamente fechados. O parâmetro R_a representa a resistência média do contato de arco, determinada como a média das resistências referente à região do contato de arco. Na Figura 4.8 é apresentado o fluxograma com as etapas para obtenção dos parâmetros da resistência de contato.

Figura 4.8 – Fluxograma para obtenção dos parâmetros da MRD.

Fonte: Próprio autor.

Para determinação dos parâmetros R_p e R_a os disjuntores disponibilizados nesta pesquisa foram submetidos a ensaios da MRD, conforme descrito a seguir.

4.3.1 Ensaios da MRD no disjuntor PVO de 800 A - D1

Inicialmente foram realizados ensaios da MRD nas três amostras referentes a contatos degradados em serviço (D1-CMT1, D1-CMT2 e D1-CMT3), as quais já se encontravam instaladas no disjuntor. Após os ensaios da MRD, os contatos foram desmontados do disjuntor para fins de registro fotográfico (Figura 4.2) e inspeção visual, com o objetivo de se avaliar se havia relação entre o nível de degradação dos contatos e a curva da MRD. Posteriormente, a quarta amostra, contatos novos (D1-CMT4), foi instalada no disjuntor para realização de ensaios da MRD.

Os dados obtidos nos ensaios com os contatos servem como referência para avaliar a confi-

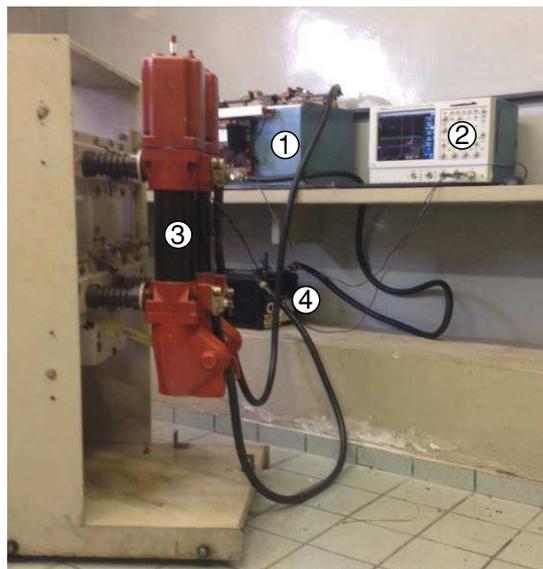
guração da curva da MRD em função do nível de degradação dos contatos do disjuntor D1.

Nos ensaios para medição da resistência de contato, para o disjuntor D1 foi utilizado o arranjo experimental apresentado na Figura 4.9. Sendo 1 - Sistema de medição e ajuste do nível de corrente; 2 - Osciloscópio; 3 - Disjuntor PVO de média tensão; 4 - Bateria estacionária.

No disjuntor D1 também foram realizados os seguintes ensaios de degradação:

- com aplicação de curto-circuito, seção 4.4.1;
- com aplicação de sobrecorrente, seção 4.4.2;
- com aquecimento em óleo mineral, seção 4.4.3.

Figura 4.9 – Fotografia do arranjo montado em laboratório para os ensaios da MRD no disjuntor de média tensão de 800 A.



Fonte: Próprio autor.

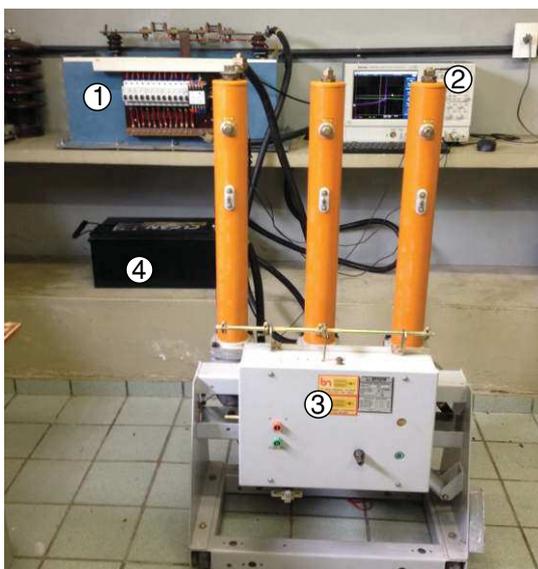
4.3.2 Ensaios da MRD no disjuntor PVO de 630 A - D2

Inicialmente foram realizados ensaios da MRD nas três amostras referentes a contatos degradados em serviço (D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3), as quais já se encontravam instaladas no disjuntor.

Os dados obtidos nos ensaios com os contatos servem como referência para avaliar a configuração da curva da MRD em função do nível de degradação dos contatos do disjuntor D2.

Nos ensaios para medição da resistência de contato, para o disjuntor D2 foi utilizado o arranjo experimental apresentado na Figura 4.10. Sendo 1 - Sistema de medição e ajuste do nível de corrente; 2 - Osciloscópio; 3 - Disjuntor PVO de média tensão; 4 - Bateria estacionária.

Figura 4.10 – Fotografia do arranjo montado em laboratório para os ensaios da MRD no disjuntor de média tensão de 630 A.



Fonte: Próprio autor.

4.3.3 Ensaios da MRD no disjuntor PVO de 2.000A - D3

Inicialmente foram realizados ensaios da MRD nas três amostras referentes a contatos degradados em serviço (D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3), os quais já se encontravam instaladas nos disjuntores.

Após os ensaios da MRD, os contatos foram desmontados dos disjuntores para fins de registro fotográfico (Figura 4.4) e inspeção visual, com o objetivo de se avaliar se havia relação entre o nível de degradação dos contatos e a curva da MRD. Posteriormente, as amostras foram reinstaladas nos disjuntores.

Posteriormente, uma quarta amostra foi submetida a ensaios da MRD. A quarta amostra, denominada de D3-CAT4, não apresenta degradação significativa, e possui as mesmas características das amostras originais do disjuntor D3.

Os dados obtidos nos ensaios com os contatos servem como referência para avaliar a configuração da curva da MRD em função do nível de degradação dos contatos do disjuntor D3.

Nos ensaios para medição da resistência de contato para o disjuntor D3 foi utilizado o arranjo experimental apresentado na Figura 4.11. Os ensaios de resistência de contato foram realizados com

aplicação de uma corrente de teste de 300 A. Sendo: 1 - Sistema de medição e ajuste do nível de corrente; 2 - Osciloscópio; 3 - Disjuntor PVO de alta tensão e 4 - Bateria estacionária.

Figura 4.11 – Fotografia do arranjo montado em laboratório para os ensaios da MRD no disjuntor de alta tensão tipo PVO.



Fonte: Próprio autor.

4.3.4 Ensaios da MRD no disjuntor SF₆ de 1.650 A - D4

Inicialmente foram realizados ensaios da MRD nas três amostras referentes a contatos degradados em serviço (D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3), as quais já se encontravam instaladas no disjuntor.

Os dados obtidos nos ensaios com os contatos servem como referência para avaliar a configuração da curva da MRD em função do nível de degradação dos contatos do disjuntor D4.

Nos ensaios para medição da resistência de contato, para o disjuntor D4 foi utilizado o arranjo experimental apresentado na Figura 4.12. Sendo 1 - Sistema de medição e ajuste do nível de corrente; 2 - Osciloscópio; 3 - Disjuntor SF₆ de alta tensão; 4 - Bateria estacionária.

4.4 Ensaios de degradação

Para que se possa desenvolver um estudo mais eficiente sobre a resistência de contato, o ideal é dispor de um extenso número de amostras de contatos, nos mais diversos níveis de degradação. Assim, a criação de um banco de dados amplo torna-se necessário, e desse modo, permitir-se-á uma maior probabilidade de se estabelecer um modelo mais preciso que correlacione as curvas da MRD com o

Figura 4.12 – Fotografia do arranjo montado em subestação para os ensaios da MRD no disjuntor D4.



Fonte: Próprio autor.

nível de degradação dos contatos.

Devido ao limitado número de amostras contato disponíveis para esta pesquisa, o confronto de resultados de medições para se estabelecer um modelo se torna dificultada. Desse modo, fez-se necessário criar mecanismo para proporcionar em cada amostra, aumento gradativo do nível de degradação, com características similares a degradação de contatos em serviço. Contudo, para garantir a eficiência da metodologia, os níveis de degradação devem ser monitorados entre seções de ensaios, cujo objetivo é avaliar a aplicação da técnica. Para o monitoramento da degradação das amostras são realizados ensaios da MRD após cada seção de ensaio de degradação.

Para implementação dos ensaios de degradação, as amostras de contato D1-CMT1, D1-CMT2 e D1-CMT3 foram inspecionadas visualmente. O objetivo da inspeção é identificar quais as regiões dos contatos apresentam degradação mais significativa e como esta degradação poderia ser reproduzida em laboratório.

Na inspeção foi observado que as amostras já apresentam acentuado nível de degradação devido a estresse elétrico (arco elétrico e corrente de carga). Na Figuras 4.13(a) e na Figura 4.13(b) são

apresentadas fotografias dos contatos fixo e móvel, respectivamente, da amostra D1-CMT1 degradada em função do estresse elétrico em serviço, com destaque das regiões do contato que foram degradados com maior intensidade.

Figura 4.13 – Fotografia da Amostra D1-CMT1.



(a) Contato fixo.



(b) Contato móvel.

Fonte: Próprio autor.

Com base nas inspeções visuais dos contatos D1-CMT1, D1-CMT2 e D1-CMT3 as seguintes observações foram registradas:

- para o contato fixo, os contatos de arco apresentam degradação mais incisiva no anel de arco. Para o contato principal, a degradação mais incisiva se localiza na região onde ocorre o contato galvânico entre o contato fixo e o contato móvel;
- para o contato móvel, os contatos de arco apresentam degradação mais incisiva na extremidade superior do contato, na região próxima a ponta isolante. Para o contato principal a degradação mais incisiva se localiza na região onde ocorre o contato galvânico entre o contato móvel e o contato fixo.

Diante das observações relatadas, ensaios de degradação foram idealizados com o objetivo de proporcionar desgaste nos contatos principal e de arco, de forma similar ou mais intensa que os

desgastes provocados pela corrente de carga, em condições normais de operação, e ao arco elétrico em condições anormais de operação.

De modo a reproduzir os desgastes nos contatos de arco, os seguintes ensaios foram propostos e implementados em laboratório:

- ensaio de degradação com curtos-circuitos - O ensaio tem como objetivo proporcionar degradação no contato de arco do contato móvel na extremidade superior do contato, de forma mais incisiva que a degradação registrada para o contato de arco em serviço;
- ensaio de degradação térmica - O ensaio tem como objetivo proporcionar degradação no contato principal e no contato de arco, em toda a superfície dos contatos fixo e móvel, de forma mais incisiva que a degradação registrada para o contato principal devido a condução da corrente de carga;
- ensaio de degradação com sobrecorrente localizada - O ensaio tem como objetivo proporcionar degradação no contato de arco do contato móvel na extremidade superior do contato, de forma mais incisiva que a degradação registrada para o contato de arco em serviço;

Para monitoramento do nível de degradação e avaliação da metodologia aplicada, o processo de degradação foi feito em etapas ou seções. Após cada seção de degradação acelerada, ensaios da MRD foram realizados.

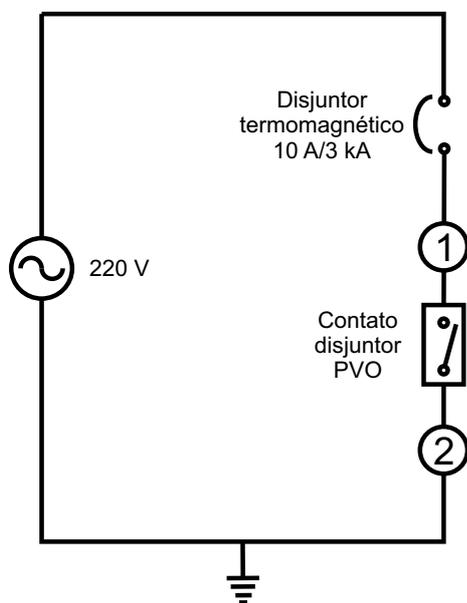
4.4.1 Ensaios de aplicação de curto-circuito

O ensaio de aplicação de curtos-circuitos nos contatos consiste em aplicar um curto-circuito franco, entre a região do contato de arco do contato móvel e o contato principal do contato fixo, de modo a proporcionar a degradação dos contatos. Pretende-se provocar a remoção de material na região do contato de arco, simulando em laboratório, um desgaste nos contatos de arco de forma mais incisiva que o desgaste provocado pelo arco elétrico.

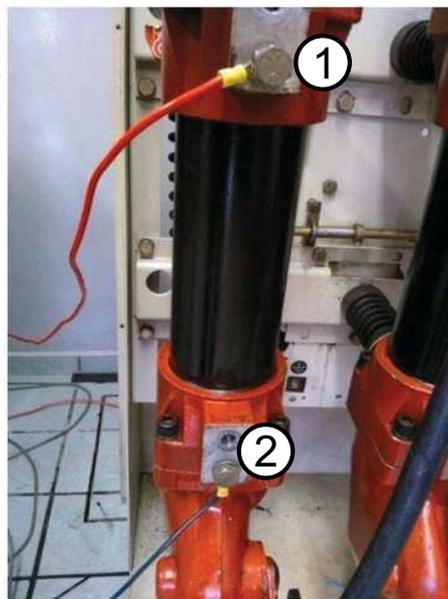
Para o ensaio de degradação com curtos-circuitos foi utilizada a amostra D1-CMT4. O circuito de aplicação do curto-circuito é provido de um disjuntor termomagnético monopolar de 10 A / 380 V / 3 kA e uma fonte de tensão de 220 V - RMS. Na Figura 4.14(a) é apresentada uma ilustração do circuito equivalente utilizado no ensaio e na Figura 4.14(b) é apresentada uma fotografia

do ensaio em laboratório. Sendo: 1 - Terminal superior do disjuntor conectado a fase - 220 V e 2 - Terminal inferior do disjuntor conectado ao aterramento.

Figura 4.14 – Arranjo do ensaio de degradação dos contatos com aplicação de curto-circuito na amostra D1-CMT4.



(a) Ilustração do circuito.

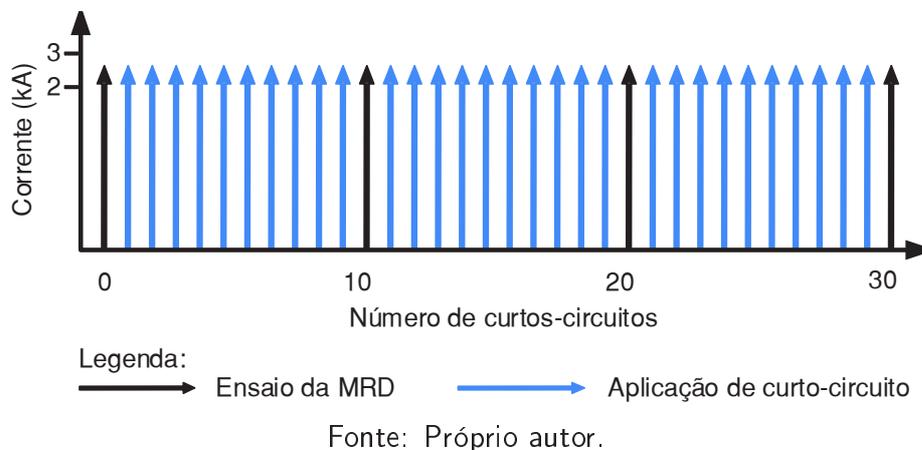


(b) Fotografia do arranjo.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.15 é apresentada a sequência esquemática de aplicação de curto-circuito ao contato do disjuntor PVO. Após realização de cada seção de ensaio, sendo que cada seção contempla uma série de dez curtos-circuitos, ensaios da MRD são realizados. Há um intervalo de 5 minutos entre curtos-circuitos, o objetivo é resfriar os contatos do disjuntor termomagnético, de modo, que ele atue em níveis de curtos-circuitos similares entre ensaios.

Figura 4.15 – Sequência de ensaio de degradação com curtos-circuitos na amostra D1-CMT4.



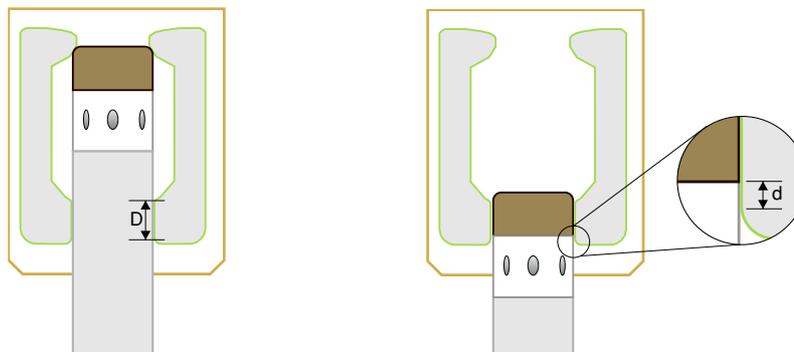
No ensaio de curto-circuito o nível de corrente aplicada foi na faixa de 2 a 3 kA. O intervalo de duração do curto-circuito não foi monitorado, tendo em vista que o objetivo é somente proporcionar desgaste do contato de arco.

4.4.2 Ensaios de aplicação de sobrecorrente

O ensaio de aplicação de sobrecorrente entre os contatos consiste em aplicar uma corrente elétrica na frequência industrial que proporcione a degradação de regiões predeterminadas dos contatos, durante um período de 48 horas. Desse modo, uma sobrecorrente entre os contatos fixo e móvel parcialmente fechados (área de contato galvânico minimizada) será aplicada. Pretende-se assim, estabelecer uma pequena área de contato entre o contato de arco do contato móvel e o contato principal do contato fixo, proporcionando um aquecimento e um desgaste mais intenso nessa região dos contatos.

Na Figura 4.16 são apresentadas ilustrações dos contatos fixo e móvel completamente fechados e parcialmente fechados, com detalhe da região dos contatos onde ocorre o contato galvânico efetivamente. Observa-se na ilustração da Figura 4.16(a), que os contatos estão na posição completamente fechada (área de contato d). Na Figura 4.16(b), que ilustra a posição dos contatos no ensaio de sobrecorrente, há apenas o contato galvânico parcial (área de contato d') entre os contatos fixo e móvel, sendo $d' \ll d$.

Figura 4.16 – Detalhes da área de contato no ensaio de sobrecorrente no disjuntor PVO de média tensão de 800 A.



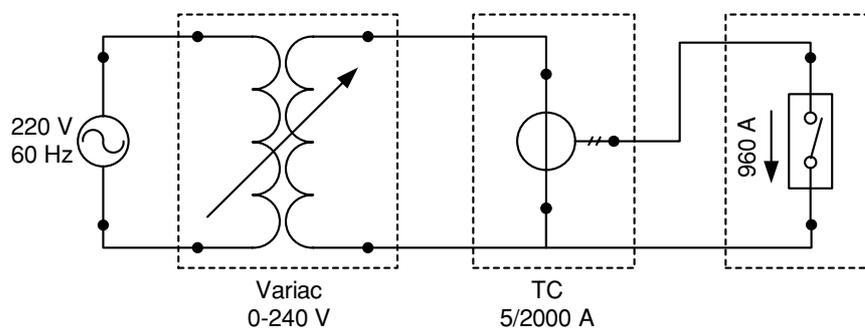
(a) Contatos totalmente fechados. (b) Contatos parcialmente fechados.

Fonte: Próprio autor.

Para o ensaio de degradação com sobrecorrente foi utilizada a amostra D1-CMT3. Durante a realização do ensaio o nível de sobrecorrente aplicado entre os contatos foi estabelecido em 120% da corrente nominal dos contatos, ou seja, aproximadamente 960 A - RMS em frequência de 60 Hz. Com monitoramento do nível da corrente a cada intervalo de 12 horas. Como o disjuntor não possui indicador de posição dos contatos, não foi possível estabelecer o comprimento da região d' .

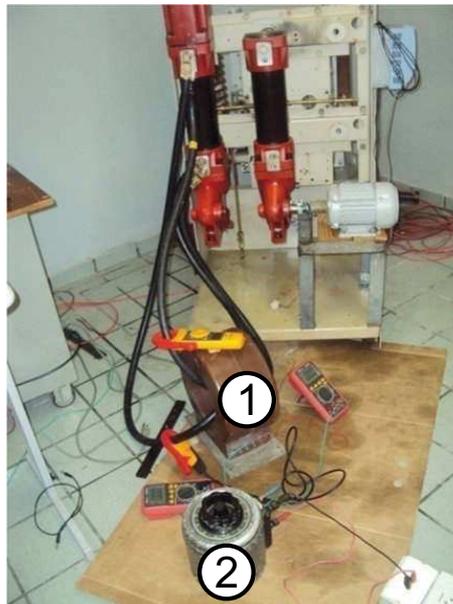
Na Figura 4.17 é apresentado o circuito equivalente utilizado no ensaio. Na Figura 4.18 é apresentada uma fotografia do ensaio em laboratório. Sendo: 1 - Variador de tensão (variac - 220 V - 1.440 VA); 2 - Transformador de corrente tipo janela com relação 2000/5 A - 7,2 kV.

Figura 4.17 – Ilustração do circuito utilizado no ensaio de degradação dos contatos com aplicação de sobrecorrente.



Fonte: Próprio autor.

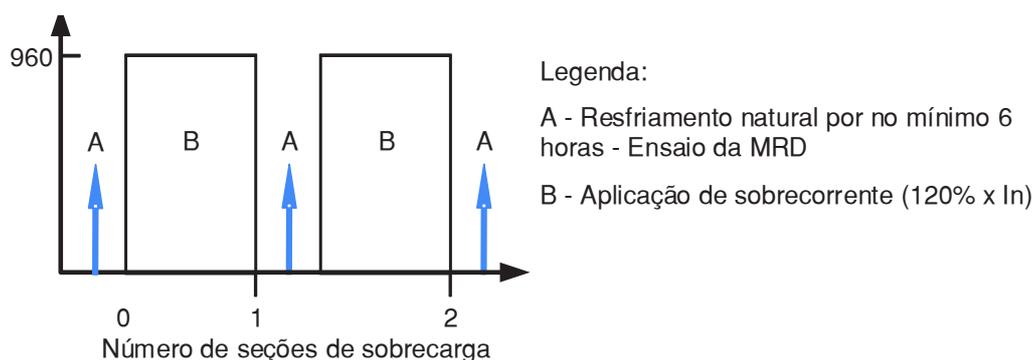
Figura 4.18 – Fotografia do arranjo utilizado no ensaio de degradação dos contatos com aplicação de sobrecorrente.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.19 é apresentada a seqüência esquemática de aplicação de sobrecorrente aos contatos do disjuntor. Após realização de uma seção de ensaio de sobrecorrente, que contempla um período de aplicação de sobrecorrente durante 48 horas, ensaio da MRD foram realizados. Há um intervalo mínimo de 6 horas para resfriamento natural dos contatos do disjuntor PVO.

Figura 4.19 – Sequência de ensaio de degradação por sobrecorrente para o contato D1-CMT3.



Fonte: Próprio autor.

4.4.3 Ensaios de degradação térmica

O ensaio de degradação térmica consiste em imergir, toda a região de condução da corrente elétrica dos contatos fixo e móvel, em óleo mineral parafínico (óleo de transformador) aquecido. O objetivo do

ensaio é provocar a degradação em toda a superfície dos contatos principal e de arco, simulando em laboratório, um desgaste nos contatos de forma mais incisiva que o desgaste provocado pela corrente de carga.

A metodologia aplicada nos ensaios de degradação térmica foi baseada em (LEMELSON, 1973) e (ERBRINK, 2011). No ensaio de degradação térmica, um litro de óleo degradado em serviço foi aquecido na faixa de 200 - 210°C, com monitoramento da temperatura a cada intervalo de 1 hora. Com a temperatura do óleo estabilizada na faixa de 200 - 210°C, os contatos do disjuntor são imersos durante um período de 6 horas.

Na Figura 4.20 é apresentada uma fotografia do arranjo experimental utilizado no ensaio de degradação térmica. Para aquecimento do óleo foi utilizado um forno elétrico de 500 W/220 V. A temperatura foi medida através de um sensor de temperatura tipo K (para temperatura até 230°C). O contato fixo que também fora aquecido se encontrava submerso no óleo, motivo da não visualização na Figura 4.20. Sendo: 1 - Forno elétrico; 2 - Contato móvel; 3 - Recipiente com óleo aquecido e 4 - Medidor e registrador de temperatura, com sensor tipo K.

Figura 4.20 – Arranjo do ensaio de degradação térmica da amostra D1-CMT1.

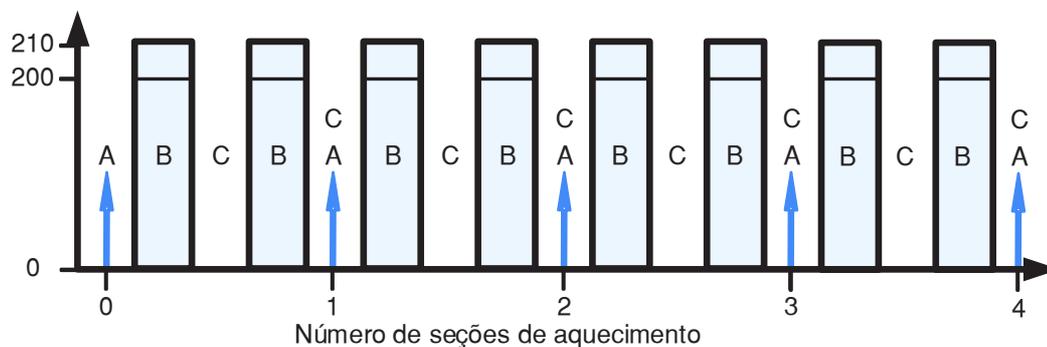


Fonte: Próprio autor.

Para o ensaio de degradação térmica foi utilizada a amostra D1-CMT1. Na Figura 4.21 é apresentada a sequência esquemática de degradação térmica imposta aos contatos do disjuntor. Os ensaios da MRD são realizados após as duas seções de ensaio de degradação térmica, sendo que cada sequência contempla dois períodos de imersão em óleo durante 6 horas, ensaios da MRD são

realizados. Há um intervalo mínimo de 6 horas para resfriamento natural dos contatos do disjuntor PVO. Sendo: A - Ensaio da MRD; B - Imersão em óleo aquecido a 200 - 210°C e C - resfriamento natural por no mínimo 6 horas.

Figura 4.21 – Sequência de ensaio de degradação térmica para a amostra D1-CMT1.



Fonte: Próprio autor.

4.5 Avaliação da influência da corrente de teste no ensaio da MRD

Os ensaios da MRD, em níveis distintos de corrente de teste, objetiva avaliar a influência da amplitude da corrente de teste nos valores da resistência do contato principal (R_p), medida com os contatos completamente fechados, e a resistência média da região do contato de arco (R_a). Os parâmetros R_p e R_a serão obtidos no ensaio da MRD.

Adicionalmente, é também objetivo deste ensaio avaliar a reprodutibilidade entre curvas obtidas para o mesmo contato, na mesma seção de ensaios. Neste ensaio, a abertura do contatos será realizada em velocidade nominal.

Para este ensaio seis níveis de corrente de teste foram estabelecidos (50 A, 100 A, 150 A, 200 A, 250 A e 300 A). Os níveis de 50 A e 100 A foram estabelecido em função das normas IEC 62271-1 e ANSI C37.09, respectivamente. Os demais valores foram definidos em função dos níveis de corrente de analisadores de disjuntores comercializados. Os ensaios foram realizados com abertura dos contatos em velocidade nominal.

Para avaliação da influência da corrente de teste no ensaio da MRD foi utilizada a amostra D1-CMT1, em avançado estágio de degradação. Para cada um dos níveis de corrente de teste serão realizados dez ensaios da MRD. Na Figura 4.9 foi apresentado o arranjo experimental utilizado.

Os resultados obtidos nesses ensaios deverão ser confrontados entre si, para subsidiar a avaliação da influência do nível de corrente de teste nos parâmetros da MRD.

4.6 Sistema *Fuzzy* proposto

A lógica *Fuzzy* será empregada com o objetivo de estimar o nível de degradação dos contatos do disjuntor, com base nos parâmetros R_p e R_a , obtidos nos ensaios da MRD, bem como dos parâmetros característicos do modelo do disjuntor e das condições de operação do equipamento. Para tanto, um sistema *Fuzzy* foi proposto com a finalidade de apoio a tomada de decisão sobre intervenção ou não no equipamento.

A aplicação do sistema proposto visa auxiliar as equipes de manutenção na tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção ou não no equipamento, de modo a proporcionar uma maior confiabilidade quanto as condições de operação do disjuntor. Os parâmetros de configuração do sistema *Fuzzy* para estimativa do nível de degradação dos contatos foram estabelecidos seguindo recomendações de fabricantes, normas específicas de concessionárias e bibliografias sobre o tema.

A construção do sistema *Fuzzy* proposto utiliza o método proposto por Mamdani (MAMDANI, 1974), o qual é apropriado para a aplicação de sistemas de apoio a tomada de decisão (HAMAM; GEORGANAS, 2008), (KAUR; KAUR, 2012). O método Mamdani define um processo de raciocínio dividido em quatro passos: (1) fuzzificação, (2) avaliação das regras fuzzy, (3) agregação das regras *Fuzzy* (inferência) e (4) defuzzificação.

A etapa de agregação das regras *Fuzzy* com o método de Mamdani, foi implementada com o operador *mínimo*. Ou seja, considerando $\mu(R_p)$ e $\mu(R_a)$ os valores de pertinência para as variáveis de entrada R_p e R_a , respectivamente, o valor de pertinência da variável de saída $\mu(ND)$, será definido por:

$$\mu(ND) = \min \{ \mu(R_p), \mu(R_a) \} \quad (4.4)$$

Na etapa de *defuzzificação* foram adotados dois métodos. Para os casos em que as resistências de contato R_p e R_a , não atingiram o valor máximo admissível, ou seja, os dados de entrada R_p e R_a apresentam grau de pertinência menor que 1, para as variáveis linguísticas RP-A e RA-A, respectivamente, a técnica adotada foi a média ponderada dos máximos. Para os demais casos, quando

as resistências de contato R_p e R_a , apresentam valores superiores ao valor máximo admissível, ou seja, o contato já apresenta nível de degradação superior a 100%, a técnica adota foi o máximo.

4.6.1 Elaboração do sistema *Fuzzy*

O primeiro passo na construção do sistema *Fuzzy*, para análise do nível de degradação dos contatos, consiste na base de conhecimento sobre o problema. Como em qualquer processo de modelagem deve-se, inicialmente, determinar qual ou quais são as variáveis de entrada e saída do sistema.

No sistema a ser adotado nesta pesquisa, serão consideradas como variáveis de entrada, os valores da resistência do contato principal (R_p), medida com os contatos completamente fechados, e a resistência média do contato de arco (R_a), a serem obtidas no ensaio da MRD. Para cada variável, será atribuído o mesmo peso, tendo em vista que cada região do contato tem função específica e essencial, e o seu mau desempenho pode provocar falha no disjuntor. Para o caso da resistência do contato principal, a alta resistência proporciona sobreaquecimento na câmara de extinção, mesmo em condições normais de operação do sistema. O sobreaquecimento pode provocar perda de estanqueidade da câmara, dando origem a vazamento do meio extintor para a atmosfera, o que pode provocar falhas de operação durante a abertura dos contatos. Por outro lado, a alta resistência no contato de arco pode proporcionar sobreaquecimento durante as operações de abertura em curto-circuito, com possibilidade de falha de operação e até a explosão do disjuntor.

As ponderações em função do intervalo máximo e os formatos das funções de pertinência de entrada foram heurísticamente adotados, considerando que a degradação dos contatos é linearmente gradativa e diretamente proporcional ao valor da resistência de contato, podendo ser representada por funções lineares. Para todas as funções de entrada e saída será considerada uma superposição entre as variáveis linguísticas de 50%.

Comumente, a degradação de um equipamento é classificada em níveis (Baixa Degradação, Média Degradação e Alta Degradação). Contudo, neste trabalho foram atribuídos cinco níveis de degradação, de modo a aumentar a precisão na análise dos contatos. Desse modo, as variáveis linguísticas de entrada para a variável R_p foram assim definidas:

- resistência baixa (RP-B);
- resistência medianamente baixa (RP-MB);

- resistência média (RP-M);
- resistência medianamente alta (RP-MA);
- resistência alta (RP-A).

Similarmente, as variáveis linguísticas de entrada para a variável Ra foram assim definidas:

- resistência baixa (RA-B);
- resistência medianamente baixa (RA-MB);
- resistência média (RA-M);
- resistência medianamente alta (RA-MA);
- resistência alta (RA-A).

Quanto ao formato, foi atribuído o formato trapezoidal para as variáveis linguísticas RP-B, RP-A, RA-B e RA-A, tendo em vista que estas variáveis possuem pelo menos um intervalo de classificação do nível de degradação, bem definidos, representados pelos limites inferior e superior de resistência.

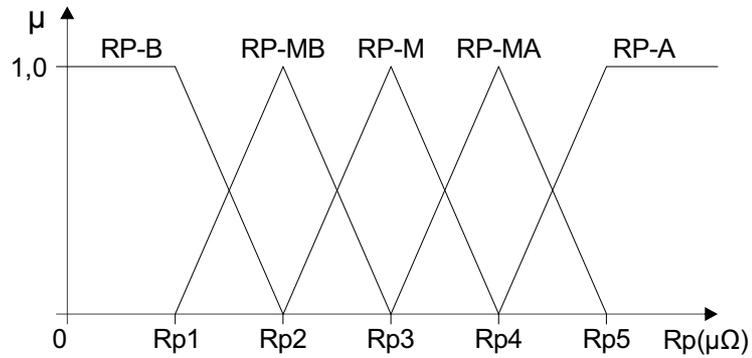
As variáveis linguísticas RP-B e RA-B possuem grau de pertinência 1, para uma amostra de contato nova. Entretanto, mesmo sendo nova, qualquer amostra já apresenta uma resistência de contato (R_{min}), conseqüentemente, qualquer valor de resistência entre zero e R_{min} tem pertinência 1, no conjunto resistência baixa. Do mesmo modo, a variável linguística RP-A e RA-A, possui grau de pertinência 1, para uma amostra de contato degradada, a qual já atingiu o limite máximo de resistência de contato (R_{max}), conseqüentemente, qualquer valor de resistência entre R_{max} e infinito tem pertinência 1, no conjunto resistência alta.

Para as demais variáveis linguísticas foi atribuído o formato triangular, com um grau de superposição entre as funções de pertinência *Fuzzy* de 50%. Optou-se por este nível de superposição, admitindo-se que para as variáveis linguísticas definidas, o valor de resistência de contato sempre pertence a dois conjuntos.

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representa cada variável linguística em função da entrada Rp está apresentada na Figura 4.22. As Equações 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam

o resumo dos parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Rp .

Figura 4.22 – Funções de pertinência das variáveis linguísticas para Rp .



Fonte: Próprio autor.

Parâmetros da variável linguística RP-B

$$\mu_B(Rp) = \begin{cases} 1 & \text{se } Rp \leq Rp1, \\ \frac{Rp2 - Rp}{Rp2 - Rp1} & \text{se } Rp1 < Rp \leq Rp2, \\ 0 & \text{se } Rp > Rp2. \end{cases} \quad (4.5)$$

Parâmetros da variável linguística RP-MB

$$\mu_{MB}(Rp) = \begin{cases} 0 & \text{se } Rp \leq Rp1, \\ \frac{Rp - Rp1}{Rp2 - Rp1} & \text{se } Rp1 < Rp \leq Rp2, \\ \frac{Rp3 - Rp}{Rp3 - Rp2} & \text{se } Rp2 < Rp \leq Rp3, \\ 0 & \text{se } Rp > Rp3. \end{cases} \quad (4.6)$$

Parâmetros da variável linguística RP-M

$$\mu_M(Rp) = \begin{cases} 0 & \text{se } Rp \leq Rp2, \\ \frac{Rp - Rp2}{Rp3 - Rp2} & \text{se } Rp2 < Rp \leq Rp3, \\ \frac{Rp4 - Rp}{Rp4 - Rp3} & \text{se } Rp3 < Rp \leq Rp4, \\ 0 & \text{se } Rp > Rp4. \end{cases} \quad (4.7)$$

Parâmetros da variável linguística RP-MA

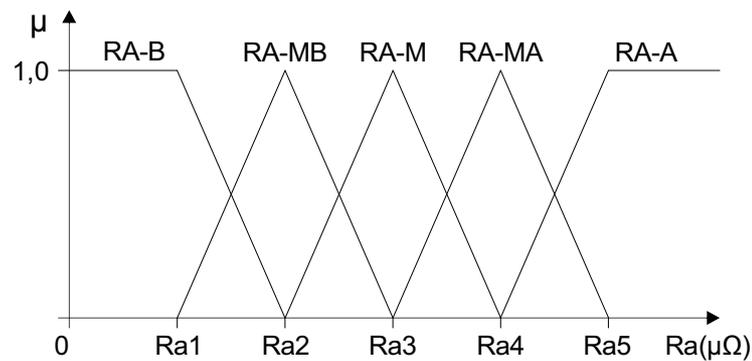
$$\mu_M(Rp) = \begin{cases} 0 & \text{se } Rp \leq Rp3, \\ \frac{Rp - Rp3}{Rp4 - Rp3} & \text{se } Rp3 < Rp \leq Rp4, \\ \frac{Rp5 - Rp}{Rp5 - Rp4} & \text{se } Rp4 < Rp \leq Rp5, \\ 0 & \text{se } Rp > Rp5. \end{cases} \quad (4.8)$$

Parâmetros da variável linguística RP-A

$$\mu_B(Rp) = \begin{cases} 0 & \text{se } Rp \leq Rp4, \\ \frac{Rp - Rp4}{Rp5 - Rp4} & \text{se } Rp4 < Rp \leq Rp5, \\ 1 & \text{se } Rp > Rp5. \end{cases} \quad (4.9)$$

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representa cada variável linguística em função da entrada Ra está apresentada na Figura 4.23. As Equações 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam o resumo dos parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Rp .

Figura 4.23 – Funções de pertinência das variáveis linguísticas para Ra .



Fonte: Próprio autor.

Parâmetros da variável linguística RA-B

$$\mu_B(Ra) = \begin{cases} 1 & \text{se } Ra \leq Ra1, \\ \frac{Ra2 - Ra}{Ra2 - Ra1} & \text{se } Ra1 < Ra \leq Ra2, \\ 0 & \text{se } Ra > Ra2. \end{cases} \quad (4.10)$$

Parâmetros da variável linguística RA-MB

$$\mu_{MB}(Ra) = \begin{cases} 0 & \text{se } Ra \leq Ra1, \\ \frac{Ra-Ra1}{Ra2-Ra1} & \text{se } Ra1 < Ra \leq Ra2, \\ \frac{Ra3-Ra}{Ra3-Ra2} & \text{se } Ra2 < Ra \leq Ra3, \\ 0 & \text{se } Ra > Ra3. \end{cases} \quad (4.11)$$

Parâmetros da variável linguística RA-M

$$\mu_M(Ra) = \begin{cases} 0 & \text{se } Ra \leq Ra2, \\ \frac{Ra-Ra2}{Ra3-Ra2} & \text{se } Ra2 < Ra \leq Ra3, \\ \frac{Ra4-Ra}{Ra4-Ra3} & \text{se } Ra3 < Ra \leq Ra4, \\ 0 & \text{se } Ra > Ra4. \end{cases} \quad (4.12)$$

Parâmetros da variável linguística RA-MA

$$\mu_M(Ra) = \begin{cases} 0 & \text{se } Ra \leq Ra3, \\ \frac{Ra-Ra3}{Ra4-Ra3} & \text{se } Ra3 < Ra \leq Ra4, \\ \frac{Ra5-Ra}{Ra5-Ra4} & \text{se } Ra4 < Ra \leq Ra5, \\ 0 & \text{se } Ra > Ra5. \end{cases} \quad (4.13)$$

Parâmetros da variável linguística RA-A

$$\mu_B(Ra) = \begin{cases} 0 & \text{se } Ra \leq Ra4, \\ \frac{Ra-Ra4}{Ra5-Ra4} & \text{se } Ra4 < Ra \leq Ra5, \\ 1 & \text{se } Ra > Ra5. \end{cases} \quad (4.14)$$

Os limites máximos estabelecidos de resistência de contato para cada modelo de disjuntor foram definidos em função de consulta aos manuais dos disjuntores e as referências (WESTERN, 1998), (IEEE, 2007), (REDE, 2008) e (ANSI/NETA, 2011).

Para o disjuntor D1, foi adotada uma resistência máxima de $300 \mu\Omega$ para o contato principal, conforme sugerido por (WESTERN, 1998). Para o contato de arco, em virtude da inexistência de

referências de fabricantes ou concessionárias sobre o limite máximo sugerido, considerou-se como critério para estabelecer um valor máximo, a relação entre as resistências de contato principal e de arco obtidas para o contato novo do disjuntor D1. Conforme os valores obtidos nos ensaios para o contato novo, a resistência de arco é aproximadamente 2,5 vezes superior a resistência do contato principal. Desse modo, para a resistência máxima do contato de arco do disjuntor D1, foi adotada a relação apresentada na 4.15.

$$Ra (\mu\Omega) = 2,5 \times Rp (\mu\Omega) \quad (4.15)$$

Para o disjuntor D2, foi adotada uma resistência máxima de $300 \mu\Omega$ para o contato principal, conforme sugerido por (WESTERN, 1998). Para o contato de arco, em virtude da inexistência de referências de fabricantes ou concessionárias sobre o limite máximo sugerido, considerou-se a relação apresentada na 4.15.

Para os disjuntores D3 e D4, foi adotada uma resistência máxima de $80 \mu\Omega$ para o contato principal, que representa um valor bem superior a resistência máxima sugerida que é de $50 \mu\Omega$, conforme sugerido por (WESTERN, 1998). Para o contato de arco, em virtude da inexistência de referências de fabricantes ou concessionárias sobre o limite máximo sugerido, considerou-se uma resistência máxima de $120 \mu\Omega$. Esses valores foram heurísticamente adotados, em virtude da análise visual dos contatos do disjuntor D3, tendo em vista que embora os contatos principal apresente resistência superior ao valor sugerido, o contato ainda apresenta condições satisfatórias de uso. Entretanto, o contato de arco da amostra D3-CAT3 apresenta resistência próxima a $120 \mu\Omega$, estando o contato com nível de degradação acelerado, com necessidade de substituição.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores limites ($Rp1 \dots Rp5$, $Ra1 \dots Ra5$) para as variáveis linguísticas de entrada para cada amostra.

No sistema *Fuzzy* proposto foi considerado como variável de saída, o nível de degradação dos contatos, o qual será determinado no processamento do sistema *Fuzzy* em função dos parâmetros Rp e Ra , obtidos nos ensaios da MRD.

As ponderações em função do intervalo máximo e os formatos das funções de pertinência de saída serão adotados, considerando que a degradação dos contatos é linearmente gradativa, podendo ser representada por funções lineares. Para todas as funções de saída foi considerada uma superposição entre as variáveis linguísticas de 50%.

Tabela 4.5 – Valores limites das variáveis linguísticas para os parâmetros R_p e R_a em ($\mu\Omega$).

Amostra	D1	D2	D3	D4
$R_{p1}(\mu\Omega)$	200	150	40	40
$R_{p2}(\mu\Omega)$	225	187,5	50	50
$R_{p3}(\mu\Omega)$	250	225	60	60
$R_{p4}(\mu\Omega)$	275	262,5	70	70
$R_{p5}(\mu\Omega)$	300	300	80	80
$R_{a1}(\mu\Omega)$	500	500	60	60
$R_{a2}(\mu\Omega)$	562,5	562,5	75	75
$R_{a3}(\mu\Omega)$	625	625	90	90
$R_{a4}(\mu\Omega)$	687,5	687,5	105	105
$R_{a5}(\mu\Omega)$	750	750	120	120

Fonte: Próprio autor.

Para o sistema *Fuzzy* proposto foram atribuídos cinco níveis de degradação, de modo a aumentar a precisão na avaliação dos níveis de degradação (ND) dos contatos.

Desse modo, as variáveis linguísticas de saída ND foram assim definidas:

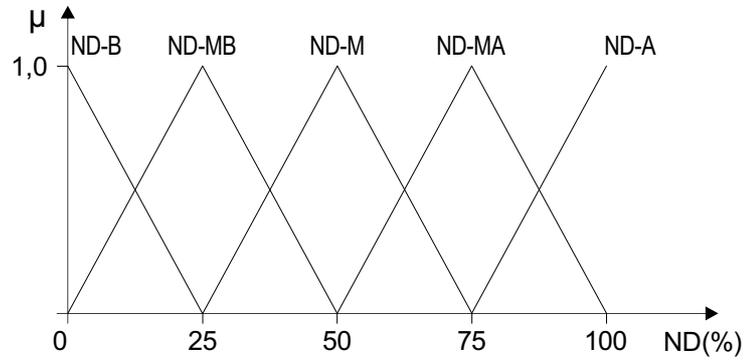
- nível de degradação baixa (ND-B);
- nível de degradação medianamente baixa (ND-MB);
- nível de degradação média (ND-M);
- nível de degradação medianamente alta (ND-MA);
- nível de degradação alta (ND-A).

Quanto ao formato, foi atribuído o formato triangular para todas as variáveis linguísticas de saída, com um grau de superposição entre as funções de pertinência *Fuzzy* de 50%. Optou-se por este nível de superposição, admitindo-se que para as variáveis linguísticas definidas, o nível de degradação do contato sempre pertence a dois conjuntos.

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representa cada variável linguística em função da entrada R_p está apresentada na Figura 4.24. As Equações 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20

apresentam o resumo dos parâmetros para as funções de pertinência da variável linguística de saída ND.

Figura 4.24 – Funções de pertinência das variáveis linguísticas para ND.



Fonte: Próprio autor.

Parâmetros da variável linguística ND-B

$$ND - B(\mu_{ND}) = \begin{cases} 25 - 25 \times \mu_{ND} & \text{se } 0 < ND \leq 25, \\ 0 & \text{se } ND > 25. \end{cases} \quad (4.16)$$

Parâmetros da variável linguística ND-MB

$$ND - MB(\mu_{ND}) = \begin{cases} 25 \times \mu_{ND} & \text{se } 0 < ND \leq 25, \\ 50 - 25 \times \mu_{ND} & \text{se } 25 < ND \leq 50, \\ 0 & \text{se } ND > 50. \end{cases} \quad (4.17)$$

Parâmetros da variável linguística ND-M

$$ND - M(\mu_{ND}) = \begin{cases} 0 & \text{se } ND < 25, \\ 25 \times \mu_{ND} + 25 & \text{se } 25 < ND \leq 50, \\ 75 - 25 \times \mu_{ND} & \text{se } 50 < ND \leq 75, \\ 0 & \text{se } ND > 75. \end{cases} \quad (4.18)$$

Parâmetros da variável linguística ND-MA

$$ND - MA(\mu_{ND}) = \begin{cases} 0 & \text{se } ND < 50, \\ 25 \times \mu_{ND} + 50 & \text{se } 50 < ND \leq 75, \\ 100 - 25 \times \mu_{ND} & \text{se } 75 < ND \leq 100. \end{cases} \quad (4.19)$$

Parâmetros da variável linguística ND-A

$$ND - A(\mu_{ND}) = \begin{cases} 0 & \text{se } ND < 75, \\ 25 \times \mu_{ND} + 75 & \text{se } 75 < ND \leq 100. \end{cases} \quad (4.20)$$

Com os dados de entrada R_p e R_a será realizada a *fuzzificação* dos dados de entrada, que consiste em determinar o grau de pertinência com que R_p e R_a pertencem a cada uma das variáveis linguísticas de entrada.

A próxima etapa do sistema *Fuzzy* é estabelecer as regras entre as variáveis de entrada e variáveis de saída.

4.6.2 Regras *Fuzzy* para o sistema proposto

Na etapa do sistema lógico *Fuzzy*, denominada inferência *Fuzzy*, é onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *Fuzzy* que modela a base de regras. Nesta etapa, as variáveis linguísticas serão relacionadas entre si, aplicando-se regras pré-estabelecidas, definindo as relações entre variáveis linguísticas por meio de seus respectivos operadores lógicos.

Uma regra de produção normalmente é formada de duas partes principais:

If <antecedente> *Then* <consequente>

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas (mesmo parcialmente), determinam o processamento do consequente da regra por um mecanismo de inferência *Fuzzy*. O processo acima descrito, denomina-se disparo de uma regra. Por sua vez, o consequente é composto de um conjunto de diagnósticos que são gerados com o disparo da regra. Os consequentes das regras disparadas são processados em conjunto, para gerar uma resposta quantitativa, para a variável de saída do sistema.

Na definição das regras, o consequente será estabelecido em função da região do contato que apresentar maior nível de degradação. Para o sistema proposto, em função das possibilidades e do número de variáveis linguísticas definidas, o conjunto de regras foi assim estabelecido:

- regra 1: se $Rp = Rp-B$ E $Ra = Ra-B$, então Saída = ND-B;
- regra 2: se $Rp = Rp-B$ E $Ra = Ra-MB$, então Saída = ND-MB;
- regra 3: se $Rp = Rp-B$ E $Ra = Ra-M$, então Saída = ND-M;
- regra 4: se $Rp = Rp-MB$ E $Ra = Ra-B$, então Saída = ND-MB;
- regra 5: se $Rp = Rp-MB$ E $Ra = Ra-MB$, então Saída = ND-MB;
- regra 6: se $Rp = Rp-MB$ E $Ra = Ra-M$, então Saída = ND-M;
- regra 7: se $Rp = Rp-M$ E $Ra = Ra-B$, então Saída = ND-M;
- regra 8: se $Rp = Rp-M$ E $Ra = Ra-MB$, então Saída = ND-M;
- regra 9: se $Rp = Rp-M$ E $Ra = Ra-M$, então Saída = ND-M;
- regra 10: se $Rp \neq Rp-A$ E $Ra = Ra-MA$, então Saída = ND-MA;
- regra 11: se $Rp = Rp-MA$ E $Ra \neq Ra-A$, então Saída = ND-MA;
- regra 12: se $Rp = Rp-A$ OU $Ra = Ra-A$, então Saída = ND-A.

Em função das regras de processamento do sistema *Fuzzy*, os graus de pertinência das variáveis de entrada são associados aos conjuntos *Fuzzy* de saída.

Na etapa de *defuzzificação* foi escolhido o método da Média Ponderada dos Máximos, por apresentar melhor compromisso entre possíveis saídas com multiplicidade de disparo do conjunto *Fuzzy* (SIMÕES; SHAW, 2007). Ou seja, a característica do método implica que se três regras forem acionadas no processo de *defuzzificação*, duas impondo a saída ND-M e uma impondo a saída ND-B, a saída ND-M terá maior peso pelo método de *defuzzificação* Média Ponderada dos Máximos.

Para a análise final do estado de degradação dos contatos do disjuntor, ou seja, análise dos três pólos do disjuntor, devem ser analisadas 6 variáveis de entrada 1Rp, 1Ra, 2Rp, 2Ra, 3Rp e 3Ra, sendo os números 1, 2 e 3, os índices para cada um dos pólo do disjuntor.

Para uma concessionária ou em campo, a definição final sobre o estado do disjuntor (amosta) deve ser estabelecida em função do pólo que apresentar maior nível de degradação nos contatos. Entretanto, neste estudo, em virtude no limitado número de amostras de disjuntores, o diagnóstico

foi realizado individualmente para cada amostra de contato, analisando-se dessa forma, os pólos do disjuntor de forma individual.

A próxima etapa compreende a *defuzzificação*, na qual o sistema Lógico *Fuzzy*, gera um valor numérico de saída, por meio da atribuição dos pesos proporcionais aos graus de pertinência da variável resultante do processo de *inferência Fuzzy*. Assim, para o sistema proposto, a saída a ser gerada, pelo sistema *Fuzzy*, deverá fazer referência ao nível de degradação dos contatos.

O sistema proposto foi avaliado em estudos de caso, para as seguintes amostras de disjuntores:

- amostra D1 - Disjuntor tipo PVO (800 A/15 kV/12.5 kA);
- amostra D2 - Disjuntor tipo PVO (630 A/17,5 kV/12.5 kA);
- amostra D3 - Disjuntor tipo PVO (2.000 A/72.5 kV/31.5 kA);
- amostra D4 - Disjuntor tipo SF₆ (1.650 A/72.5 kV/25 kA).

Para o desenvolvimento do sistema especialista de apoio à tomada de decisão, fundamento em lógica *Fuzzy*, foi utilizado o ambiente computacional Matlab®.

O sistema *Fuzzy* desenvolvido foi aplicado em estudos de caso, nas amostras D1, D2, D3 e D4, de modo a quantificar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros características da MRD e das características do disjuntor.

O próximo capítulo apresentará os resultados, análises e discussões dos resultados obtidos experimentalmente nos ensaios da MRD nos disjuntores disponibilizados. Serão também apresentados os resultados obtidos nos ensaios de degradação acelerada, bem como estudos de caso com o sistema *Fuzzy* desenvolvido.

Capítulo 5

Resultados e Análises

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da metodologia para monitoramento de contatos de disjuntores com base na análise dos parâmetros da curva da MRD. Inicialmente, são apresentados alguns resultados obtidos a partir da aplicação da técnica de extração de parâmetros da curva da MRD. Em seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de degradação acelerada. Por fim, são apresentados estudos de caso com a estimativa do nível de degradação dos contatos dos disjuntores analisados, em função dos parâmetros R_p e R_a .

5.1 Análise do sistema da MRD

O sistema de medição de resistência de contato desenvolvido, possibilitou a realização de um amplo número de ensaios, apresentando resultados infutáveis, quanto a sua eficiência, apresentando as características técnicas necessárias para a realização dos ensaios da MRD, tanto em laboratório, quanto em subestação de energia elétrica.

Os resultados obtidos com o sistema da MRD apresenta resultados equivalentes a analisadores de disjuntor comercializados. Pode-se destacar como vantagem do sistema da MRD em relação aos analisadores de disjuntor comercializados, o baixo custo despendido para o desenvolvimento do sistema, além de uma alta capacidade de potência, o que permite uma maior autonomia na realização de ensaios de resistência de contato, tanto em disjuntores, quanto em outros dispositivos seccionadores, bem como em comutador de tape sob carga (OLTC).

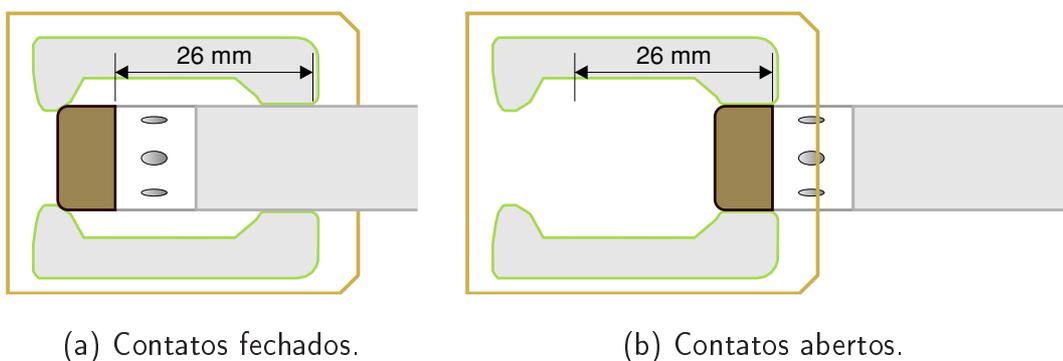
O sistema permite ainda a realização de ensaios da MRD em velocidade reduzida de abertura dos contatos. Os testes realizados indicam que o sistema possibilita o fornecimento de corrente de teste de até 300 A durante 5 minutos.

5.1.1 Projeto do sistema de medição da resistência de contato

Para o desenvolvimento desta pesquisa, idealizou-se um sistema com capacidade de injeção de corrente de teste de até 250 A, de modo a realizar os ensaios da MRD com correntes de teste entre 50 e 250 A. Adicionalmente, o sistema também deveria ser capaz de possibilitar ensaios da MRD em diferentes velocidades de abertura dos contatos, de modo a reproduzir pelo menos, toda a faixa de velocidade (0,002 - 2 m/s) sugerida por (LANDRY et al., 2006). Com isso, o sistema proposto deve suprir o fornecimento da corrente de teste para o ensaio da MRD durante todo o processo de abertura dos contatos, mesmo com abertura dos contatos em velocidade reduzida.

O sistema projetado foi inicialmente idealizado para aplicação no disjuntor D1. Para este disjuntor, no processo de abertura dos contatos, mantém-se um contato galvânico entre os contatos fixo e móvel em um trecho de 26 mm, conforme ilustrado na Figura 5.1. Esse percurso compreende o deslocamento do contato fixo, entre os contatos totalmente fechados, até a separação galvânica dos contatos.

Figura 5.1 – Ilustração da região com contato galvânico entre os contatos fixo e móvel durante a abertura dos contatos.



(a) Contatos fechados.

(b) Contatos abertos.

Fonte: Próprio autor.

Na Equação 5.1 é apresentado o cálculo do tempo mínimo (t_{min}) de aplicação da corrente de teste, considerando a velocidade mínima de 0,002 m/s para um percurso máximo de 26 mm.

$$t_{min} > \frac{\Delta S (m)}{v_{min} (m/s)} = \frac{26 \times 10^{-3} m}{0,002 m/s} = 13 s, \quad (5.1)$$

Para o dimensionamento da bateria a ser utilizada no sistema, se faz necessário definir previamente a potência do circuito a ser alimentado pela bateria, bem como o tempo de descarga da bateria.

Considerando a tensão nominal da bateria de 12 V, a potência do circuito nesta condição será definida conforme a Equação 5.2:

$$P(W) = V(V) \times I(A) = 12 \times 250 = 3.000 W, \quad (5.2)$$

No catálogo do fabricante da bateria utilizada (MOURA, 2000), os dados especificados referentes às suas baterias se limitam ao tempo de 15 minutos. Com isso, nos cálculos da bateria será admitido um tempo de referência de 15 minutos, que é muito superior ao tempo mínimo (13 s) determinado para os ensaios em velocidade reduzida.

A capacidade da bateria (C_t) é definida como o produto da corrente em ampères pelo tempo em horas (Ah), corrigido para a temperatura de referência, fornecida pelo acumulador em determinado regime de descarga. Assim, conforme a Equação 5.3 a capacidade da bateria deverá ser de no mínimo.

$$C_{t_{min}}(Ah) = 250 \times 0,25 = 62,5 Ah, \quad (5.3)$$

Desse modo, a bateria especificada para o circuito deve apresentar as seguintes características mínimas:

- potência mínima de 3.000 W; item capacidade máxima de 62,5 Ah;

Em análise ao catálogo do fabricante, o modelo 12MF220 do tipo bateria estacionária atende simultaneamente as condições acima, visto que apresenta as seguintes características:

- potência mínima de 3.489 W; item capacidade máxima de 72 Ah;

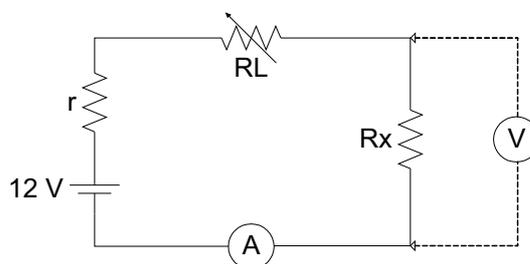
Com o sistema proposto será possível realizar os ensaios da MRD em menor velocidade de abertura dos contatos, e com um nível de corrente superior ao sugerido por (LANDRY et al., 2006). Para a realização dos ensaios da MRD o sistema desenvolvido apresenta as seguintes características:

- injeção de corrente contínua com amplitude de até 250 A, com ciclo de descarga máximo de 30 segundos; item aquisição dos sinais de corrente e tensão nos contatos utilizando-se de osciloscópio digital com taxa de amostragem de até 1 GHz;
- confecção das curvas da resistência de contatos por meio de rotina computacional desenvolvida em Matlab [®].

Para ajustar a corrente de teste proveniente da bateria em 250 A, ou valores bem próximos, bem como para proteger a bateria contra um eventual curto-circuito durante o ensaio de resistência de contato, projetou-se um resistor variável produzido a partir de fios Kanthal DS (Cromo-Alumínio-Ferro), sendo o resistor instalado em série com os contatos do disjuntor.

Na Figura 5.2 é apresentado o circuito simplificado para medição da resistência de contato com o sistema proposto. Sendo: r a resistência interna da bateria, RL o resistor variável produzido a partir de fios Kanthal DS e R_x a resistência dos contatos do disjuntor.

Figura 5.2 – Circuito simplificado para medição da resistência de contato com o sistema proposto.



Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Resistor limitador de corrente

Para se obter a corrente total de 250 A, o resistor RL projetado é composto de 12 ramos de resistores em paralelo, sendo 10 ramos para condução de 30 A, cada, e outros 2 ramos para condução de 10 A, cada. O objetivo de se projetar um número maior de ramos é dotar o resistor de ramos reserva, o que possibilita a utilização do equipamento mesmo na eventualidade de falha em 3 ramos.

Na prática, o resistor RL tem a função de limitar a corrente proveniente da bateria, bem como ajustar o nível da corrente para o ensaio da MRD. O sistema permite o ajuste da intensidade da corrente em degraus de 10 A.

Como o resistor RL será energizado em serviço rápido, com ciclo de descarga admissível máximo de 30 segundos, o catálogo do fabricante dos fios sugere a utilização dos fios com diâmetro de 1,5 mm e 2,5 mm, os quais admitem uma corrente máxima de 20 A e 30 A, respectivamente (KANTHAL, 1998).

Os fios Kanthal DS utilizados apresentam as seguintes características:

- composição química: Cr 22%; Al 4,5%; Co 0,5%; Fe 77%; Ponto de fusão 1.510°C;

- fio de \varnothing 1,5 mm, resistência específica a 20°C - 0,7634 Ω/m ;
- fio de \varnothing 2,5 mm, resistência específica a 20°C - 0,2750 Ω/m .

Assim, a resistência equivalente ($RL + r$) instalada em série com o contato será determinada conforme a Equação 5.4:

$$R_{eq} = \frac{12}{250} = 0,048 \Omega, \quad (5.4)$$

Por meio de ensaios elétricos, com a aplicação de uma corrente de teste de 15 A, proveniente da bateria, determinou-se a resistência interna r conforme Equação 5.5.

$$R_{eq} = \frac{V_{vazio} - V_{carga}}{I_{teste}} = \frac{12,46 - 12,38}{15} = 5,33 \text{ m}\Omega, \quad (5.5)$$

Para o cálculo da resistência do resistor limitador de corrente (RL) desprezou-se resistência do contato do disjuntor ($\approx 500 \mu\Omega$), visto que apresenta ordem de grandeza bem inferior a RL (≈ 200), o que provocaria um erro de aproximadamente 0,5%.

Admitindo-se que a resistência interna da bateria não se altere em função do nível de corrente, a tensão de saída da bateria (V_s) para uma corrente de 250 A será determinada conforme a Equação 5.6.

$$V_s = V_{vazio} - r \times I_{teste} = 12,46 - 5,3 \times 10^{-3} \times 250 = 11,135 \text{ V}, \quad (5.6)$$

Considerando como referência a potência máxima fornecida pela bateria e a tensão nos seus terminais com carga, a corrente máxima de teste (I_{max}) da bateria foi determinada conforme a Equação 5.7.

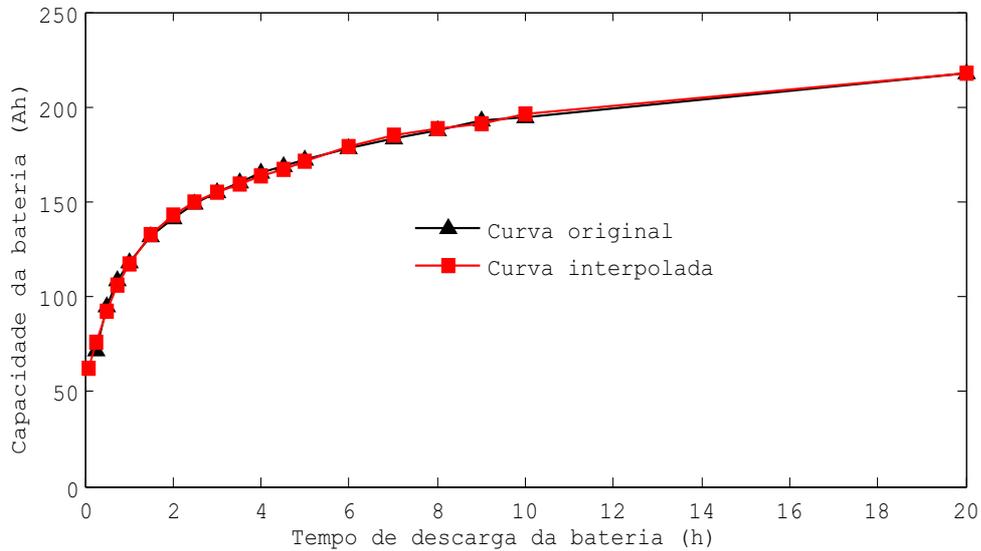
$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_s} = \frac{3.489}{12,46 - 5,3 \times 10^{-3} \times I_{max}}, \quad (5.7)$$

Da Equação 5.7 tem-se $I_{max} = 2.026 \text{ A}$ e $I_{max} = 325 \text{ A}$. Para a corrente de 2.026 A, a tensão prevista nos terminais da bateria com carga é de 1,72 V. E para a corrente de 325 A, a tensão prevista nos terminais da bateria com carga é de 10,74 V.

Para a bateria utilizada, sugere-se uma tensão final de descarga de 10,5 V (MOURA, 2000). Deste modo, a corrente máxima fornecida pela bateria em condições normais de descarga é de 325 A.

Admitindo-se um tempo máximo de descarga de 5 minutos, e por meio de interpolação polinomial com os dados especificados por (MOURA, 2000), obtiveram-se ($C_t = 62,36 \text{ Ah}$ e $P = 5.616 \text{ W}$). Na Figura 5.3 e na Figura 5.4, respectivamente.

Figura 5.3 – Curva de capacidade da bateria.



Fonte: Próprio autor.

Considerando uma tensão final de descarga mínima de 10,5 V para a bateria adotada, tem-se um I_{max} . Deste modo, a corrente máxima fornecida pela bateria em condições normais de descarga é determinada conforme a Equação 5.8.

$$I_{max} = \frac{V_{vazio} - V_s}{r} = \frac{12,46 - 10,5}{5,3 \times 10^{-3}} = 369,81 \text{ A}, \quad (5.8)$$

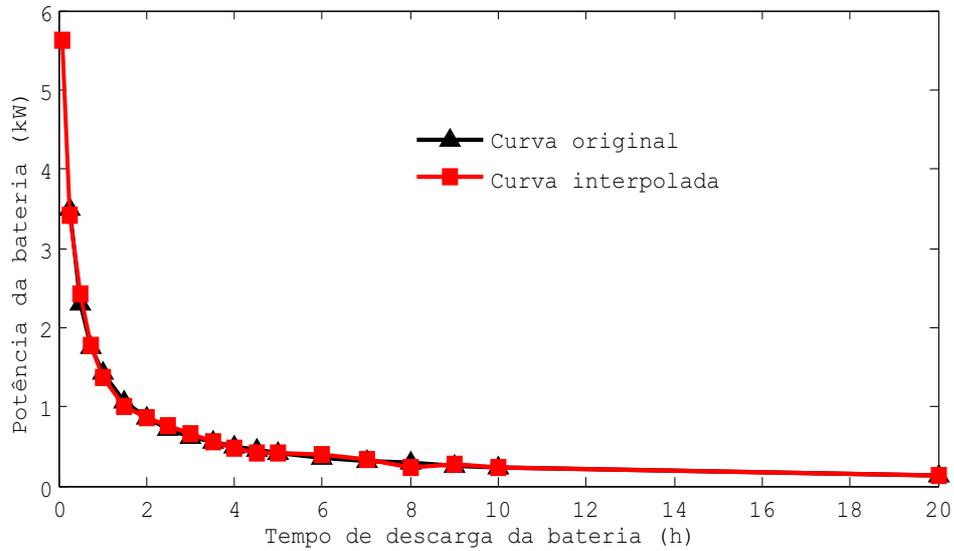
Para a corrente de 369,81 A, as solicitações de capacidade e potência da bateria serão determinadas conforme as Equações 5.9 e 5.10, respectivamente.

$$C_t = 369,81 \times \frac{5}{60} = 30,82 \text{ Ah}, \quad (5.9)$$

$$P = 369,81 \times 10,5 = 3.883 \text{ W}, \quad (5.10)$$

Portanto, considerando uma tensão de descarga mínima de 10,5 V e os valores obtidos na interpolação polinomial, a bateria poderá fornecer uma corrente máxima de aproximadamente 370 A durante 5 minutos.

Figura 5.4 – Curva de potência da bateria.



Fonte: Próprio autor.

Para se evitar desgaste acelerado da bateria, nos ensaios de resistência de contato será estipulada uma corrente máxima de 300 A, resultando em uma tensão de descarga conforme apresentado na Equação 5.11.

$$V_s = V_{vazio} - r \times I_{teste} = 12,46 - 5,3 \times 10^{-3} \times 300 = 10,87 \text{ V}, \quad (5.11)$$

Para se obter a corrente máxima de 10 e 30 A resistência elétrica de cada ramo foi dimensionada conforme Equações 5.12 e 5.13.

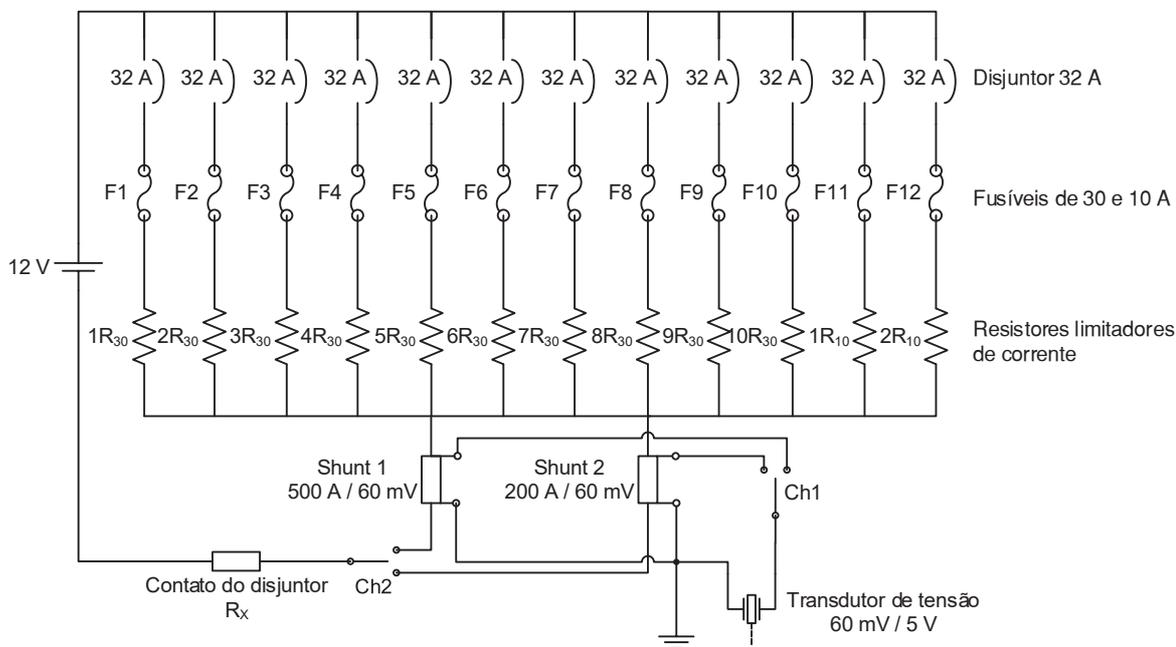
$$R_{10 \text{ A}} = \frac{V_s}{I_{teste}} = \frac{10,87}{10} = 1,09 \Omega, \quad (5.12)$$

$$R_{30 \text{ A}} = \frac{V_s}{I_{teste}} = \frac{10,87}{30} = 0,36 \Omega, \quad (5.13)$$

A amplitude da corrente de teste no ensaio da resistência de contato é definida em função da quantidade de ramos de resistores inseridos ao circuito e a tensão da bateria. A inserção dos ramos de resistores no circuito se dá por meio do acionamento de disjuntores termomagnéticos do tipo monopolar. Neste circuito os disjuntores termomagnéticos desempenham a função de manobrar os ramos de resistores, para controle do nível da corrente de teste, não se caracterizando como um elemento de proteção. Para proteção de cada ramo de resistores, fusíveis do tipo automotivo foram instalados.

Na Figura 5.5 é apresentado o circuito do sistema utilizado no ensaio da resistência de contato.

Figura 5.5 – Curva de capacidade da bateria.



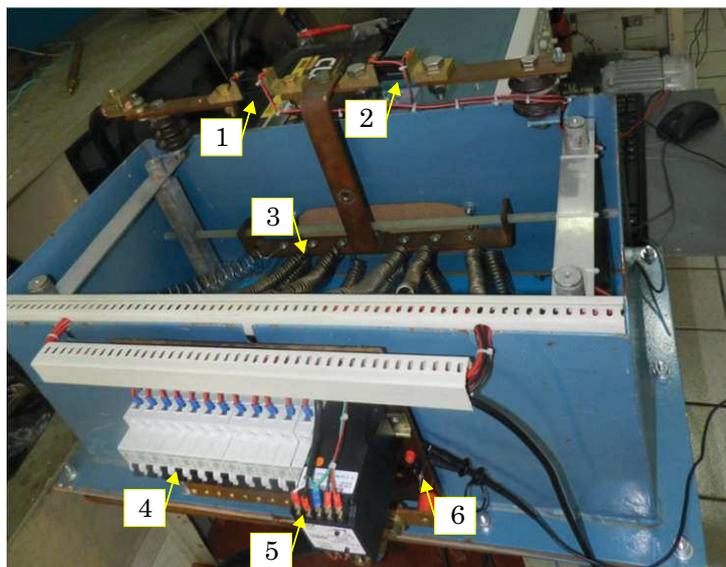
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.6 está apresentada uma fotografia do sistema da MRD desenvolvido. Sendo: 1 - *Shunt* de corrente (200 A/60 mV); 2 - *Shunt* de corrente (500 A/60 mV); 3 - Resistores de fios Kanthal DS (Cr-Al-Fe); 4 - Disjuntores termomagnéticos; 5 - Transdutor de tensão 60 mV/5 V; 6 - Chave do tipo SPDT para seleção da saída do shunt de corrente para o transdutor.

O sistema de medição desenvolvido 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 ($0,0362 \Omega$ - $1,087 \Omega$ / 3.883 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);
- aquisição dos sinais (corrente e queda de tensão nos contatos) utilizando-se de osciloscópio digital;

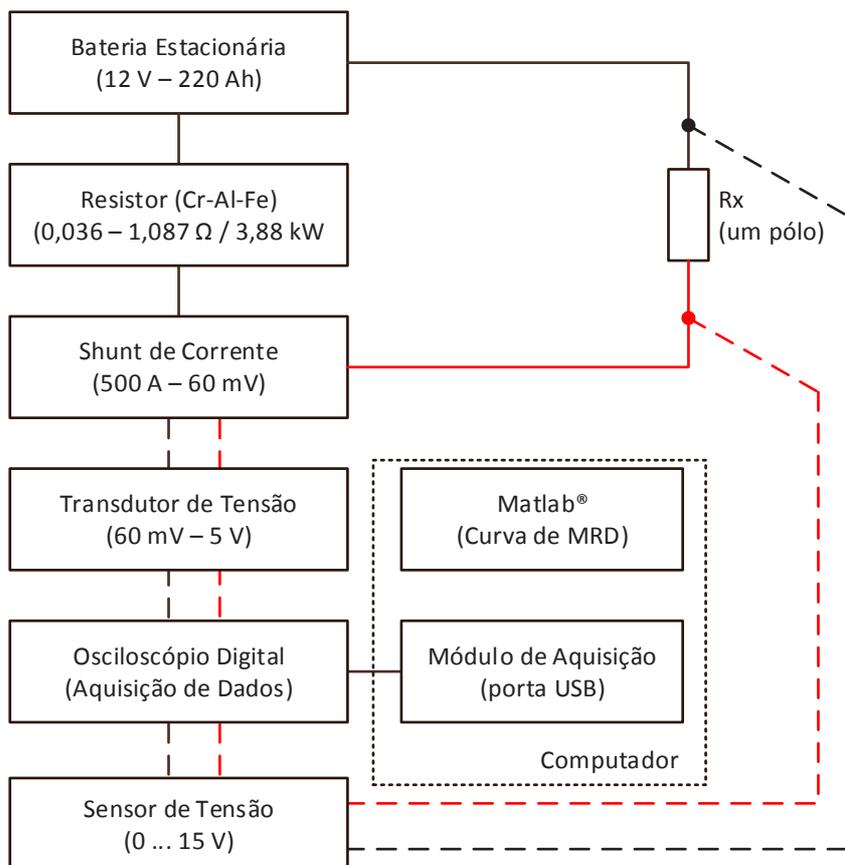
Figura 5.6 – Fotografia do sistema da MRD desenvolvido.



Fonte: Próprio autor.

- confecção das curvas de resistência através de rotina computacional desenvolvida em Matlab®.

Na Figura 5.7 é apresentado o diagrama de bloco do sistema utilizado nos ensaios da MRD, onde R_x representa a resistência de contato medida.

Figura 5.7 – Diagrama de blocos simplificado do sistema da MRD.

Fonte: Próprio autor.

O sistema proposto utiliza um transdutor de tensão com exatidão de 0,25% e um shunt de corrente com exatidão de 0,5% e ponta de prova do osciloscópio com exatidão de 0,5%.

5.2 Análise analítica das curvas da MRD

5.2.1 Ensaios da MRD no disjuntor PVO de 800 A - D1

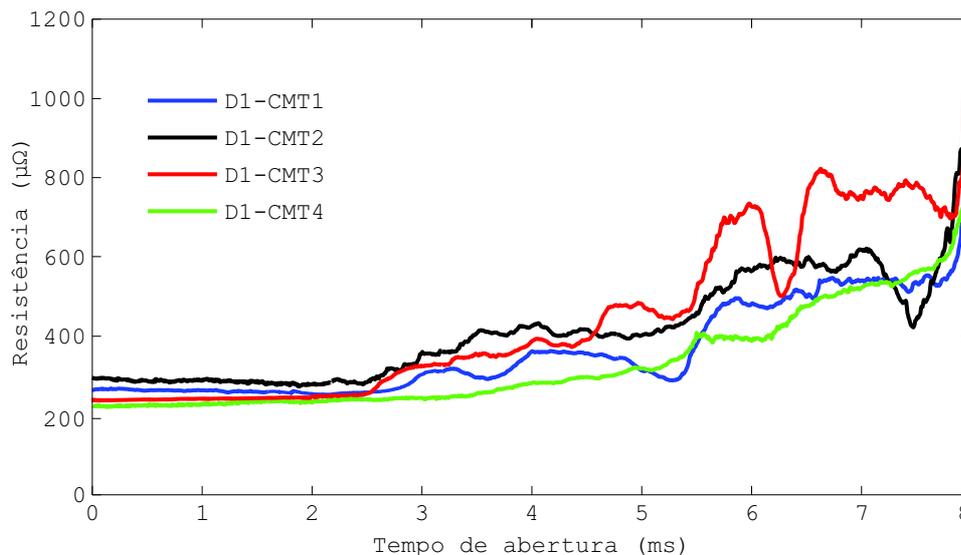
As especificações e características do disjuntor de média tensão (D1), foram apresentadas no Capítulo 4, Tabela 4.1. Os procedimentos dos ensaios foram apresentados no item 4.3.1.

Para a análise analítica, o disjuntor D1 foi submetido a ensaios da MRD e foram utilizadas as quatro amostras disponibilizadas (D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4).

A inspeção visual dos contatos e os dados obtidos nos ensaios com os contatos degradados e novos foram confrontados entre si, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da MRD na avaliação da condição dos contatos.

Na Figura 5.8 são apresentadas as curvas MRD_F , determinadas conforme fluxograma apresentado na Figura 4.8 para os contatos D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 300 A.

Figura 5.8 – Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.



Fonte: Próprio autor.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de média tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada amostra ensaiada. A curva da MRD_F do contato novo (D1-CMT4) foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos D1-CMT1, D1-CMT2 e D1-CMT3.

Analisando-se as curvas da MRD_F (Figura 5.8), observa-se que embora as amostras D1-CMT1, D1-CMT2 e D1-CMT3 pertençam ao mesmo disjuntor, sendo submetidos basicamente as mesmas condições de carga, os contatos apresentam nível de degradação distintos, principalmente na região do contato de arco.

Na Tabela 5.1 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada. Para quantificar os níveis de degradação, os seguintes parâmetros foram extraídos das curvas da MRD_F :

- $R_p(\mu\Omega)$ - Resistência do contato principal, obtida entre o contato principal do contato fixo e contato principal do contato móvel com os contatos do disjuntor completamente fechados;

- $Ra(\mu\Omega)$ - Resistência média da região do contato de arco, obtida entre o contato principal do contato fixo e contato de arco do contato móvel.

Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D1-CMT1, D1-CMT2, D1-CMT3 e D1-CMT4.

Amostra de contato	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$Rp(\mu\Omega)$	$Ra(\mu\Omega)$
D1-CMT1	266	632
D1-CMT2	280	666
D1-CMT3	239	867
D1-CMT4	224	547

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.1, destacam-se:

- o valor de Rp para amostra D1-CMT1 é 19% inferior ao valor de Rp para a amostra D1-CMT4;
- o valor de Ra para amostra D1-CMT1 é 16% superior ao valor de Ra para a amostra D1-CMT4;
- o valor de Rp para amostra D1-CMT2 é 25% superior ao valor de Rp para a amostra D1-CMT4;
- o valor de Ra para amostra D1-CMT2 é 22% superior ao valor de Ra para a amostra D1-CMT4;
- o valor de Rp para amostra D1-CMT3 é 7% superior ao valor de Rp para a amostra D1-CMT4;
- o valor de Ra para amostra D1-CMT3 é 59% superior ao valor de Ra para a amostra D1-CMT4;

Por meio do confronto entre os resultados obtidos nos ensaios da MRD e do nível de degradação dos contatos, diagnosticado pela análise visual dos contatos, ilustrados na Figura 4.2, permite-se adicionalmente, as seguintes análises:

- o desgaste provocado nos contatos proveniente do estresse elétrico foi mais incisivo na região do contato de arco, como pode ser comprovado por meio da inspeção visual dos contatos fixo e móvel;

- os resultados obtidos no ensaio da MRD para as três amostras degradadas, possibilitou a identificação do desgaste gerado em toda a região do contato, o que permitiu diagnosticar tanto o desgaste do contato principal, quanto do contato de arco, como pode ser observado na inspeção visual (Figura 4.2);
- os resultados obtidos no ensaio da MRE não refletiram os desgastes gerados na região do contato de arco, tendo em vista que a amostra D1-CMT3 apresenta menor degradação na região do contato principal, contudo, apresenta maior degradação na região do contato de arco (Figura 4.2);
- os resultados evidenciam que a evolução da resistência de contato é diretamente proporcional ao nível de desgaste dos contatos principal e de arco.

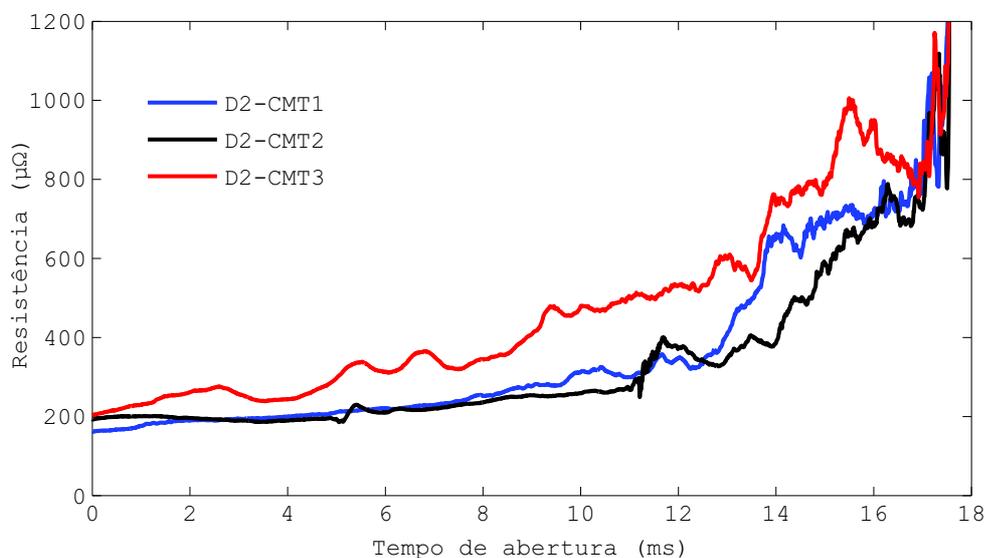
5.2.2 Ensaio da MRD no disjuntor PVO de 630 A - D2

As especificações e características do disjuntor de alta tensão (D2), foram apresentadas no Capítulo 4, Tabela 4.2. Os procedimentos dos ensaios foram apresentados no item 4.3.2.

Para a análise analítica, o disjuntor D2 foi submetido a ensaios da MRD e foram utilizadas as três amostras disponibilizadas (D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3).

Na Figura 5.9 são apresentadas as curvas MRD_F , determinadas conforme fluxograma apresentado na Figura 4.8 para os contatos D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 300 A.

Figura 5.9 – Curvas da MRD_F para as amostras D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.



Fonte: Próprio autor.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de média tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada amostra ensaiada. A curva da MRD_F do contato (D2-CMT2) foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos, tendo em vista que esta apresenta menor desgaste na região do contato de arco.

Analisando-se as curvas da MRD_F (Figura 5.9), observa-se que embora as amostras D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3 pertençam ao mesmo disjuntor, sendo submetidos basicamente as mesmas condições de carga, os contatos apresentam nível de degradação distintos, principalmente na região do contato de arco.

Na Tabela 5.2 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada.

Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.2, destacam-se:

- o valor de R_p para amostra D2-CMT1 é 16% inferior ao valor de R_p para a amostra D2-CMT2;
- o valor de R_a para amostra D2-CMT1 é 15% superior ao valor de R_a para a amostra D2-CMT2;
- o valor de R_p para amostra D2-CMT3 é 6% superior ao valor de R_p para a amostra D2-CMT2;
- o valor de R_a para amostra D2-CMT3 é 32% superior ao valor de R_a para a amostra D2-CMT2;

Tabela 5.2 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D2-CMT1, D2-CMT2 e D2-CMT3.

Amostra de contato	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
D2-CMT1	163	738
D2-CMT2	193	643
D2-CMT3	204	846

Fonte: Próprio autor.

Por meio do confronto entre os resultados obtidos nos ensaios da MRE e da MRD, permite-se adicionalmente, as seguintes análises:

- o desgaste provocado nos contatos proveniente do estresse elétrico foi mais incisivo na região do contato de arco, como pode ser diagnosticado por meio da análise da curva da MRD_F , ilustrada na Figura 5.9;
- os resultados obtidos no ensaio da MRD para as três amostras, possibilitou a identificação do desgaste gerado em toda a região do contato, o que permitiu diagnosticar tanto o desgaste do contato principal, quanto do contato de arco;
- os resultados obtidos no ensaio da MRE não refletiram os desgastes gerados na região do contato de arco, tendo em vista que a amostra D2-CMT1 apresenta menor degradação na região do contato principal, contudo, apresenta maior degradação na região do contato de arco;
- os resultados evidenciam que a evolução da resistência de contato é diretamente proporcional ao nível de desgaste dos contatos principal e de arco.

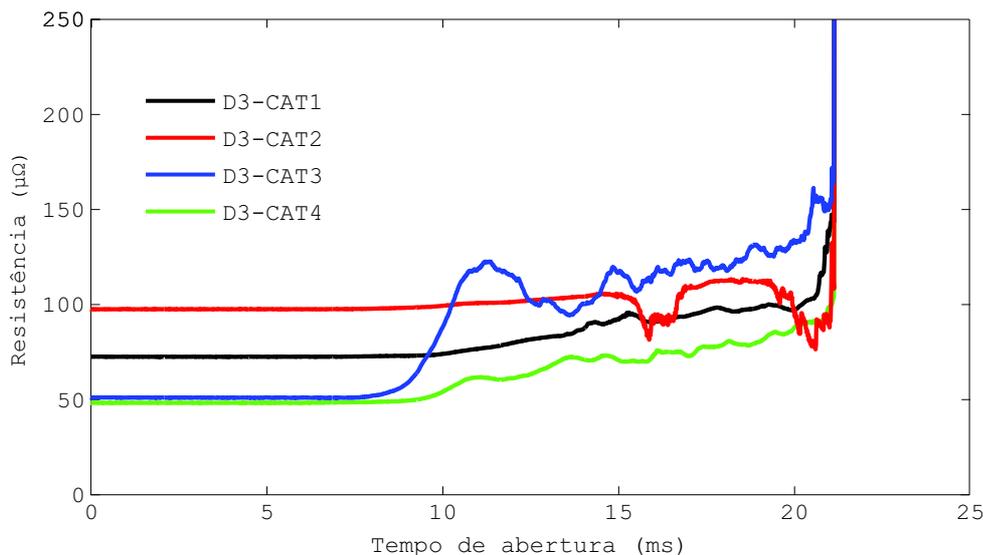
5.2.3 Ensaios da MRD no disjuntor PVO de 2.000 A - D3

As especificações e características do disjuntor de alta tensão (D3), foram apresentadas no Capítulo 4, Tabela 4.3. Os procedimentos dos ensaios foram apresentados no item 4.3.3.

Para a análise analítica, o disjuntor D3 foi submetido a ensaios da MRD e foram utilizadas as quatro amostras disponibilizadas (D3-CAT1, D3-CAT2, D3-CAT3 e D3-CAT4).

Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas MRD_F , determinadas conforme fluxograma apresentado na Figura 4.8 para os contatos D3-CAT1, D3-CAT2, D3-CAT3 e D3-CAT4. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 300 A.

Figura 5.10 – Curvas da MRD_F para as amostras D3-CAT1, D3-CAT2, D3-CAT3 e D3-CAT4, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.



Fonte: Próprio autor.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de alta tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada amostra ensaiada. A curva da MRD_F do contato (D3-CAT4) foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos, tendo em vista que esta apresenta menor desgaste tanto na região do contato principal, quanto na região do contato de arco.

Analisando-se as curvas da MRD_F (Figura 5.10), observa-se que embora as amostras D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3 pertençam ao mesmo disjuntor, sendo submetidos basicamente as mesmas condições de carga, os contatos apresentam nível de degradação distintos, principalmente na região do contato de arco.

Na Tabela 5.3 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada.

Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.3, destacam-se:

- o valor de R_p para amostra D3-CAT1 é 50% superior ao valor de R_p para a amostra D3-CAT4;

Tabela 5.3 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3.

Amostra de contato	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
D3-CAT1	72	90
D3-CAT2	97	102
D3-CAT3	52	116
D3-CAT4	48	72

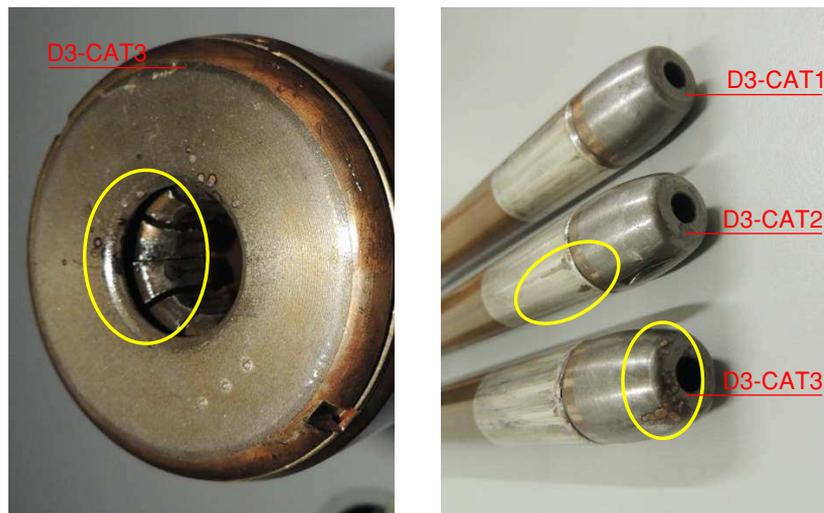
Fonte: Próprio autor.

- o valor de R_a para amostra D3-CAT1 é 25% superior ao valor de R_a para a amostra D3-CAT4;
- o valor de R_p para amostra D3-CAT2 é 102% superior ao valor de R_p para a amostra D3-CAT4;
- o valor de R_a para amostra D3-CAT2 é 42% superior ao valor de R_a para a amostra D3-CAT4;
- o valor de R_p para amostra D3-CAT3 é 8% superior ao valor de R_p para a amostra D3-CAT4;
- o valor de R_a para amostra D3-CAT3 é 61% superior ao valor de R_a para a amostra D3-CAT4;

Na Figura 5.11a é apresentada fotografia do contato fixo da amostra D3-CAT3 e na Figura 5.11b é apresentada uma fotografia do contato móvel das amostras D3-CAT1, D3-CAT2 e D3-CAT3. Em ambas as fotografias estão destacadas as regiões dos contatos em que a degradação foi mais incisiva.

Por meio do confronto entre os resultados obtidos nos ensaios da MRD e do nível de degradação dos contatos, diagnosticado pela análise visual dos contatos, ilustrados na Figura 5.11, permite-se adicionalmente, as seguintes análises:

- o desgaste provocado nos contatos proveniente do estresse elétrico foi mais incisivo na região do contato de arco para a amostra D3-CAT3, enquanto que para a região do contato principal, o desgaste foi mais incisivo para a amostra D3-CAT2, como pode ser diagnosticado por meio da inspeção visual dos contatos fixo e móvel (Figura 5.11);
- os resultados obtidos no ensaio da MRD para as três amostras, possibilitou a identificação do desgaste gerado em toda a região do contato, o que permitiu diagnosticar tanto o desgaste do

Figura 5.11 – Amostras de contatos do disjuntor D3.

(a) Contato fixo.

(b) Contatos móvel.

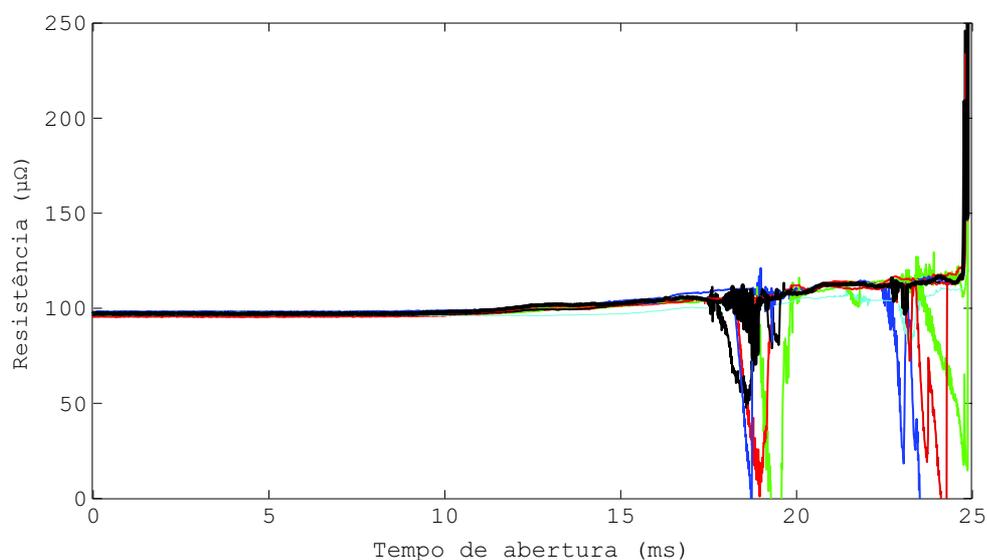
Fonte: Próprio autor.

contato principal, quanto do contato de arco;

- os resultados obtidos no ensaio da MRE não refletiram os desgastes gerados na região do contato de arco da amostra D3-CAT3, tendo em vista que esta amostra apresenta degradação equivalente a amostra D3-CAT4 na região do contato principal, contudo, apresenta uma degradação superior a 61% na região do contato de arco, quando comparado a amostra D3-CAT4;
- os resultados indicam que a evolução da resistência de contato é diretamente proporcional ao nível de desgaste dos contatos principal e de arco.

Nos ensaios realizados com a amostra D3-CAT2 foram registradas distorções nas curvas da MRD. Essas distorções não foram reproduzidas em toda a série de ensaios. Em alguns ensaios, alterações bruscas na configuração da curva da MRD na região do contato de arco foram registradas, conforme apresentado nas curvas ilustradas na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Curvas da MRD para a amostra D3-CAT2, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 300 A.



Fonte: Próprio autor.

Após a desmontagem e análise da amostra D3-CAT2, constatou-se que o contato fixo apresentava desalinhamento nos dedos dos contatos. Pressupõe-se que durante a abertura dos contatos, o desalinhamento ocasionou vibração nos dedos do contato fixo, provocando as distorções na curva da MRD. Na Figura 5.13 é apresentada uma fotografia do contato fixo da amostra D3-CAT2, onde pode ser observado que não há uma espaçamento uniforme entre os dedos de contato. A mal distribuição dos dedos de contato se deve a perda de pressão nas molas dos dedos de contato.

Figura 5.13 – Contato fixo da amostra D3-CAT2.



Fonte: Próprio autor.

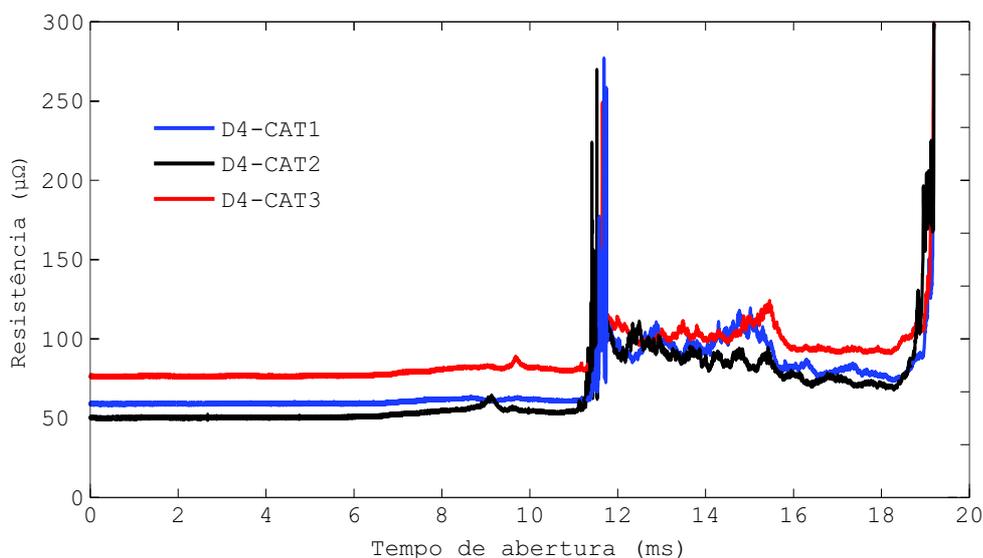
5.2.4 Ensaios da MRD no disjuntor SF₆ de 1.650 A - D4

As especificações e características do disjuntor de alta tensão (D4), foram apresentadas no Capítulo 4, Tabela 4.4. Os procedimentos dos ensaios foram apresentados no item 4.3.4.

Para a análise analítica, o disjuntor D4 foi submetido a ensaios da MRD e foram utilizadas as três amostras disponibilizadas (D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3).

Na Figura 5.14 são apresentadas as curvas MRD_F, determinadas conforme fluxograma apresentado na Figura 4.8 para os contatos D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 250 A.

Figura 5.14 – Curvas da MRD_F para as amostras D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3, obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos e corrente de 250 A.



Fonte: Próprio autor.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de média tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada amostra ensaiada. A curva da MRD_F do contato (D4-CAT3) foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos, tendo em vista que esta apresenta menor desgaste tanto na região do contato principal, quanto na região do contato de arco.

Analisando-se as curvas da MRD_F (Figura 5.14), observa-se que embora as amostras D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3 pertençam ao mesmo disjuntor, sendo submetidos basicamente as mesmas condições de carga, os contatos apresentam nível de degradação distintos, principalmente na

região do contato de arco.

Na Tabela 5.4 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada.

Tabela 5.4 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para os contatos D4-CAT1, D4-CAT2 e D4-CAT3.

Amostra de contato	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
D4-CAT1	60	93
D4-CAT2	78	103
D4-CAT3	53	88

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.4, destacam-se:

- o valor de R_p para amostra D4-CAT1 é 13% superior ao valor de R_p para a amostra D4-CAT3;
- o valor de R_a para amostra D4-CAT1 é 7% superior ao valor de R_a para a amostra D4-CAT3;
- o valor de R_p para amostra D4-CAT2 é 47% superior ao valor de R_p para a amostra D4-CAT3;
- o valor de R_a para amostra D4-CAT2 é 17% superior ao valor de R_a para a amostra D4-CAT3.

Por meio do confronto entre os resultados obtidos nos ensaios da MRE e da MRD, permite-se adicionalmente, as seguintes análises:

- o desgaste provocado nos contatos proveniente do estresse elétrico foi mais incisivo na região do contato de arco, como pode ser observado na análise da curva da MRD_F , ilustrada na Figura 5.14;
- os resultados obtidos no ensaio da MRD para as três amostras, possibilitou a identificação do desgaste gerado em toda a região do contato, o que permitiu diagnosticar tanto o desgaste do contato principal, quanto do contato de arco;
- os resultados obtidos no ensaio da MRE não refletiram proporcionalmente os desgastes gerados na região do contato de arco, tendo em vista que a amostra D4-CMT2 apresenta uma degra-

dação na região do contato principal de 47%, enquanto que a degradação indicada na região do contato de arco no ensaio da MRD foi de apenas 17%;

- os resultados comprovam que a evolução da resistência de contato é diretamente proporcional ao nível de desgaste dos contatos principal e de arco.

5.3 Ensaios de degradação acelerada

5.3.1 Ensaios de degradação com curtos-circuitos

Os ensaios de degradação com curtos-circuitos objetivaram proporcionar degradação nos contatos, especialmente na extremidade do contato móvel, na região limítrofe a ponta isolante, para contatos do disjuntor D1.

No ensaio de curtos-circuitos estabelece-se um contato galvânico entre os contatos fixo e móvel (submetidos a potenciais diferentes, 0 V e 220 V, respectivamente), proporcionando um curto-circuito franco entre os contatos móvel (contato de arco) e contato fixo (contato principal).

Quando na ocorrência do curto-circuito, a alta temperatura estabelecida nos contatos, provoca a deformação e remoção de material, causando degradação em ambos os contatos.

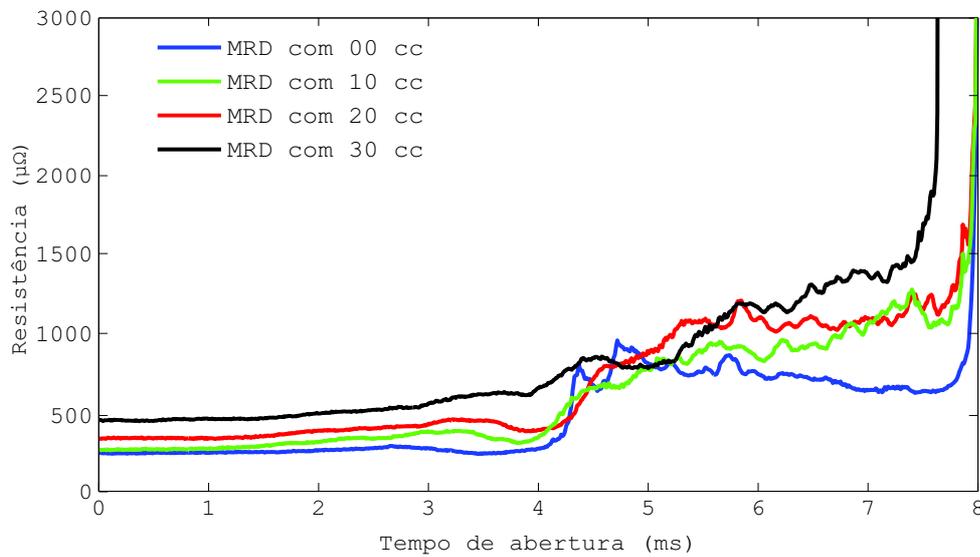
No Capítulo 4 foi apresentada a metodologia utilizada.

A metodologia utilizada no desenvolvimento do ensaio de degradação por meio de curtos-circuitos foi apresentada no Capítulo 4, item 4.4.1. Na Figura 4.14 foi apresentado o arranjo do circuito utilizado para o ensaio de curto-circuito e na Figura 4.15 foi apresentada a sequência do ensaio de degradação por meio de curtos-circuitos para a amostra D1-CMT4.

A cada seção de ensaio de degradação com curtos-circuitos, os níveis de degradação proporcionados foram monitorados. Na Figura 5.15 são apresentadas as curvas da MRD obtidas para o contato D1-CMT4, com o contato novo (0 curto-circuito) até os contatos degradados com 30 aplicações de curto-circuitos. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 250 A.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de média tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada estágio de degradação com aplicação de seções de curtos-circuitos. A curva da MRD do contato novo foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos.

Figura 5.15 – Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT4, em função do ensaio de curto-circuito.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.5 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada. Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.5, destacam-se:

Tabela 5.5 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT4 no ensaio de curto-circuito.

Número de curtos-circuitos	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
0	266	632
10	308	838
20	373	932
30	465	1.703

Fonte: Próprio autor.

- após a aplicação de 10 curtos-circuitos houve um acréscimo de 16% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 33% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o contato novo;
- após a aplicação de 20 curtos-circuitos houve um acréscimo de 40% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 47% na resistência média do contato de arco,

tomando-se como referência o contato novo;

- após a aplicação de 30 curtos-circuitos houve um acréscimo de 75% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 169% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o contato novo.

Os resultados também permitem as seguintes análises:

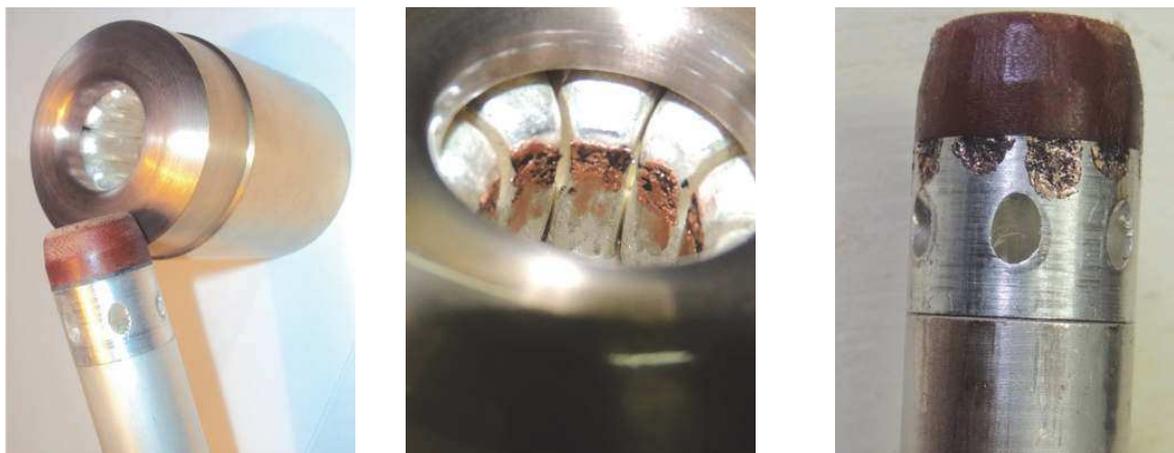
- o ensaio de degradação com curtos-circuitos reproduziu em laboratório um desgaste no contato de arco de forma mais intensa que o desgaste provocado pelo arco elétrico para um disjuntor em serviço. Adicionalmente, o ensaio com curtos-circuitos também proporcionou degradação no contato principal do contato fixo;
- os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência estática não evidenciaram quantitativamente o nível de degradação do contato de arco, tendo em vista que após a aplicação de 30 curtos-circuitos, quando houve um acréscimo de 169% na resistência média do contato de arco, o ensaio de MRE registrou um acréscimo de somente 75% na resistência de contato principal; item os ensaios de degradação com curtos-circuitos proporcionaram desgaste no contato de arco, na extremidade superior do contato móvel, na região próxima a ponta isolante, conforme pretendido;
- os ensaios de degradação com curtos-circuitos também proporcionaram desgaste no contato principal, na extremidade inferior do contato fixo.

Na Figura 5.16 são apresentadas as fotografias dos contatos fixo e móvel, registradas antes e após a realização dos ensaios de curtos-circuitos.

5.3.2 Ensaios de degradação com sobrecorrente

Os ensaios de degradação com sobrecorrente objetivaram o proporcionar degradação na extremidade superior do contato de arco, do contato móvel, com desgastes similares aos provocados pelo arco elétrico.

No ensaio de aplicação de sobrecorrente, os contatos fixo e móvel da amostra D1-CMT3 foram parcialmente fechados, minimizando a área de contato galvânico, conforme ilustração apresen-

Figura 5.16 – Amostra de contato D1-CMT4 antes e após os ensaios de curtos-circuitos.

(a) Contatos novos. (b) Contato fixo após ensaio. (c) Contato móvel após ensaio.

Fonte: Próprio autor

tada na Figura 4.16(b). Com os contatos parcialmente fechados, uma corrente com intensidade de 120% da corrente nominal foi conduzida entre os contatos por um período de 48 horas.

A metodologia utilizada no desenvolvimento do ensaio de sobrecorrente foi apresentada no Capítulo 4, item 4.4.2. Na Figura 4.18 foi apresentado o arranjo do circuito utilizado para o ensaio de degradação térmica e na Figura 4.19 foi apresentada a sequência do ensaio de degradação com sobrecorrente para a amostra D1-CMT3.

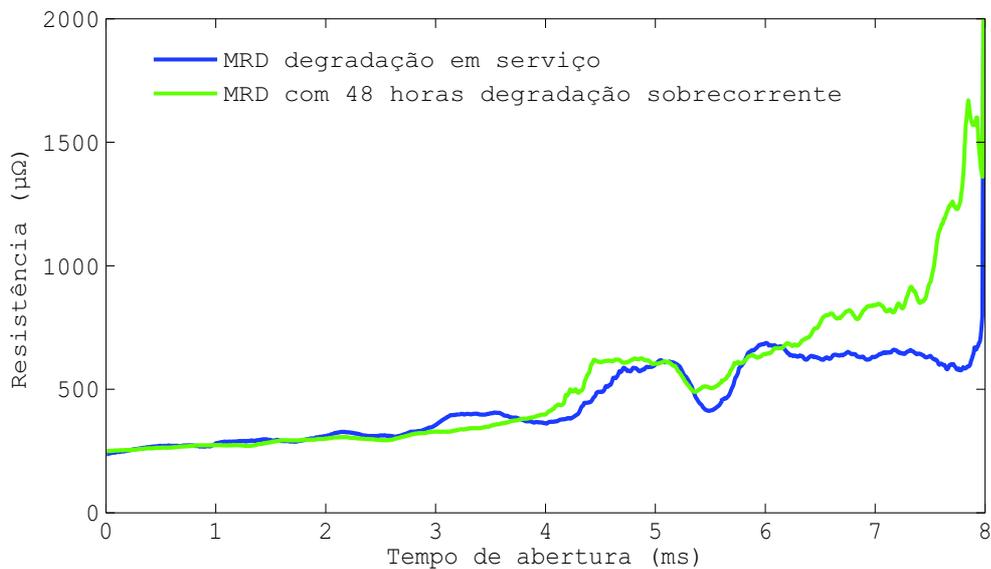
Na Figura 5.17 são apresentadas as curvas da MRD_F obtidas para o contato D1-CMT3, antes e após a primeira seção de ensaio de degradação com sobrecorrente. Na Figura 5.18 são apresentadas as curvas da MRD obtidas para o contato D1-CMT3, antes e após cada seção de ensaio de degradação com sobrecorrente. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 250 A.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de média tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada estágio de degradação com aplicação de seções de sobrecorrente. A curva da MRD_F do contato degradado em serviço foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos.

Na Tabela 5.6 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada.

Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.6, destacam-se:

Figura 5.17 – Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT3, em função do ensaio de degradação com sobrecorrente.



Fonte: Próprio autor.

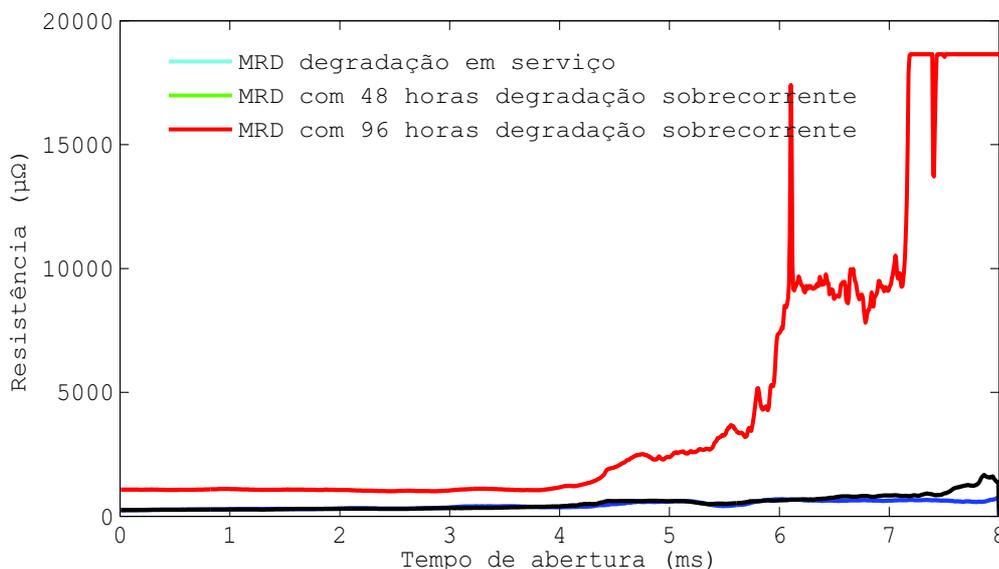
Tabela 5.6 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT3 no ensaio de degradação com sobrecorrente.

Degradação com sobrecorrente (h)	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
0	291	550
48	304	686

Fonte: Próprio autor.

- após a aplicação de 48 horas de degradação com sobrecorrente houve um acréscimo de 4% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 25% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o estágio de degradação com o contato degradado em serviço;
- após a aplicação de 96 horas de degradação com sobrecorrente, houve um aquecimento excessivo devido à sobrecorrente, o que proporcionou a deformação da haste do contato móvel e a carbonização do material isolante na ponta do contato móvel, avariando definitivamente a amostra. O ensaio da MRD com a amostra avariada, resultou em um acréscimo de 265% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 1.178% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o estágio de degradação com o contato

Figura 5.18 – Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT3, em função do ensaio de degradação com sobrecorrente.



Fonte: Próprio autor.

degradado em serviço.

Os resultados também permitem as seguintes análises:

- o ensaio com sobrecorrente entre os contatos parcialmente fechados reproduziu em laboratório um desgaste no contato de arco de forma similar ao desgaste provocado pelo arco elétrico.
- os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência dinâmica evidenciam que não houve degradação do contato principal, tendo em vista, que houve um acréscimo de 4% na resistência do contato principal, em referência aos valores obtidos quando o contato fora degradado somente em serviço. A variação de 4% pode ser atribuída à presença de subprodutos depositados na superfície dos contatos, em virtude carbonização do óleo pelo aquecimento proporcionado pela sobrecorrente;
- o aquecimento devido à sobrecorrente, após a aplicação de 48 horas de ensaio, proporcionou o desgaste na região do contato de arco do contato móvel, sendo esta degradação mais incisiva na região próxima a ponta isolante do contato móvel, conforme pretendido.

5.3.3 Ensaios de degradação térmica

Os ensaios de degradação térmica tiveram como objetivo proporcionar degradação em toda a superfície dos contatos fixo e móvel, de forma mais incisiva que a degradação registrada para o contato principal devido à condução da corrente de carga.

No ensaio de degradação térmica em óleo, um litro de óleo mineral parafínico (óleo de transformador) foi aquecido na faixa de 200 - 210°C, resultando na formação de uma película sobre toda a superfície dos contatos. Com a temperatura do óleo estabilizada na faixa de 200 - 210°C, os contatos fixo e móvel da amostra D1-CMT1 foram imersos por um período de 6 horas. Observou-se que, os níveis de degradação dos contatos produzidos devido à alta temperatura do óleo são análogos aos resultados descritos por (ERBRINK, 2011), que demonstrou que degradação gerada é equivalente a anos de serviço.

Com a imersão dos contatos em óleo aquecido na faixa de 200 - 210°C durante 6 horas, os níveis de degradação dos contatos produzidos devido à alta temperatura do óleo são análogos a degradação gerada por anos de serviço (ERBRINK, 2011).

A metodologia utilizada no desenvolvimento do ensaio de degradação térmica foi apresentada no Capítulo 4, item 4.4.3. Na Figura 4.20 foi apresentado o arranjo do circuito utilizado para o ensaio de degradação térmica e na Figura 4.21 foi apresentada a sequência do ensaio de degradação térmica para a amostra D1-CMT1.

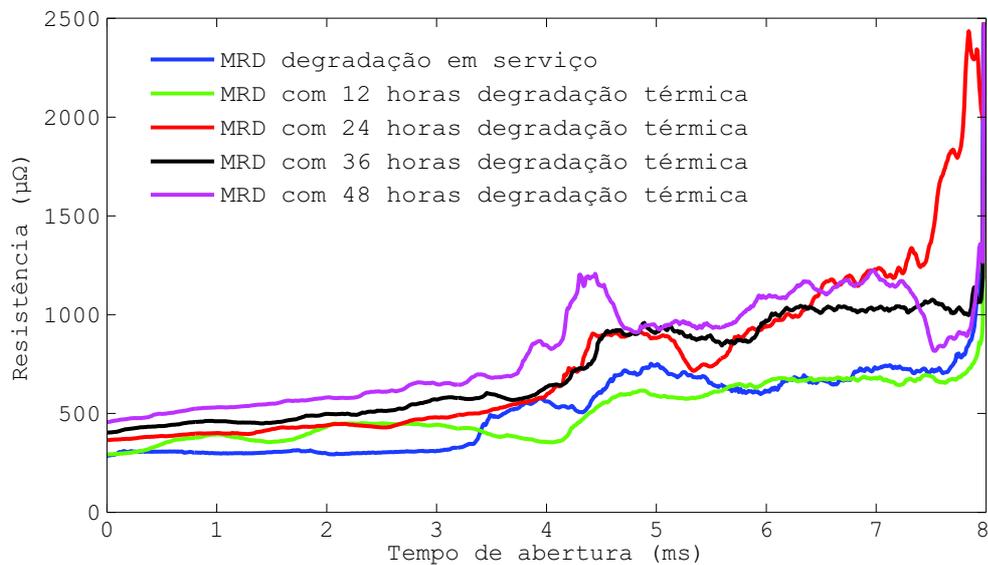
Na Figura 5.19 são apresentadas as curvas da MRD obtidas para o contato D1-CMT1, antes e após cada seção de ensaio de degradação térmica. As curvas da MRD foram obtidas em velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente de teste de 250 A.

Para avaliar os níveis de degradação dos contatos para o disjuntor de média tensão foram confrontados entre si, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica para cada estágio de degradação com aplicação de seções de curtos-circuitos. A curva da MRD do contato degradado em serviço foi adotada como referência na avaliação da degradação dos contatos.

Na Tabela 5.7 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos no ensaio da MRD para cada amostra ensaiada. Ao analisar os parâmetros apresentados na Tabela 5.7, destacam-se:

- após a aplicação de 12 horas de degradação térmica houve um acréscimo de 28% no valor da resistência média do contato principal, e um decréscimo de 11% na resistência média do contato

Figura 5.19 – Curvas da MRD_F para as amostras D1-CMT1, em função do ensaio de degradação térmica.



Fonte: Próprio autor.

de arco, tomando-se como referência o estágio de degradação com o contato degradado em serviço;

- após a aplicação de 24 horas de degradação térmica houve um acréscimo de 39% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 53% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o estágio de degradação com o contato degradado em serviço;
- após a aplicação de 36 horas de degradação térmica houve um acréscimo de 59% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 36% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o estágio de degradação com o contato degradado em serviço;
- após a aplicação de 48 horas de degradação térmica houve um acréscimo de 85% no valor da resistência média do contato principal, e um acréscimo de 52% na resistência média do contato de arco, tomando-se como referência o estágio de degradação com o contato degradado em serviço.

Os resultados também permitem as seguintes análises:

Tabela 5.7 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT1 no ensaio de degradação térmica.

Degradação térmica (h)	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
0	306	657
12	393	588
24	425	1.003
36	485	893
42	565	996

Fonte: Próprio autor.

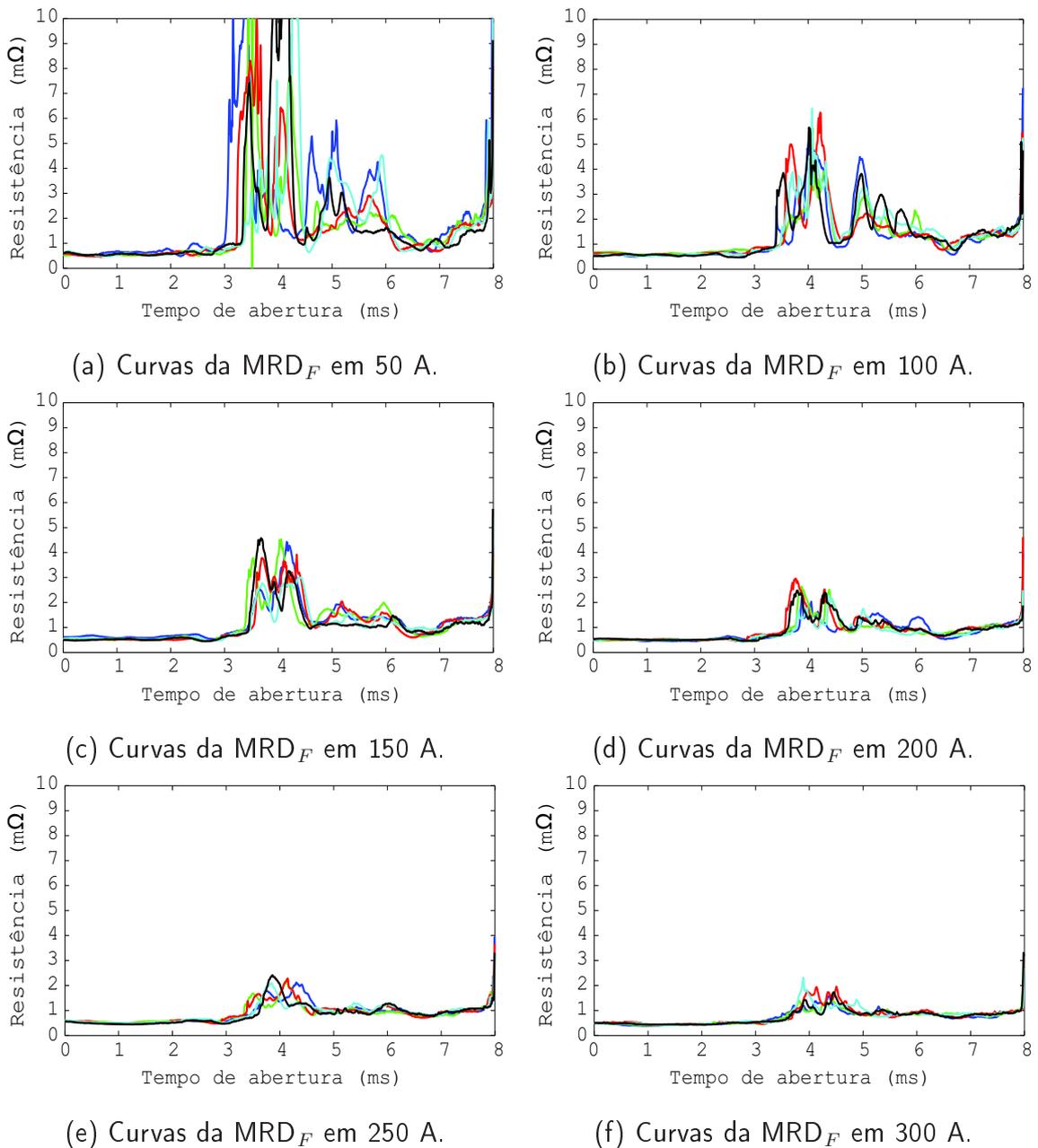
- o ensaio de degradação térmica reproduziu em laboratório um desgaste no contato principal de forma similar ao desgaste provocado pela corrente de carga para um disjuntor em serviço;
- os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência dinâmica evidenciam a degradação do contato principal e do contato de arco, tendo em vista que o ensaio de degradação térmica proporcionou uma evolução de 85% na resistência do contato principal, em referência ao estágio de degradação do contato antes dos ensaios.
- os ensaios de degradação térmica proporcionaram desgaste em toda região dos contatos principal e de arco, sendo esta degradação mais incisiva na região do contato principal, conforme pretendido. O desgaste ocorreu principalmente na região do contato principal, devido a esta região do contato ser composta principalmente por cobre, que é um material mais suscetível à degradação por aquecimento, quando comparado ao tungstênio, que é o principal elemento que compõe a região do contato de arco.

5.4 Ensaios da MRD em diferentes níveis de corrente de teste

Os ensaios da MRD, em níveis distintos de corrente de teste, objetivou avaliar a influência da amplitude da corrente de teste no valor da resistência de contato. Adicionalmente, foi também objetivo deste ensaio avaliar a reprodutibilidade entre curvas obtidas para o mesmo contato, na mesma seção de ensaios. Neste ensaio, a abertura do contatos foi realizada em velocidade nominal.

No ensaio foram previamente definidos 6 níveis de corrente de teste (50 A, 100 A, 150 A, 200 A, 250 A e 300 A). Neste ensaio foi utilizado o contato D1-CMT1 em avançado estágio de degradação. Na Figura 5.20 são apresentadas, em cada gráfico, as cinco curvas com maior coeficiente de determinação (R^2) para o contato D1-CMT1, obtidas para as correntes de teste definidas.

Figura 5.20 – Curvas da MRD_F para D1-CMT1, em velocidade nominal de abertura dos contatos em diferentes níveis de corrente de teste.

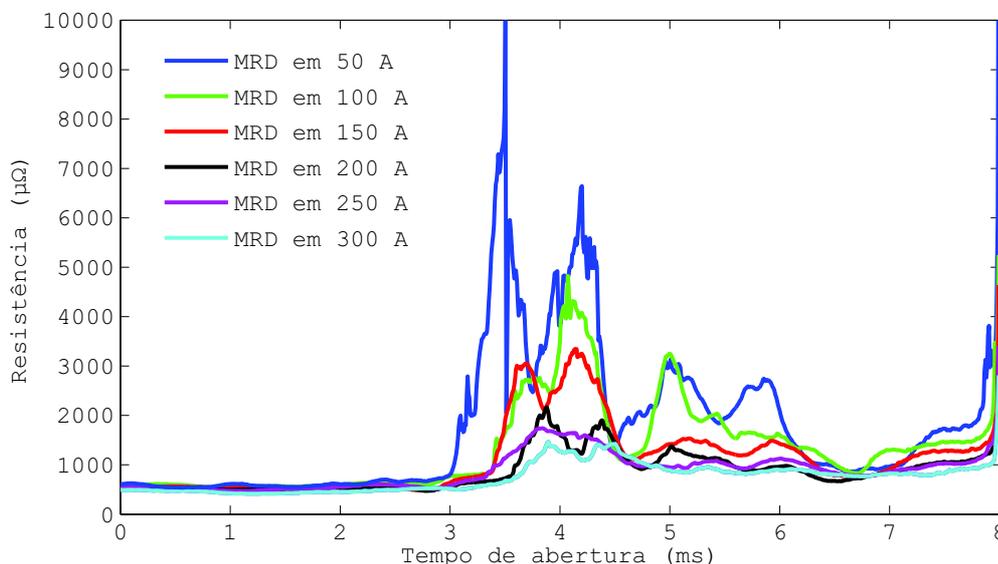


Fonte: Próprio autor.

Nas Figura 5.21 são apresentadas as curvas resultantes (MRD_F) para cada nível de corrente

de teste, conforme ilustrado na Figura 4.8, que apresenta o fluxograma com as etapas para obtenção dos parâmetros da resistência de contato.

Figura 5.21 – Curvas da MRD_F para D1-CMT1, em velocidade nominal de abertura dos contatos em função da corrente de teste.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.8 está apresentada uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios da MRD em função do nível da corrente de teste aplicada no ensaio.

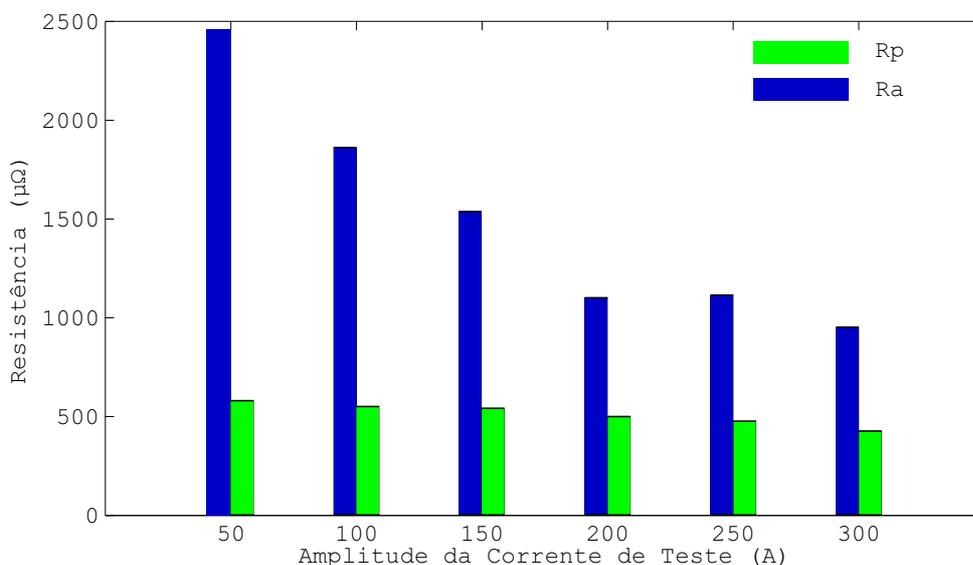
Tabela 5.8 – Resumo dos parâmetros da curva da MRD_F para o contato D1-CMT1 em função da corrente de teste.

Nível da corrente de teste	Parâmetros extraídos das curvas da MRD_F	
	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$
50	578	2.459
100	549	1.859
150	540	1.535
200	498	1.099
250	475	1.112
300	425	950

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.22 é apresentado um comparativo entre os valores de R_p e R_a em função do nível de corrente aplicado no ensaio da MRD.

Figura 5.22 – Comportamento de R_p e R_a em função da corrente de teste para D1-CMT1, em velocidade nominal de abertura dos contatos.



Fonte: Próprio autor.

Para avaliar os resultados obtidos nos ensaios da MRD em função do nível da corrente de teste, os resultados dos ensaios de resistência estática e resistência dinâmica foram confrontados entre si, para cada nível de corrente de teste. Analisando os parâmetros da MRD apresentados na Tabela 5.8, obtidos nos diferentes níveis de corrente de teste e, comparando-os com os parâmetros da MRD obtidos com 300 A, destacam-se:

- com uma corrente de teste de 50 A, há um incremento de 36% na resistência do contato principal e um incremento de 159% na resistência do contato de arco, quando comparados com os mesmos parâmetros obtidos na MRD com 300 A;
- com uma corrente de teste de 100 A, há um incremento de 29% na resistência do contato principal e um incremento de 96% na resistência do contato de arco, quando comparados com os mesmos parâmetros obtidos na MRD com 300 A;
- com uma corrente de teste de 150 A, há um incremento de 27% na resistência do contato principal e um incremento de 62% na resistência do contato de arco, quando comparados com os mesmos parâmetros obtidos na MRD com 300 A;
- com uma corrente de teste de 200 A, há um incremento de 17% na resistência do contato principal e um incremento de 16% na resistência do contato de arco, quando comparados com

os mesmos parâmetros obtidos na MRD com 300 A;

- com uma corrente de teste de 250 A, há um incremento de 12% na resistência do contato principal e um incremento de 17% na resistência do contato de arco, quando comparados com os mesmos parâmetros obtidos na MRD com 300 A.

Os resultados também permitem as seguintes análises:

- os valores da resistência de contato principal e do contato de arco são influenciados diretamente pelo nível da corrente de teste aplicada no ensaio;
- o aumento do nível da corrente de teste aplicada, proporciona uma redução significativa nos valores da resistência de contato, tanto na região do contato principal como na região do contato de arco;
- a influência da corrente de teste é mais significativa no ensaio da resistência dinâmica;
- a influência da corrente de teste é pequena, com correntes de teste superiores a 200 A, para os disjuntores avaliados.

5.5 Estudos de casos

Esta etapa compreende a aplicação do sistema *Fuzzy* desenvolvido. A aplicação do sistema *Fuzzy* nos estudos de caso selecionados, compreende além da determinação dos limites ou características específicas de resistência de contato, até critérios como natureza física (por exemplo, tempo de operação ou as condições ambientais impostas ao equipamento), condições operacionais e grau de importância do equipamento no sistema elétrico.

O estabelecimento de critérios seguros proporcionará uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, proporcionando desse modo, uma maior segurança na tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção ou não no equipamento.

O sistema *Fuzzy* foi aplicado nas quatro amostras de disjuntores disponibilizadas, tendo como parâmetros de configuração os resultados obtidos nos ensaios de resistência para os contatos degradados em serviço. Os parâmetros da MRD_F obtidos em cada um dos ensaios, das amostras D1, D2, D3 e D4 foram aplicados no sistema *Fuzzy*, de modo a quantificar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros características da MRD_F e das características do disjuntor.

Para processamento dos dados de entrada, os parâmetros R_a e R_p foram enquadrados em pelo menos uma das funções de pertinência (RA-B ou RA-MB ou RA-M ou RA-MA ou RA-A) para o parâmetro R_a e (RP-B ou RP-MB ou RP-M ou RP-MA ou RP-A) para o parâmetro R_p , conforme metodologia apresentada na elaboração dos sistema *Fuzzy*, item 4.6.1. Em função das regras pré-estabelecidas, apresentadas no item 4.6.2, o sistema *Fuzzy* estima o nível de degradação dos contatos.

Em função das regras de processamento do sistema *Fuzzy*, o grau de pertinência das variáveis de entrada foram associados a um dos conjuntos *Fuzzy* de saída (ND-B ou ND-MB ou ND-M ou ND-MA ou ND-A). Para determinação do nível de degradação dos contatos foi utilizado o método Média Ponderada dos Máximos.

A quantificação do nível de degradação dos contatos é um dos parâmetro de avaliação que pode definir sobre a necessidade ou não de intervenção no equipamento para rotinas de manutenção.

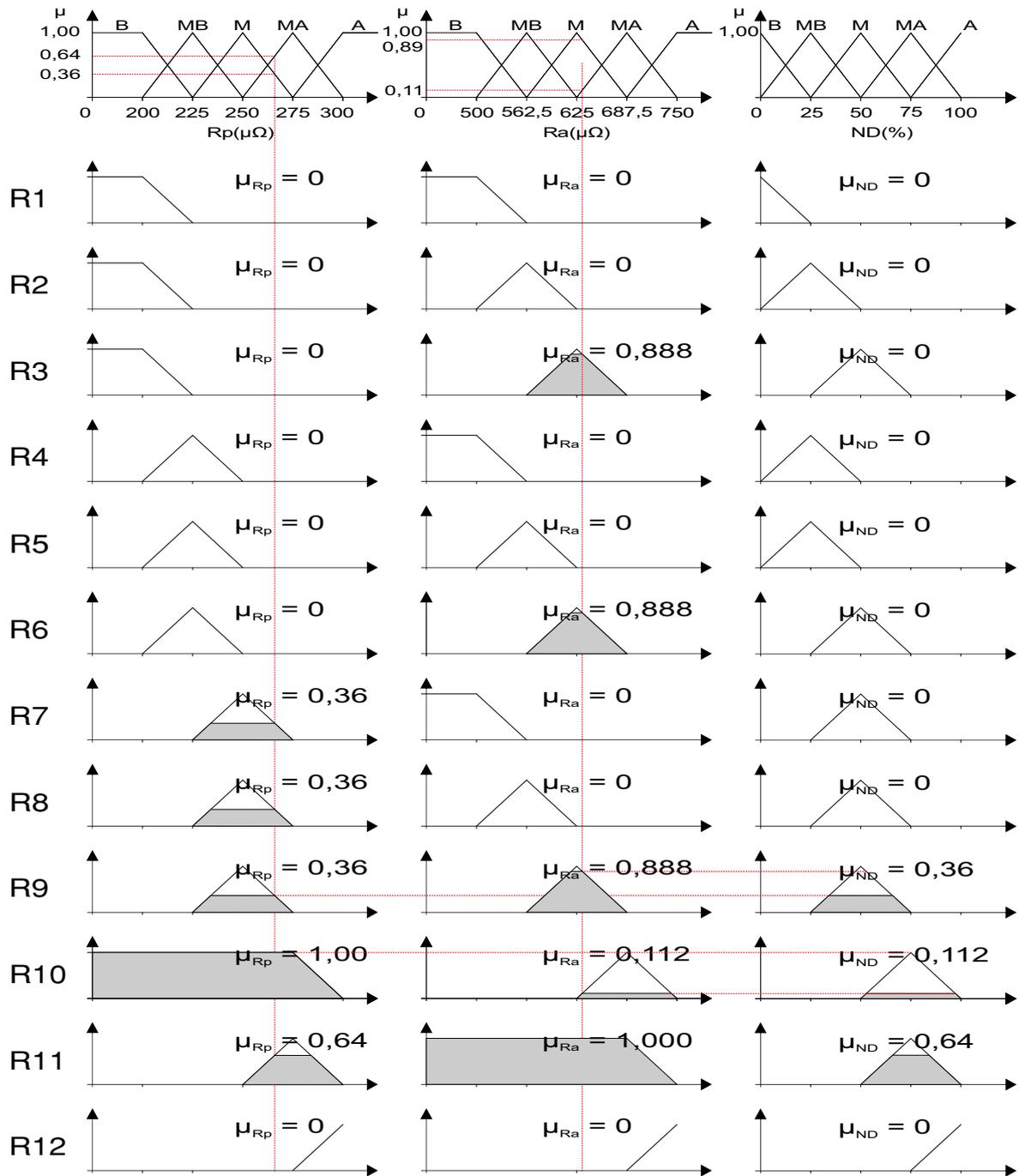
Na Figura 5.23 é apresentada a ilustração gráfica dos princípios do algoritmo do sistema *Fuzzy* desenvolvido, como exemplo típico, para estimativa do nível de degradação da amostra D1-CMT1, sendo os valores de R_p e R_a iguais a $266 \mu\Omega$ e $632 \mu\Omega$, respectivamente.

Na solução apresentada foi utilizada a inferência máx-min, sendo o resultado da saída de cada uma das regras obtido por meio de um produto lógico mínimo, entre os valores de pertinência das variáveis R_p e R_a . Analisando-se a regra 9, tem-se $\mu_{R_p} = 0,36$ para a função de pertinência resistência média (RP-M) e $\mu_{R_a} = 0,888$, para a função de pertinência resistência média (RA-M). Aplicando-se o produto lógico mínimo tem-se que a saída Nível de Degradação terá para esta regra uma pertinência de 0,36. Na Figura 5.24 é apresentado a ilustração gráfica do resultado final da análise do nível de degradação da amostra D1-CMT1. Na Equação 5.14 é apresentado o cálculo para determinação do nível de degradação da amostra D1-CMT1, correspondente a Figura 5.24.

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}} = \frac{50 \times 0,36 + 75 \times 0,112 + 75 \times 0,64}{0,36 + 0,112 + 0,64} = 66,91\% \quad (5.14)$$

A definição do peso atribuído às resistências do contato principal e do contato de arco, na análise do nível de degradação dos contatos, depende das características do disjuntor e da instalação a qual o disjuntor está associado, ou seja, em unidades com alto nível e/ou alta probabilidade de

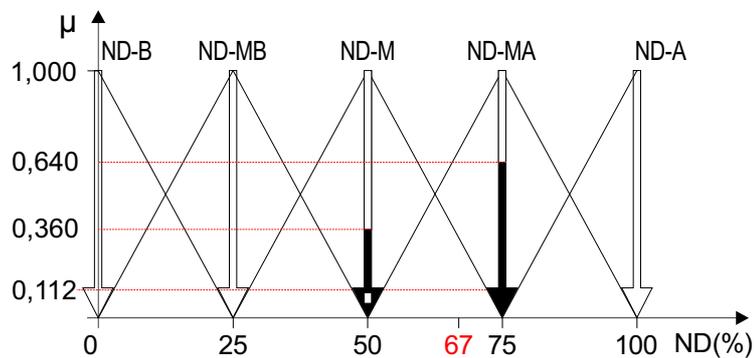
Figura 5.23 – Princípios do algoritmo do sistema *Fuzzy* desenvolvido.



Fonte: Próprio autor.

curto-circuito, em que se registra uma maior incidência de falhas na câmara de extinção devido ao desgaste mais incisivos na região do contato de arco, deve-se atribuir um maior "peso" ao contato de arco. De modo contrário, em unidades com baixo nível e/ou baixa probabilidade de curto-circuito, em que a degradação dos contatos se dá principalmente devido à corrente de carga, apresentando desse modo, uma maior incidência de falhas na câmara de extinção devido ao desgaste mais incisivos

Figura 5.24 – Nível de degradação da amostra D1-CMT1 pelo método de *defuzzificação Média Ponderada dos Máximos*.



Fonte: Próprio autor.

na região do contato principal, deve-se atribuir um maior "peso" ao contato principal.

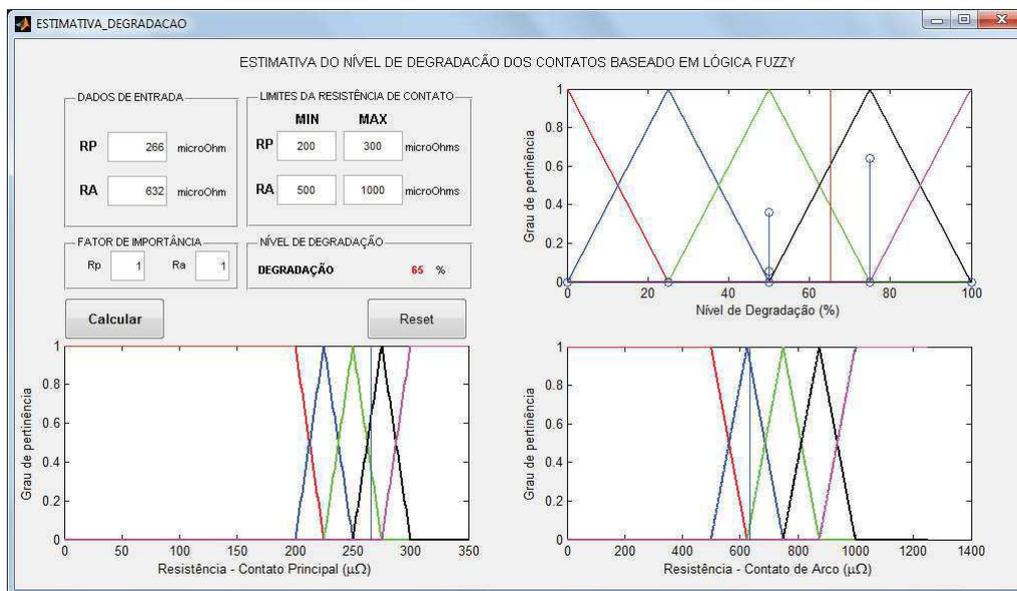
No sistema proposto, o peso atribuído a R_p incide sobre as regras em que R_p é proporcionalmente maior que R_a , desde que R_p não pertença ao conjunto RP-A. Assim, o peso incide sobre as regras 4, 7, 8 e 11. De modo similar, o peso atribuído a R_a incide sobre as regras em que R_a é proporcionalmente maior que R_p , desde que R_a não pertença ao conjunto RA-A. Assim, o peso incide sobre as regras 2, 3, 6 e 10. Ao atribuir o peso a uma das variáveis de entrada R_p e/ou R_a , o resultado das regras que sofreram a incidência do peso serão multiplicadas pelo respectivo peso.

Na Figura 5.25 é apresentada uma ilustração da tela de interface do sistema *Fuzzy* projetado para o cálculo da estimativa do nível de degradação das amostras de contato. Os campos passíveis de edição da interface são:

- DADOS DE ENTRADA - refere-se aos dados obtidos na medição de resistência de contato. Sendo R_p - a resistência do contato principal e R_a - a resistência média do contato de arco.
- LIMITES DA RESISTÊNCIA DE CONTATO - refere-se aos limites mínimo e máximo de R_p e R_a para o modelo de amostra analisada.
- FATOR DE IMPORTÂNCIA - refere-se ao grau de importância (peso) para cada região do contato, com valores entre 0 e 1.
- NÍVEL DE DEGRADAÇÃO - refere-se ao nível de degradação estimado pelo sistema *Fuzzy* em função dos parâmetros apresentados nos itens anteriores.

Na Tabela 5.9 são apresentados os níveis de degradação das amostras dos disjuntores D1,

Figura 5.25 – Interface do sistema para estimativa no nível de degradação das amostras de contatos.



Fonte: Próprio autor.

D2, D3 e D4, degradados em serviço, em função dos parâmetros R_p e R_a . Para fins de análise do sistema *Fuzzy* proposto, em todos os casos analisados foi atribuído o mesmo grau de importância (peso) para o contato principal e para o contato de arco, ou seja, na avaliação do nível de degradação da amostra, a resistência do contato principal e a resistência do contato de arco são igualmente importantes para a amostra, tendo em vista que cada região do contato desempenha uma função específica, com sua devida importância, e o mau desempenho de sua respectiva função pode provocar falha no disjuntor.

5.6 Metodologia para aplicação da técnica da MRD

Em virtude dos resultados apresentados nesta pesquisa, é possível estabelecer uma metodologia para aplicação da MRD como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Para nortear as equipes de manutenção quanto a aplicação da técnica, sugere-se que sejam adotados os seguintes passos:

1. desconectar o disjuntor da rede elétrica, promovendo o aterramento do equipamento, para proporcionar uma maior segurança na realização do ensaio;
2. realizar pelo menos 5 operações de abertura dos contatos do disjuntor, de modo a auxiliar na remoção de possíveis subprodutos depositados na superfície dos contatos, os quais contribuem

Tabela 5.9 – Nível de degradação das amostras dos disjuntores D1, D2, D3 e D4, degradados em serviço, em função dos parâmetros R_p e R_a .

Amostra	$R_p(\mu\Omega)$	$R_a(\mu\Omega)$	Nível de degradação(%)
D1-CMT1	266	632	67
D1-CMT2	280	666	78
D1-CMT3	239	867	100
D2-CMT1	163	738	95
D2-CMT2	193	643	56
D2-CMT3	204	846	100
D3-CAT1	72	90	80
D3-CAT2	97	102	100
D3-CAT3	52	116	93
D4-CAT1	60	93	55
D4-CAT2	78	103	92
D4-CAT3	53	88	47

Fonte: Próprio autor.

para o aumento da resistência de contato;

3. instalar o sistema de medição de resistência (analisador de disjuntor ou sistema equivalente), com capacidade de injeção de corrente de teste mínima de 200 A, adotando-se o mesmo nível de corrente em cada disjuntor;
4. realizar pelo menos 5 ensaios da MRD em cada pólo, resultando em 5 curvas (MRD_1 , MRD_2 , MRD_3 , MRD_4 e MRD_5);
5. calcular a curva média (MRD_M), resultante das 5 curvas da MRD obtidas anteriormente;
6. calcular os fatores de reprodutibilidade R^2 , obtido entre a curva MRD_M e cada uma das curvas (MRD_1 , MRD_2 , MRD_3 , MRD_4 e MRD_5), resultando em 5 fatores de reprodutibilidade (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e R_5);
7. selecionar dentre as 5 curvas da MRD obtidas, as 3 curvas com maior fator R^2 , determinados no item anterior;

8. calcular a curva média final (MRD_{MF}), resultante das 3 curvas da MRD com maior fator R^2 , definidas no item anterior;
9. determinar os parâmetros R_p e R_a da curva MRD_{MF} ;
10. estabelecer os limites máximos permissíveis de resistência de contato R_p e R_a , para o modelo de disjuntor analisado, os quais podem ser definidos em função de consulta a catálogos de fabricante e/ou conforme padrão próprio;
11. definir o fator de importância (peso) para cada região do contato (R_p e R_a), com valores entre 0 e 1;
12. parametrizar o sistema *Fuzzy* desenvolvido nesta pesquisa, com os parâmetros (R_p e R_a), obtidos no ensaio da MRD, e com os parâmetros (limites máximos e mínimos de resistência de contato e fator de importância), característicos do disjuntor analisado;
13. executar a rotina computacional do sistema *Fuzzy* desenvolvido, para estimar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros definidos no item anterior;
14. repetir os procedimentos para os demais pólos do disjuntor.

Em função dos resultados da análise da MRD, e seguindo as recomendações de (ANSI/NETA, 2011), pode-se considerar como um indício de significativa deterioração, quando pelo menos uma das situações a seguir forem registradas:

- nível de degradação estimada acima de 75%, em pelo menos um dos pólos;
- diferença de 50% na resistência R_p entre os três pólos;
- diferença de 50% na resistência R_a entre os três pólos.

Caso seja registrada uma das três situações listadas anteriormente, sugere-se realizar uma intervenção no equipamento.

No capítulo a seguir são apresentadas as conclusões deste trabalho de Tese e algumas sugestões de trabalhos para a continuidade da pesquisa.

Capítulo 6

Conclusões

No desenvolvimento desta Tese consolidou-se o uso da técnica da MRD e avaliou-se as restrições da medição, com aperfeiçoamento dos métodos de diagnóstico e demonstração da viabilidade da técnica da MRD como ferramenta confiável para avaliação do estado evolutivo da degradação dos contatos.

Na avaliação do nível de degradação dos contatos foi desenvolvido um sistema fundamentado em lógica *Fuzzy*, o qual utiliza como parâmetros de entrada as resistências de contato principal e de arco. O sistema *Fuzzy* permite por meio de adaptações simples adotar e interagir com outros parâmetros de avaliação do disjuntor e torna-se bem mais geral. Podem ser incorporados ao sistema *Fuzzy* vários parâmetros de diagnóstico (níveis de vibração, corrente de fuga, tempos de fechamento e abertura, condições ambientais, etc).

Adicionalmente, apresentou-se uma metodologia experimental otimizada e de baixo custo capaz de realizar medição, processamento e extração de parâmetros de resistência de contato. Além disso, a metodologia permite classificar a degradação de contatos das câmaras de extinção de arco em níveis diferenciados. A metodologia foi aplicada a disjuntores de média e alta tensão, tanto em disjuntores a óleo, como em disjuntores a SF₆.

6.1 Contribuições da pesquisa

Além das expressivas contribuições no estudo de resistência de contato em disjuntores apresentados, também podem ser consideradas como contribuições da pesquisa o desenvolvimento das seguintes atividades:

- Projetado, desenvolvido e aplicado um novo sistema para medição da resistência dinâmica de contato em disjuntores de média e alta tensão, independente da tecnologia do meio extintor,

com abertura dos contatos em velocidade nominal e velocidade reduzida. O sistema apresentou excelentes resultados nos ensaios em laboratório e em subestação, podendo também ser aplicado em ensaios de resistência de contato para outros equipamentos do sistema elétrico que adotem a técnica de seccionamento ou comutação de carga por meio de contatos fixos ou móveis, como por exemplo, chaves seccionadoras, religadores, reguladores de tensão, dentre outros;

- Realizados ensaios de levantamento das curvas da MRD de disjuntores de média e alta tensão, em laboratório e em subestação de energia elétrica, utilizando o sistema desenvolvido;
- Comprovada a viabilidade de se realizar o monitoramento de contatos de disjuntores em função da medição da resistência dinâmica de contato;
- Apresentada uma nova perspectiva, mais criteriosa, na análise dos parâmetros da MRD na avaliação da degradação dos contatos, considerando tanto a influência dos contatos de arco, como também dos contatos principais;
- Avaliada a influência no nível da corrente de teste nos parâmetros da MRD e conclui-se o que, para os modelos de disjuntores avaliados, os ensaios da MRD não apresentam bons resultados para correntes de testes inferiores a 200 A;
- Realizados ensaios de degradação acelerada em contatos novos e degradados, com o objetivo de ampliação do banco de dados;
- Desenvolvido em ambiente Matlab®, um sistema especialista de apoio à tomada de decisão, fundamento em lógica *Fuzzy*, para aplicação em estudos de caso, de modo a quantificar o nível de degradação dos contatos, em função dos parâmetros característicos da MRD e das características do disjuntor.

Quando se analisa os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida na Medição de Resistência Dinâmica conclui-se:

- O nível de desgaste nos contatos tem sido identificado nos ensaios de resistência dinâmica. Os contatos identificados visualmente com um maior nível de degradação do contato apresentaram maior resistência de contato;

- O nível de desgaste nos contatos de arco não tem sido identificado no ensaio de resistência estática;
- A técnica da medição da resistência estática avalia apenas o contato principal, sendo ineficaz para avaliação do contato de arco nos modelos de disjuntor analisados. Pelo exposto a MRE não deve ser aplicada isoladamente no diagnóstico de disjuntores;
- As curvas da MRD em velocidade nominal com corrente aplicada de 50 A a 150 A, não apresentaram distintamente, os pontos de separação dos contatos de arco, apresentando basicamente as mesmas informações do ensaio de resistência estática. A provável razão é a presença de compostos químicos depositados na superfície dos contatos, que geram uma película isolante e influenciam diretamente no valor da resistência de contato;
- A reprodutibilidade nas curvas da MRD para a mesma seção de ensaios, têm apresentado melhores resultados quando obtidas com correntes de teste superiores a 200 A;
- Os ensaios comprovaram que a medição de resistência dinâmica pode ser feita na velocidade nominal de abertura dos contatos, com aplicação de corrente contínua de teste superior a 200 A, para os disjuntores PVO de 15 kV e 72,5 kV, bem como para o disjuntor SF₆ de 72,5 kV, utilizados na pesquisa;
- Os ensaios comprovaram que, além dos parâmetros de resistência de contato, a configuração da curva de resistência pode indicar possíveis problemas nos contatos, como folga ou desalinhamento nos dedos de contato;
- Os resultados dos ensaios da MRD somente podem ser confrontados com resultados obtidos para o mesmo modelo de disjuntor, quando os ensaios forem realizados sob as mesmas condições (MRD realizada na mesma velocidade de abertura dos contatos e com o mesmo nível de corrente de teste);
- A aplicação do sistema *Fuzzy* nos estudos de caso selecionados, permitiu classificar o sistema como uma ferramenta eficiente de apoio à tomada de decisão, inferindo o nível de degradação dos contatos. O diagnóstico da condição dos contatos possibilita a redução de custos de manutenção, evitando intervenções desnecessárias e a redução de problemas operacionais no disjuntor;

- O sistema *Fuzzy* desenvolvido permite através de adaptações simples, mantendo-se a metodologia de processamento e análise, avaliar além dos parâmetros característicos da MRD, outras ferramentas de diagnóstico, como níveis de vibração, corrente de fuga, tempos de fechamento e abertura, temperatura dos contatos, etc.

6.2 Sugestão para pesquisas futuras

Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho motivaram as seguintes propostas de trabalhos futuros:

1. A implementação em hardware das rotinas computacionais desenvolvidas para avaliação e diagnóstico em durante a medição;
2. A aplicação da metodologia proposta em consonância e de forma complementar a outras técnicas de diagnóstico, como medição da capacitância dinâmica e sinais acústicos relacionados a vibração dos contatos;
3. Aplicação da técnica da MRD, de modo a avaliar uma possível combinação com outras técnicas de apoio à tomada de decisão, como por exemplo, a Redes Neurais Artificiais, criando classificadores Neuro-Fuzzy;
4. Estudar a avaliação do uso da MRD on line, como as medições dos sinais de tensão e de corrente por meio de sensores ópticos.

Referências Bibliográficas

ABB. *Technical catalogue eVM1*. [S.l.], 2009.

ABB. *Live Tank Circuit Breakers Application Guide*. [S.l.], 2013.

ADAM, M.; BARABOI, A.; PANCU, C. Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers. In: *Proc. 2007 International Conference on Electromechanical and Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 55–60.

AMENDOLA, M.; SOUZA, A. L.; BARROS, L. C. Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no Matlab 6.5. *Campinas: CPG/FEAGRI/UNICAMP*, 2004.

ANSI/IEEE. IEEE standard definitions for power switchgear. *IEEE Std C37.100-1992*, 1992.

ANSI/NETA. MTS-2011. *Standard For Maintenance Testing Specifications For Electrical Power Equipment and Systems*, 2011.

ARAÚJO, A. E. D.; NEVES, W. L. *Cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005.

BHEL, E. *Handbook of Switchgears*. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2007.

BHOLE, A.; GANDHARE, W. An overview of dynamic contact resistance measurement of HV circuit breakers. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, Springer, p. 1–8, 2015.

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.

CAO, Y. et al. Research on rotary-gas high voltage SF₆ circuit breaker with novel blade nozzle part iii: Arc behavior research. In: *IEEE. Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), 2011 1st International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 135–138.

CARVALHO, A. C. C. d. et al. Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência. *EDUFF*, 1995.

CHANG, C. et al. Hierarchical Fuzzy logic system for implementing maintenance schedules of offshore power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 3, n. 1, p. 3–11, 2012.

CHEN, Z.-K.; SAWA, K. Polarity effect of unsymmetrical material combination on the arc erosion and contact resistance behavior. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, IEEE, v. 18, n. 2, p. 334–343, 1995.

CLAESSON, L.; MIDDLETON, A.; GUHA, C. Improving efficiency and safety in HV circuit breaker testing: How should india embrace best developed practice? In: *Gridtech, India*. [S.l.: s.n.], 2007.

- CLEGG, B.; EWART, G.; BRANKIN, F. Advances in circuit breaker testing and condition monitoring. In: IET. *Monitors and Condition Assessment Equipment (Digest No. 1996/186)*, IEE Colloquium on. [S.l.], 1996. p. 7–1.
- COX, E. et al. *The Fuzzy Systems Handbook*. [S.l.]: Academic Press, Inc., 1998.
- DUFOUR, J.-M. *Coefficients of determination*. [S.l.: s.n.], 2011.
- ELCON. *Analisador de chaveamento SA10 datasheet*. 2010.
- ERBRINK, J. J. *On-load tap changer diagnosis on high-voltage power transformers using dynamic resistance measurements*. [S.l.]: TU Delft, Delft University of Technology, 2011.
- FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. [S.l.]: LTC, 2005.
- FLETCHER, P.; DEGEN, W. A summary of the final results and conclusions of the second international enquiry on the reliability of high voltage circuit-breakers. IET, 1995.
- FLURSCHEIM, C. H. *Power circuit breaker theory and design*. [S.l.]: IET, 1982.
- FNINECHE, C.; AITKEN, O. Investigations on some parameters influencing the current commutation in the circuit breakers. IET, 2012.
- FRONTIN, S. O. *Equipamentos de Alta Tensão Prospecção e Hieraquização de Inovações Tecnológicas*. [S.l.: s.n.], 2013.
- FUJIE, S.; ZHANGQI, W.; HONGSAN, Q. Diagnosis techniques on contact electrical endurance of high voltage circuit breakers. In: *1998 International Conference On Power System Technology Proceedings. POWERCON '98*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 1, p. 105–109.
- GARZON, R. D. *High voltage circuit breakers: design and applications*. [S.l.]: CRC Press, 2002.
- GE, H.; ASGARPOOR, S. Reliability evaluation of equipment and substations with Fuzzy Markov processes. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 25, n. 3, p. 1319–1328, 2010.
- GILL, P. *Electrical power equipment maintenance and testing*. [S.l.]: CRC press, 2008.
- GOUDARZI, A. et al. Intelligent analysis of wind turbine power curve models. In: IEEE. *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG)*. [S.l.], 2014. p. 1–7.
- GREMMELE, H.; KOPATSCH, G. *Switchgear manual*. [S.l.]: Cornelsen, 2001.
- GRIJP, M. H. de et al. Condition monitoring of high voltage circuit breakers. In: IEEE. *AFRICON, 1996., IEEE AFRICON 4th*. [S.l.], 1996. v. 2, p. 880–885.
- GUPTA, D. et al. Numerical simulation for arc-plasma dynamics during contact opening process in electrical circuit-breakers. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2010. v. 208, n. 1, p. 012046.
- HAMAM, A.; GEORGANAS, N. D. A comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy inference systems for evaluating the quality of experience of haptic-audio-visual applications. In: *IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games, 2008. HAVE 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 87–92.
- HOERAUF, R.; SHIPP, D. Characteristics and applications of various arc interrupting methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 27, n. 5, p. 849–861, 1991.

- HOLM, E.; HOLM, R.; II, E. I. S. Theory of hardness and measurements applicable to contact problems. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, v. 20, n. 4, p. 319–327, 1949.
- HYDROPOWER. *Maintenance of Power Circuit Breakers*. [S.l.], 1999.
- IEC. IEC std 62271-100. *High-voltage switchgear and controlgear*, v. 5, 2001.
- IEEE. IEEE guide for the selection of monitoring for circuit breakers. *IEEE Std C37.10.1-2000*, 2001.
- IEEE. IEEE standard test procedure for ac high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis corrigendum 1. *IEEE Std C37.09-1999/Cor 1-2007 (Corrigendum to IEEE Std C37.09-1999)*, 2007.
- IVANKOVIĆ, I. et al. Transient recovery voltage of 400 kV SF₆ circuit breaker when clearing short-line fault. In: HRVATSKA ZNANSTVENA BIBLIOGRAFIJA I MZOS-SVIBOR. *16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, 24-28.08. 2009*. [S.l.], 2009.
- JANÉ, D. d. A. Uma introdução ao estudo da lógica Fuzzy. *Hórus–Revista de*, 2004.
- JEYARAJ, S. G.; HABTAY, Y. Effective and efficient circuit breaker analysis. *IET*, 2011.
- KAM, S.-c.; NIELSEN, S.; LEDWICH, G. A circuit-breaker restriking diagnostic algorithm using ATP and Wavelet transforms. In: IEEE. *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian*. [S.l.], 2011. p. 1–6.
- KANTHAL. *Como calcular resistências de aquecimento*. [S.l.], 1998.
- KAUR, A.; KAUR, A. Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type Fuzzy inference systems for air conditioning system. *International journal of soft computing and engineering*, v. 2, n. 2, p. 2231–2307, 2012.
- KOLLER, L.; NOVÁK, B.; TAMUS, Á. *Electrical switching devices and insulators*. 2012.
- LANDRY, M. et al. A new measurement method of the dynamic contact resistance of HV circuit breakers. In: IEEE. *2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. [S.l.], 2006. p. 1002–1009.
- LANDRY, M.; TURCOTTE, O.; BRIKCI, F. A complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on HV circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 710–716, 2008.
- LANGAN, P. E. et al. *A Guide To Low Resistance Testing*. [S.l.], 2004.
- LAUGHTON, M. A.; SAY, M. G. *Electrical engineer's reference book*. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- LEMELSON, K. About the failure of closed heavy current contact pieces in insulating oil at high temperature. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 50–52, 1973.
- LEVI, J. A simplified method for determining HV circuit breaker contact condition - dynamic resistance measurement. In: *Doble Engineering Company*. [S.l.: s.n.], 2011.
- LI, W.-h.; LIU, G.-j.; LI, Z.-g. Study and reliability analysis on testing instrument for dynamic contact resistance on contact. In: IEEE. *Proceedings of the Forty-Sixth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. [S.l.], 2000. p. 109–114.
- LIN, P.-C.; GU, J.-C.; YANG, M.-T. Intelligent maintenance model for condition assessment of circuit breakers using Fuzzy set theory and evidential reasoning. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 8, n. 7, p. 1244–1253, 2014.

- LINGJIE, H. et al. Research on the model of HV SF₆ circuit breaker fault diagnosis based on Fuzzy theory. In: IEEE. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008*. [S.l.], 2008. p. 428–431.
- MAMDANI, E. Application of Fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 121, n. 12, p. 1585–1588, December 1974.
- MCDONALD, J. D. *Electric power substations engineering*. [S.l.]: CRC press, 2012.
- MOURA, A. *Manual técnico moura clean*. [S.l.], 2000.
- NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. *High voltage engineering*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2009.
- NASRALLAH, E.; BRIKCI, F.; PERRON, S. Electrical contacts in MV & HV power circuit breakers. *Electric Energy T&D Magazine*, Jaguar Media Inc, v. 11, n. 1, p. 50–58, 2007.
- NASRALLAH, E.; BRIKCI, F.; PERRON, S. Make/break contacts in power circuit breakers. *Electric Energy T&D Magazine*, Jaguar Media Inc, v. 11, n. 1, p. 54–60, 2007.
- NÉMETH, B.; LABONCZ, S.; KISS, I. Condition monitoring of power transformers using DGA and Fuzzy logic. In: IEEE. *Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009. IEEE*. [S.l.], 2009. p. 373–376.
- NOGUEIRA, J. A. *Inspetor de Eletricidade: Dispositivos de Seccionamento e Comutação*. [S.l.: s.n.], 2006.
- OHLEN, M.; DUECK, B.; WERNLI, H. Dynamic resistance measurements—a tool for circuit breaker diagnostics. In: *Stockholm Power Tech International Symposium on Electric Power Engineering*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 6, p. 108–113.
- PANCU, C. et al. New possibility for the electroerosion estimation of the circuit breakers contacts. In: *8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines POWER'08*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 81–84.
- PAULKE, J.; WEICHERT, H.; STEINHAEUSER, P. Thermal simulation of switchgear. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, v. 25, n. 3, p. 434–439, Sep 2002.
- PENG, S. et al. Application of flower-like ZnO nanorods gas sensor detecting SF₆ decomposition products. *Journal of Nanomaterials*, Hindawi Publishing Corp., v. 2013, p. 1, 2013.
- PINNEKAMP, F. The circuit breaker, a showcase of industrial product development. *ABB Review*, p. 71–75, 2007.
- PLANSEE. *Tungsten Copper for SF₆ Circuit Breakers*. [S.l.], 2014.
- 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*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 168–174, 1993.
- RAZI-KAZEMI, A. A. et al. Priority assessment of online monitoring investment for power system circuit breakers - part i: Qualitative-quantitative approach. *IEEE transactions on power delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 28, n. 2, p. 928–938, 2013.
- REDE, C. *Valores de referência de resistência de contato*. [S.l.], 2008.
- SANTOS, D. T. d. et al. Sistema inteligente para apoio à programação da manutenção de disjuntores de alta tensão. 2013.

- SCHNEIDER. *Evolis circuit breakers 24 kV Catalogue*. [S.l.], 2014.
- SIEMENS. *SPS2 Circuit Breaker (15kV-245kV) Application Guide*. [S.l.], 2006.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem Fuzzy*. São Paulo. Blucher: Fapesp, 2007.
- SMEETS, R. et al. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.
- SODHA, N. S. et al. Condition assessment of EHV class circuit breakers using dynamic contact resistance measurement technique. In: *CIGRE Session Paris*. [S.l.: s.n.], 2012.
- STANISIC, Z. Method for static and dynamic resistance measurements of HV circuit breaker. In: *IEEE. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011*. [S.l.], 2011. p. 1–5.
- STANISIC, Z.; NEIMANIS, R. A new ultra lightweight method for static and dynamic resistance measurements. In: *IEEE. Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*. [S.l.], 2010. p. 1–4.
- STEWART, S. *Distribution switchgear*. [S.l.]: IET, 2004.
- SWEETSER, C. et al. Strategies for selecting monitoring of circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 742–746, 2002.
- TEPPER, J. et al. Investigation on erosion of Cu/W contacts in high-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, IEEE, v. 29, n. 3, p. 658–665, 2006.
- TINGTING, C. et al. Influence of the injected current on dynamic contact resistance measurements of HV circuit breakers. In: *IEEE. 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.], 2014. p. 1477–1481.
- TURCOTTE, O.; GAUTHIER, R. A thorough examination of circuit breaker health-hydro-quebec transenergie explores alternative diagnostic methods in its high-voltage circuit breaker maintenance program. *Transmission and Distribution World*, Overland Park, KS: Intertec Pub. Corp., 1996-, v. 60, n. 2, p. 28–33, 2008.
- UKIL, A.; ZLATANSKI, M.; HOCHLEHNERT, M. Monitoring of HV generator circuit breaker contact ablation based on acoustic emission. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 62, n. 10, p. 2683–2693, 2013.
- VIP. *Tungsten in electrical contact metals*. [S.l.], 2014.
- WÄCKLÉN, N.; BJÖRCK, K.; CLAESSESON, L. High voltage circuit breaker testing with dual grounding. *Energise*, p. 52–55, 2008.
- WESTERN. *Power system maintenance manual*. [S.l.], 1998.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.
- ZENG, F. et al. Decomposition characteristics of SF₆ under thermal fault for temperatures below 400 °C. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 995–1004, 2014.
- ZIANI, A.; MOULAI, H. Extinction properties of electric arcs in high voltage circuit breakers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 42, n. 10, p. 105205, 2009.