



Universidade Federal
de Campina Grande

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

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

**ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DINÂMICA EM DISJUNTORES:
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA CORRENTE E DA
VELOCIDADE DE ABERTURA DOS CONTATOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Campina Grande, Paraíba.
Agosto de 2015

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA VELOCIDADE DE ABERTURA DOS CONTATOS E
DA CORRENTE NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DINÂMICA
EM DISJUNTORES

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

Área de Concentração: Processamento da Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.

Agosto de 2015

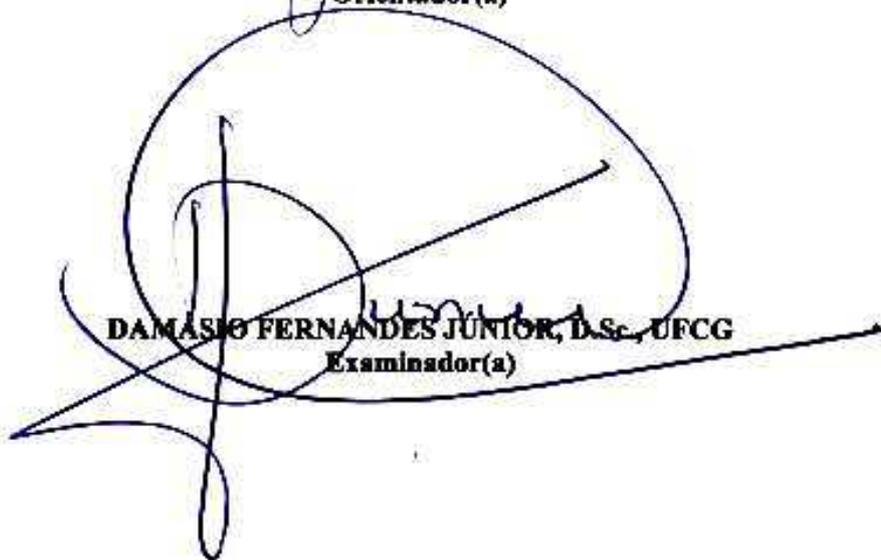
**"ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DINÂMICA EM DISJUNTORES: ANÁLISE DE
SENSIBILIDADE DA CORRENTE E DA VELOCIDADE DE ABERTURA DOS
CONTATOS"**

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/07/2015



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



DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



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

CAMPINA GRANDE - PB

Dedico este trabalho ao meu pai, Alciônio, e a minha mãe, Miriam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Alcônio e Miriam, pela minha vida, pelo exemplo de vida, dedicação e perseverança, pelo apoio, paciência e amor.

Ao meu irmão Angelo, pela amizade, pelo companheirismo, pelo apoio e confiança.

Ao professor Edson Guedes pela orientação, pela amizade, pelo incentivo e confiança em mim depositada.

Ao professor Ronimack Trajano de Souza pela parceria e pela contribuição para meu desenvolvimento acadêmico.

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

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

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante a vigência do trabalho.

A Chesf, na pessoa Vladimir Cesarino de Souza, e Energisa, na pessoa de Tercius Cassius Melo de Moraes, pelas contribuições para a realização da pesquisa.

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

Adriano Costa de Oliveira

"A persistência é o caminho do êxito."

(Charles Chaplin)

RESUMO

A medição de resistência dinâmica (MRD) é uma técnica de diagnóstico utilizada para aferir o grau de degradação dos contatos de disjuntores. A mesma se destaca por ser capaz de analisar tanto os contatos principais como os de arco. Neste trabalho é realizada uma análise da reprodutibilidade dos resultados de ensaios de MRD implementados com e sem redução da velocidade de abertura dos contatos, além de uma análise sobre a influência do nível de corrente de teste nos ensaios de MRD. Para avaliar a metodologia, uma comparação foi feita utilizando o coeficiente de determinação (R^2) entre os resultados de MRD executadas com velocidade reduzida e com velocidade nominal. Para realização dos ensaios, adotou-se um sistema alternativo de medição, que consiste em um osciloscópio digital, uma bateria estacionária, sensores de tensão e corrente e resistores de cromo-alumínio-ferro. O sistema proposto permite a aplicação de uma corrente de teste de até 300 A. Para reduzir a velocidade de abertura dos contatos, foi desenvolvido um sistema composto por um redutor de velocidade acoplado a um motor assíncrono que, por sua vez, foi acionado por um inversor de frequência. A partir dos resultados obtidos com as amostras estudadas, verificou-se que: os resultados de MRD executadas com velocidade nominal de abertura dos contatos não se repetem em ensaios similares; ensaios de MRD executados em velocidade nominal e utilizando os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC e ANSI são altamente afetados pela interferência de películas de óleo, gerando diagnósticos errôneos e/ou não confiáveis; ensaios de MRD realizados com velocidade reduzida de abertura dos contatos fornecem maior reprodutibilidade dos resultados; para ensaios de MRD realizados com velocidade reduzida, níveis maiores de corrente de teste ajudam a aumentar a reprodutibilidade dos resultados, no entanto, este efeito diminui a medida que a velocidade de abertura vai aumentando.

Palavras-chave: Disjuntores, Diagnóstico, Resistência dinâmica, Velocidade de abertura, Corrente de teste, Inspeção.

ABSTRACT

The dynamic resistance measurement (DRM) is a diagnostic technique used to assess the operative state of circuit breaker contacts, that stands out for being able to analyze both the main and arcing contacts. In this research, an analysis of the result reproducibility of DRM tests is presented, which was implemented with speed reduction of the contact opening process, as well as an analysis of the test current level influence on DRM results. To evaluate the methodology, a comparison was made using the coefficient of determination (R^2) between the results of the DRM tests carried out with speed reduction and at rated speed. To perform the tests, an alternative system was adopted, which consists of a digital oscilloscope, a stationary battery, current and voltage sensors and resistors made of chrome aluminum iron. The proposed system allows the injection of a direct current up to 300 A. To achieve the speed reduction of the contact opening process, a speed reducer was coupled with an asynchronous motor, which was triggered by a frequency inverter. From the obtained results with the samples studied, it can be verified that: the results of DRM tests carried out with rated speed of contact opening do not repeat themselves on similar tests; DRM tests carried out with rated speed of contact opening and using the minimum levels of test current indicated by IEC and ANSI standards are highly affected by the interference of oil films, thus, providing masked and unreliable results; DRM tests carried out with reduced speed of contact opening provides results with better reproducibility; for DRM tests carried out with reduced speed of contact opening, higher levels of test current help to increase the result reproducibility, however, this effect is not as noticeable as the opening speed increases

Keywords: Circuit breakers, Diagnosis, Dynamic resistance, Opening speed, Test current, Inspection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ilustração de um disjuntor tipo PVO.	22
Figura 2.2: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor PVO e das etapas de extinção de arcos elétricos.	25
Figura 2.3: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a vácuo.	27
Figura 2.4: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a SF ₆ e das etapas de extinção de arcos elétricos.	28
Figura 2.5: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a ar comprimido.	30
Figura 2.6: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético e das etapas de extinção de arcos elétricos.	31
Figura 2.7: Ilustração de um esquema de medição da resistência estática de contato com um microohmímetro (ABB, 2009), (VANGUARD, 2010).	38
Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema proposto para estimativa do nível de eletroerosão dos contatos, o desgaste linear do contato de arco e estimativa do número operações do disjuntor.	46
Figura 3.2: Diagrama de blocos do sistema proposto para medição de baixas resistências utilizando um ultracapacitor.	47
Figura 4.1: Fotografia do disjuntor A.	53
Figura 4.2: Fotografia do disjuntor B.	53
Figura 4.3: Amostras de contato fixo do disjuntor A.	54
Figura 4.4: Amostras de contato móvel do disjuntor B.	54
Figura 4.5: Ilustração do arranjo adotado para ensaios de MRD.	56
Figura 4.6: Arranjo experimental utilizado nos ensaios de MRD.	56
Figura 4.7: Sistema de redução/controle de velocidade de abertura dos contatos.	57
Figura 4.8: Circuito auxiliar para gatilhamento do osciloscópio.	58
Figura 5.1: Curvas de MRD obtidas em velocidade nominal e diferentes correntes de teste.	60
Figura 5.2: Curva de comportamento da MRD e MRE em função da corrente de teste.	61
Figura 5.3: Resistência estática em função do tempo.	63
Figura 5.4: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 50 A (amostra Y).	65

Figura 5.5: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 50 A (amostra X).....	66
Figura 5.6: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 50 A (amostra Z).....	68
Figura 5.7: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 300 A (amostra Z)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Síntese da revisão bibliográfica.....	50
Tabela 4.1: Características dos disjuntores de média tensão.....	52
Tabela 5.1: Erro percentual absoluto médio da área e valor médio das curvas de resistência.	62
Tabela 5.2: Coeficientes de determinação médios para cada configuração de ensaio. ...	69

LISTA DE ABREVIATURAS

MRD	Medição de resistência dinâmica
MRE	Medição de resistência estática
MCD	Medição de capacitância dinâmica
IEC	International Electrotechnical Commission
ANSI	American National Standards Institute
PVO	Pequeno volume de óleo
GVO	Grande volume de óleo
EPAM	Erro percentual absoluto médio
CC	Corrente contínua
TRT	Tensão de restabelecimento transitório
TCTRT	Taxa de crescimento da TRT

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	15
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivos	18
1.3. Contribuições	19
1.4. Organização do trabalho	20

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. Disjuntores de alta tensão	21
2.2. Tipos de disjuntores	23
2.2.1. Disjuntores a óleo	23
2.2.2. Disjuntores a vácuo	25
2.2.3. Disjuntores a SF ₆	27
2.2.4. Disjuntores a ar comprimido	29
2.2.5. Disjuntores a sopro magnético	30
2.3. Câmaras de extinção	31
2.4. Manutenção em disjuntores	33
2.4.1. Avaliação do meio isolante.....	35
2.4.2. Avaliação da parte mecânica	35
2.4.3. Avaliação dos contatos	36
2.5. Medição da resistência de contato em disjuntores.....	37
2.5.1. Medição de resistência estática de contato (MRE).....	37
2.5.2. Medição de resistência dinâmica de contato (MRD).....	39
2.6. Ferramentas estatísticas	40
2.6.1. Coeficiente de determinação (R^2)	40
2.6.2. Erro percentual absoluto médio (EPAM)	41

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	43
-----------------------------	----

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS	52
4.1. Material.....	52

4.2. Métodos	55
CAPÍTULO 5	
RESULTADOS E ANÁLISES.....	59
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÕES	71
TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os disjuntores de alta tensão são dispositivos de proteção eletromecânicos projetados para conduzir, restabelecer e interromper correntes em um determinado ponto do circuito. Podem ser acionados manualmente ou automaticamente através de relés de proteção. Disjuntores geralmente são acionados para isolar parte de um circuito no caso de uma falha no sistema, devendo atuar o mais rápido possível antes que os efeitos térmicos e mecânicos possam causar danos às pessoas ou às instalações elétricas. Portanto, o monitoramento sistemático é um fator determinante para garantir o bom estado operativo dos disjuntores, fazendo com que as exigências básicas do sistema elétrico, como confiabilidade, economia e continuidade do fornecimento de energia elétrica possam ser atendidas.

Os disjuntores se diferenciam principalmente pelas suas diferentes capacidades de interrupção de corrente e pelo princípio de extinção de arco elétrico utilizado nas câmaras de extinção. As câmaras de extinção são compartimentos vedados do disjuntor que envolvem os contatos fixo e móvel, que por sua vez, são formados por contatos principais e de arco (NASRALLAH *et al.*, 2007).

A alta temperatura gerada pela formação de arcos elétricos é a principal causa de desgaste nos contatos de disjuntores. Portanto, os contatos de arco, responsáveis pela condução das correntes de arco, se desgastam mais rapidamente que os contatos principais, responsáveis pela condução da corrente de carga.

Contatos de arco desgastados favorecem reignições de arco, conseqüentemente diminuem a capacidade de interrupção de corrente. Além disso, podem causar sobreaquecimentos que ultrapassam os limites térmicos dos disjuntores, causando desgaste acelerado do equipamento, deteriorando o material isolante, prejudicando as juntas de vedação e até mesmo trazendo um risco de explosão do disjuntor.

Apesar da importância da avaliação dos contatos de arco, as concessionárias de energia elétrica atualmente realizam o monitoramento dos contatos mediante a aplicação periódica da técnica de medição de resistência estática, que só é capaz de analisar os contatos principais. Normalmente, os critérios utilizados para determinar a periodicidade em que são realizados ensaios e/ou inspeções para avaliação dos

disjuntores são o número de manobras e o tempo de serviço do equipamento (ADAM *et al*, 2007).

As técnicas de avaliação do grau de degradação dos contatos de disjuntores a partir da medição da resistência possuem a vantagem de evitar desmontagens desnecessárias, que podem perdurar por semanas. Durante as etapas de desmontagem e remontagem, novos problemas podem surgir, como a introdução de impurezas no óleo ou a danificação de juntas de vedação, tornando o disjuntor susceptível a falhas de operação, consequentemente reduzindo a confiabilidade do sistema elétrico.

Algumas normas técnicas padronizam o nível de corrente que deve ser utilizado nos ensaios de resistência de contato. De acordo com a norma IEC, a resistência de contato deve ser medida com uma corrente de teste mínima de 50 A. A norma ANSI determina que a corrente de ensaio deve ser de no mínimo 100 A (IS/IEC 62271-1, 2007; ANSI/IEEE STD C37.09, 1999).

Com o objetivo de obter uma avaliação mais confiável das condições operacionais dos contatos de disjuntores, pesquisas vêm sendo direcionadas para a medição de resistência dinâmica (MRD). Esta técnica consiste basicamente na determinação da resistência dos contatos durante sua abertura e é capaz de avaliar tanto os contatos principais como os de arco (LANDRY *et al*, 2006).

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dois disjuntores de média tensão a pequeno volume de óleo (PVO). Alguns contatos foram desgastados artificialmente, de modo a se obter diferentes níveis de degradação para efeito de comparação.

1.1. MOTIVAÇÃO

Ao longo dos anos, as pesquisas sobre a aplicação da medição de resistência dinâmica de contato (MRD) no diagnóstico de disjuntores evidenciaram a eficiência da técnica na avaliação dos contatos principal e de arco nas câmaras de extinção de arco. Mesmo assim, ainda existe uma relutância muito grande por parte das concessionárias de energia na adoção de novas metodologias.

Apesar do fato de que a MRD é abordada por várias pesquisas, a técnica ainda não foi totalmente consolidada, abrindo espaço para aprimoramentos. Ainda não foi definido um modelo conclusivo de análise das curvas de resistência, de modo a correlacioná-las com o estado real dos contatos. Os procedimentos de ensaio também ainda não foram definidos e padronizados.

Visando encontrar a melhor forma de se realizar os ensaios de MRD, propõe-se nesta dissertação, analisar a influência da velocidade de abertura dos contatos e do nível de corrente de teste nos ensaios de medição de resistência dinâmica de contato em disjuntores, a partir de medições realizadas em contatos com diferentes graus de degradação.

Este projeto de dissertação está sendo desenvolvido dentro de uma linha de pesquisa onde também está inserida a tese de doutorado de Ronimack Trajano de Souza, que trata do diagnóstico de contatos de disjuntores baseado na resistência dinâmica de contato e lógica *fuzzy*.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aprimorar a aplicação da técnica de medição de resistência dinâmica mediante uma análise dos seus parâmetros de ensaio, de modo a encontrar o procedimento de ensaio mais indicado para testes de MRD, a fim de se obter resultados mais confiáveis.

Além disso, foram buscados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência do nível de corrente de teste utilizado nos ensaios de MRD;
- Avaliar a influência da velocidade de abertura dos contatos nos ensaios de MRD;
- Comparar, mediante a análise da reprodutibilidade dos resultados, o diagnóstico obtido por meio da aplicação da técnica de MRD realizada em velocidade nominal e com redução de velocidade, a partir de um banco de dados com os resultados de medições obtidas para amostras de contatos com diferentes níveis de degradação;
- Avaliar a influência de películas de óleo formadas nas superfícies dos contatos nos ensaios de medição de resistência estática;
- Determinar um nível mínimo de corrente a ser utilizado nos ensaios de MRD no disjuntor analisado, de modo a se obter resultados mais confiáveis;
- Determinar um nível máximo de velocidade de abertura de contatos a ser utilizado nos ensaios de MRD no disjuntor analisado, de modo a se obter resultados mais confiáveis.

1.3. CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições deste trabalho são listadas a seguir:

- Aprimoramento do sistema de MRD desenvolvido originalmente Souza (2014), de modo a possibilitar a realização dos ensaios com controle/redução da velocidade de abertura dos contatos, além de permitir que o processo de abertura seja feito com velocidade praticamente constante;
- Determinação dos níveis de corrente de teste mais adequados a serem utilizados em ensaios de MRD, de modo a reduzir a interferência gerada por películas de óleo;
- Determinação das faixas de velocidade de abertura de contato mais adequadas a serem utilizadas em ensaios de MRD, de modo a reduzir a interferência gerada por vibrações mecânicas;
- Comprovação de que os ensaios de MRD realizados com os níveis mínimos de corrente de teste estabelecidos pelas normas IEC e ANSI não fornecem diagnósticos confiáveis, devido à baixa reprodutibilidade dos resultados.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre disjuntores, descrevendo suas câmaras de extinção de arco, os principais tipos de disjuntores, os procedimentos de manutenção e as técnicas utilizadas para medição de resistência de contato. Além disso, também é apresentada uma descrição dos métodos estatísticos adotados para interpretação dos resultados obtidos nesta pesquisa.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica descrevendo as principais pesquisas reportadas na literatura que abordam o monitoramento e diagnóstico do estado operativo de disjuntores mediante a aplicação da medição de resistência dinâmica de contato (MRD).

No Capítulo 4 são descritos os materiais e os métodos empregados nos ensaios de MRD em laboratório.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da técnica proposta, bem como a análise destes resultados. São comparados os resultados obtidos com as diferentes configurações de ensaio, a fim de avaliar a influência da variação de cada parâmetro, e assim, determinar o procedimento de ensaio mais indicado para testes de MRD no modelo de disjuntor utilizado.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e contribuições, além de propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, uma fundamentação teórica é apresentada para auxiliar o leitor no entendimento do tema proposto, fornecendo informações sobre disjuntores de alta tensão, câmaras de extinção e métodos de monitoramento, com ênfase no monitoramento através da medição de resistência de contato, foco desta pesquisa.

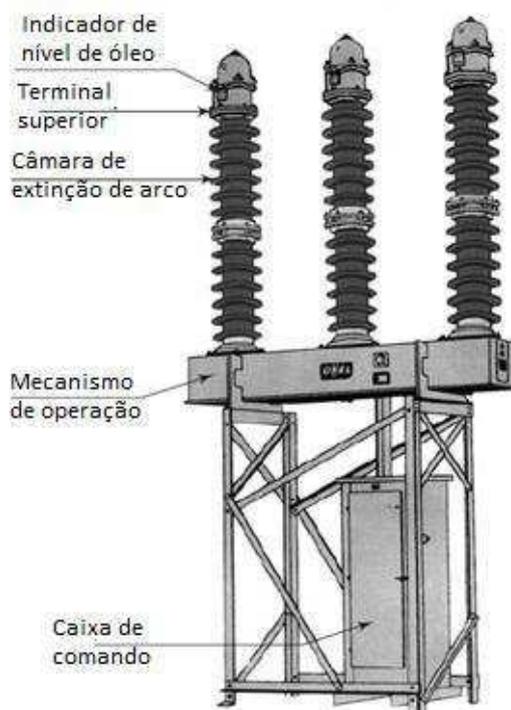
2.1. DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Os disjuntores são dispositivos de proteção eletromecânicos cuja principal função é a interrupção de correntes de falhas, em especial as correntes provenientes de curto-circuito na rede elétrica. Os disjuntores devem ser capazes de interromper correntes de falhas no menor tempo possível, independentemente da quantidade de tempo que permaneceram sem operar, de modo a limitar os efeitos de degradação dos seus contatos, bem como para controlar o tempo de duração da falta (GARZON, 2002). Além disso, os disjuntores devem ser capazes de estabelecer e interromper a corrente nominal ou inferior, e de isolar trechos da rede elétrica quando na posição aberta.

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

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

Figura 2.1: Ilustração de um disjuntor tipo PVO.



Fonte: (BHEL, 2006).

Os disjuntores em operação devem satisfazer as seguintes condições:

- Abrir e fechar o circuito no menor tempo possível;
- Conduzir e suportar termicamente a corrente de carga do sistema;
- Suportar térmica e mecanicamente a corrente de curto-circuito do sistema por um determinado tempo, de acordo com as especificações do fabricante;
- Isolar a tensão do sistema, em relação ao terra e entre seus pólos;
- Possuir resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações geradas durante as operações de fechamento e abertura.

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

Os disjuntores de alta tensão são constituídos por três componentes principais:

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

Os disjuntores são classificados usando 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.

Quanto às características de construção, há duas categorias de disjuntores: uma onde a câmara de extinção é metálica e aterrada ("*deadtank*"), e outra onde a câmara é isolada do terra ("*livetank*").

Os arcos elétricos se formam a partir dos gases ionizados entre os contatos já separados (MCDONALD, 2003). Desse modo, a recuperação dielétrica do meio deve ocorrer o mais rápido possível, de modo a extinguir o arco elétrico formado entre os contatos.

2.2. TIPOS DE DISJUNTORES

Os disjuntores são classificados de acordo com o princípio utilizado para interromper os arcos elétricos nas suas câmaras de extinção. Nesta seção serão apresentados os tipos de disjuntores.

2.2.1. DISJUNTORES A ÓLEO

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

O óleo mineral atua no sentido de extinguir o arco elétrico de duas formas: alongando o arco através de um defletor, fazendo com que o arco seja interrompido na passagem da corrente pelo zero, e promovendo o resfriamento do arco.

Durante as operações de interrupção de corrente em um disjuntor a óleo, as altas temperaturas geradas pela formação de arcos elétricos provocam a decomposição do óleo isolante. Dentre os vários tipos de gases em que o óleo se decompõe, o hidrogênio é o principal responsável pela extinção do arco elétrico, pois suas propriedades refrigerantes contribuem para retirar o calor do arco.

A decomposição do óleo isolante também produz resíduos condutores a base de carbono, comprometendo suas características dielétricas. Desse modo, o óleo precisa ser recuperado após um certo número de interrupções de curto-circuito. Além disso, a fim de evitar o acúmulo destes resíduos próximo aos contatos, as câmaras de extinção de disjuntores a óleo não devem ser instaladas na posição horizontal.

Os disjuntores a óleo são divididos em duas categorias:

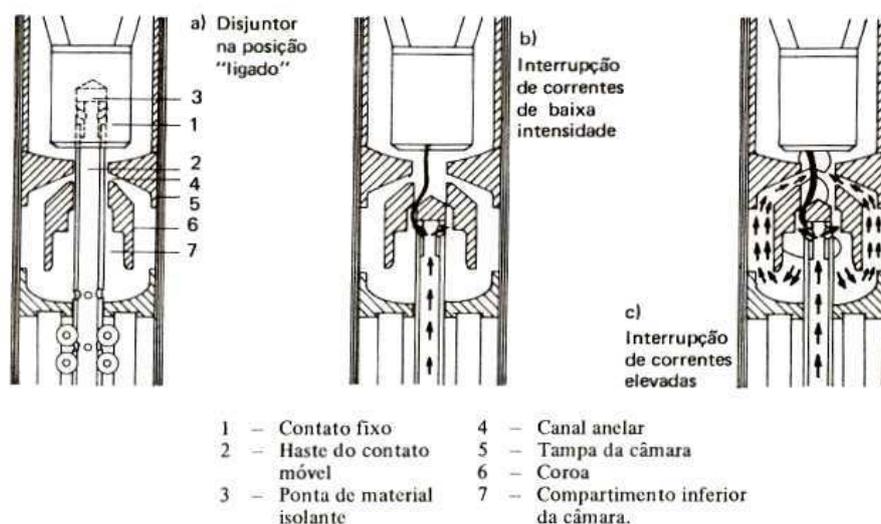
- Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO)
- Disjuntores a grande volume de óleo (GVO)

Os disjuntores GVO possuem alta capacidade de interrupção em curto-circuito e são utilizados em sistemas de média e alta tensão (até 230 kV), no entanto, por serem tecnicamente ultrapassados e a dificuldade de manutenção, vêm sendo substituídos por disjuntores com tecnologias mais eficientes.

Os disjuntores PVO foram projetados como uma evolução dos disjuntores GVO, onde o volume de óleo foi consideravelmente reduzido e as câmaras de extinção projetadas com sistemas de fluxo de óleo forçado, aumentando a eficiência no processo de interrupção de corrente. São relativamente leves e compactos, de fácil manutenção e usualmente são utilizados em sistemas de média tensão.

Na Figura 2.2 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor PVO, bem como das etapas de extinção de arco elétrico.

Figura 2.2: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor PVO e das etapas de extinção de arcos elétricos.



Fonte: (FERREIRA, 2006).

2.2.2. DISJUNTORES A VÁCUO

De acordo com a teoria de Townsend, o processo de formação de ruptura em determinado espaço depende da movimentação de partículas carregadas. Sendo assim, na ausência de partículas, tal como no caso de um vácuo perfeito, não deveria haver condução. No entanto, na prática, uma tensão suficientemente elevada pode provocar uma ruptura (BRAITHWAITE, 2000).

Na literatura, diversas teorias envolvendo o mecanismo de formação de arcos elétricos no vácuo elevado foram propostas. Algumas teorias assumem que uma partícula carregada pode ser emitida de um eletrodo sob a ação de um alto campo elétrico. Ao atingir o outro eletrodo, uma partícula carregada com carga oposta é liberada. As partículas liberadas são aceleradas por um campo elétrico elevado, dando origem a uma reação em cadeia que provoca o processo de ruptura.

Outras teorias assumem que existem imperfeições na superfície dos eletrodos, como micro-saliências, pontas salientes ou partículas fracamente agregadas. Tais imperfeições promovem a liberação de partículas que, combinadas com o campo elétrico elevado, dão origem ao processo de ruptura.

Em disjuntores a vácuo, os contatos elétricos ficam localizados no interior de uma ampola com elevado nível de vácuo. Apesar da quase inexistência de íons positivos e elétrons, ainda existe a formação de arcos elétricos. Isto ocorre devido à evaporação

de partículas metálicas dos contatos durante as operações de interrupção de corrente, fornecendo um meio para formação do processo de ionização. Mesmo assim, a duração dos arcos é muito pequena, visto que a intensidade da nuvem de vapor metálico é proporcional a intensidade da corrente de arco, desse modo, correntes de baixa intensidade não são suficientes para manter a descarga, sendo interrompidas antes da passagem por zero.

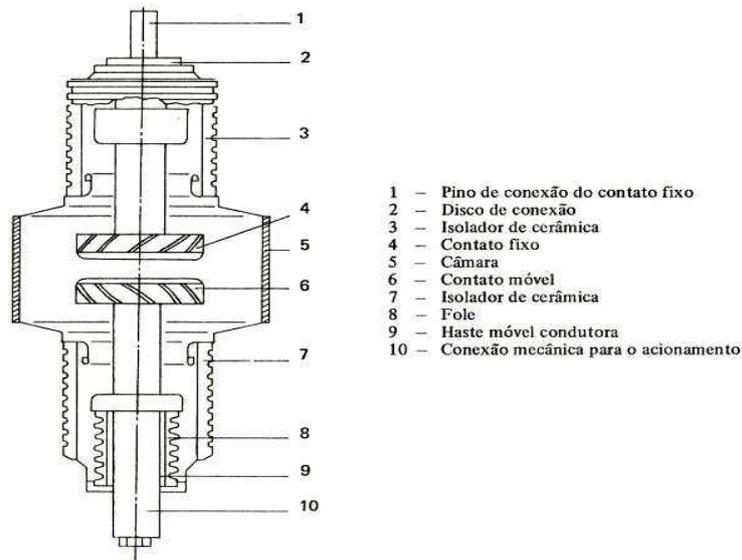
Os vapores metálicos formados na ampola de vácuo são altamente condutivos, gerando uma tensão de arco muito pequena, de tal forma que a energia liberada quase não causa desgaste no material dos contatos, visto que quando o arco elétrico é extinto, o vapor metálico rapidamente se condensa na superfície dos contatos, restabelecendo a rigidez dielétrica.

A curta duração dos arcos elétricos e a pequena quantidade de energia liberada durante os processos de interrupção de corrente explicam a elevada expectativa de vida dos contatos elétricos de disjuntores a vácuo. Além disso, uma das principais vantagens dos disjuntores a vácuo é que os mesmos não requerem manutenções.

Os contatos de disjuntores a vácuo geralmente são fabricados a partir de ligas de CuBi, CuCr ou CuAr. Sendo o CuCr o material com as melhores características para níveis de corrente de 8 até 63 kA (BHEL, 2006). Disjuntores a vácuo vêm sendo utilizados cada vez mais em sistemas de média tensão, e até mesmo, em alguns casos, em sistemas acima de 52 kV.

Na Figura 2.3 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a vácuo.

Figura 2.3: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a vácuo.



Fonte: (FERREIRA, 2006).

2.2.3. DISJUNTORES A SF₆

O hexafluoreto de enxofre (SF₆) é um gás isolante, inerte, não inflamável e que possui ótimas propriedades refrigerantes. Tais características o torna ideal para a fabricação de equipamentos elétricos de alta capacidade e desempenho. Além disso suas propriedades isolantes permitem o desenvolvimento de equipamentos mais compactos e seguros .

O SF₆ é um dos gases de maior peso molecular que existem (cerca de 5 vezes mais pesado que o ar) e é fabricado em laboratório. É inodoro e incolor, dificultando a detecção de vazamentos. Em pressão atmosférica, o SF₆ possui rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que a do ar (D'AJUZ *et al*, 1985).

A principal característica do SF₆ que permite sua utilização como gás isolante é a sua alta eletronegatividade, ou seja, sua capacidade de absorver elétrons livres de modo a formar íons negativos, o que dificulta o processo de ionização formador dos arcos elétricos.

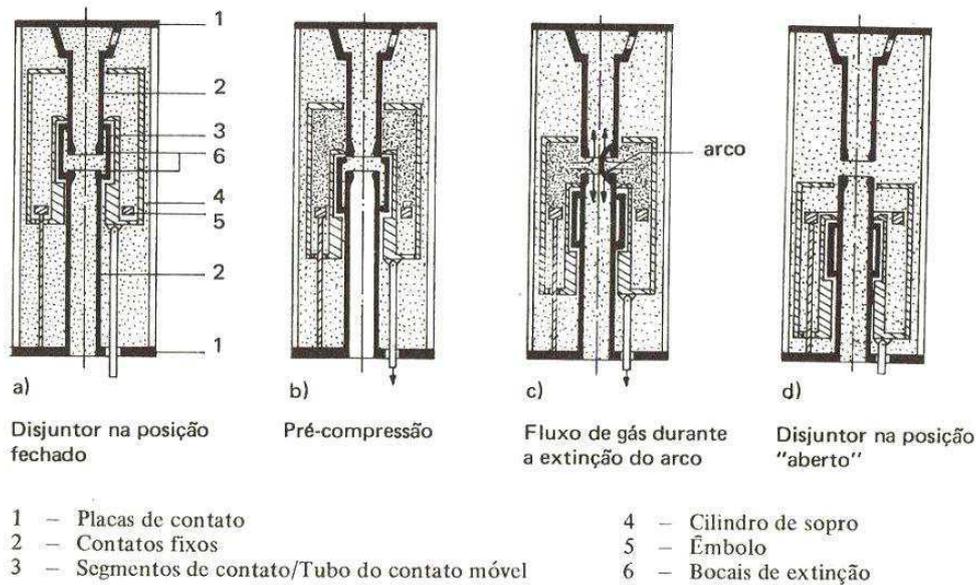
A decomposição do SF₆ devido à formação de arcos elétricos produz vários tipos de gases, e alguns deles são corrosivos. Sendo assim, um dos principais problemas relacionados a fabricação de disjuntores a SF₆ é a escolha da tecnologia e dos materiais ao serem empregados em contato com o gás.

Uma das grandes vantagens dos disjuntores a SF₆ é que eles requerem pouca manutenção, pois os componentes em que o gás se decompõe durante as interrupções de corrente não são condutores.

Existem dois tipos de tecnologias empregadas nas câmaras de extinção de disjuntores a SF₆. Os modelos mais modernos utilizam um sistema de pressão única, em que o gás é impulsionado na direção do arco elétrico pela própria movimentação dos contatos. Os modelos mais antigos utilizam um sistema de dupla pressão, em que a câmara de extinção é dividida em duas partes, uma em baixa pressão onde ficam os contatos fixo e móvel, e outra em alta pressão selada por uma válvula, de modo que, quando a válvula se abre, o gás é impulsionado na direção do arco elétrico (FRONTIM *et al*, 2013).

Na Figura 2.4 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a SF₆, bem como das etapas de extinção de arco elétrico.

Figura 2.4: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a SF₆ e das etapas de extinção de arcos elétricos



Fonte: (FERREIRA, 2006).

Os disjuntores a SF₆ também apresentam certas desvantagens, como o alto custo do gás e do sistema de monitoramento de pressão, necessário para garantir que o mesmo mantenha o nível de rigidez dielétrica desejável. Além disso, o fato de que as moléculas do gás se encontram mais próximas, devido à compressão do SF₆, faz com que as

frequências de oscilação relacionadas aos fenômenos transitórios durante a operação do disjuntor (TRT) sejam mais elevadas.

2.2.4. DISJUNTORES A AR COMPRIMIDO

Nos disjuntores a ar comprimido, o ar é utilizado tanto para a extinção dos arcos elétricos como para a isolação interna do disjuntor. Para tal propósito, ele necessita ser mantido em alta pressão. Um jato de ar, com velocidade proporcional à pressão em que é mantido, é propelido na direção do arco elétrico (em geral, transversalmente), promovendo a extinção do arco a partir do seu resfriamento. Em alguns casos, o ar também é utilizado como mecanismo de acionamento dos contatos (CARVALHO *et al*, 1995).

Os disjuntores a ar comprimido possuem um reservatório que fornece o ar para a extinção de arco, onde o ar é mantido a uma pressão de aproximadamente cinco ou seis vezes maior que a pressão do ar no interior da câmara de extinção de arco. Para estes equipamentos, a extinção do arco é independente da corrente a ser interrompida, e o tempo de interrupção é da ordem de 2 ciclos (GREMMEL, 2002; D'AJUZ *et al*, 1985).

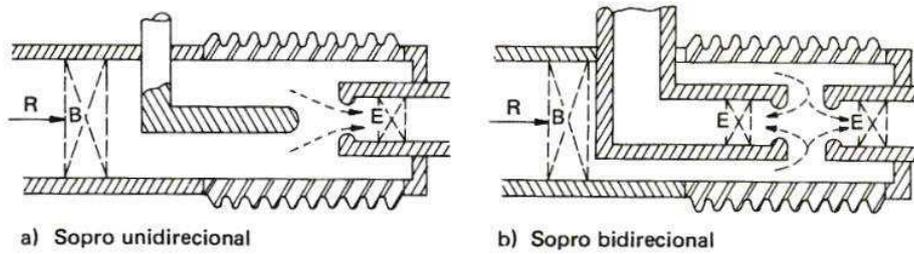
Como o próprio ar é utilizado como mecanismo de extinção de arcos, a poluição no interior da câmara de extinção é baixa. Portanto, disjuntores a ar comprimido demandam pouca manutenção. No entanto, um sistema de monitoramento do sistema de compressão de ar deve ser implementado para garantir que a isolação e a capacidade de interrupção de corrente não sejam comprometidas.

Apesar de utilizarem o ar como meio isolante e extintor, os disjuntores a ar comprimido não são baratos, visto que, para manter o gás em alta pressão, é necessária a instalação de esquemas de controle e sistemas de compressão que elevam o custo do equipamento. Além disso, caso o disjuntor não seja instalado em um local remoto, o alto nível de ruído sonoro gerado durante as operações de interrupção faz com que seja necessário o uso de supressores de ruído.

Existem duas técnicas utilizadas para promover a extinção do arco elétrico em disjuntores a ar comprimido: sopro unidirecional (*monoblast*) e sopro bidirecional (*duoblast*), sendo esta última a mais eficiente e mais utilizada atualmente (FRONTIM *et al*, 2013).

Na Figura 2.5 são apresentadas ilustrações dos tipos de câmara de extinção de um disjuntor a ar comprimido.

Figura 2.5: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a ar comprimido.



- R – Suprimento de ar comprimido
 E – Válvulas de escape (jusante)
 B – Válvulas de sopro (montante)

Fonte: (D'AJUZ *et al*, 1985).

2.2.5. DISJUNTORES A SOPRO MAGNÉTICO

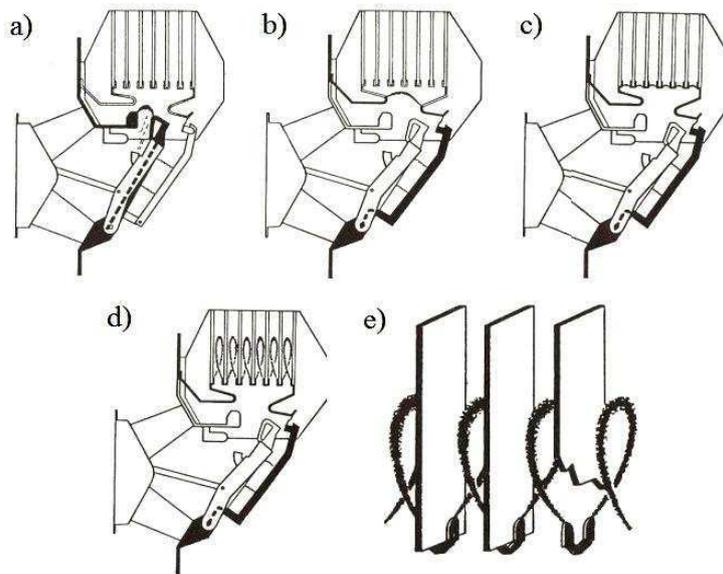
Nos disjuntores a sopro magnético, os contatos abrem e fecham no ar em pressão atmosférica. Devido ao seu tipo de construção, os disjuntores a sopro magnético são de uso restrito a aplicações de baixa tensão (até 24 kV), instalações de alta segurança ou sistemas industriais (ARAÚJO, 2001).

Nas suas câmaras de extinção, os disjuntores a sopro magnético possuem várias lâminas metálicas com o propósito de dividir e resfriar o arco elétrico, facilitando a desionização e a extinção do arco. Nestes equipamentos, as forças que impelem o arco elétrico para dentro das fendas da câmara de extinção são geradas pela presença de um intenso campo magnético das lâminas metálicas ou, eventualmente, por um sopro pneumático auxiliar produzido pelo mecanismo de acionamento. O arco é resfriado como consequência do seu alongamento em contato com as paredes da câmara (ARAÚJO, 2001).

Devido ao princípio utilizado na extinção dos arcos elétricos, os disjuntores a sopro magnético possuem um tempo de extinção de arco muito grande em relação a outros tipos de disjuntores, o que explica a sua limitação de uso em sistemas de baixa tensão.

Na Figura 2.6 é apresentada uma ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético, bem como das etapas de extinção de arco.

Figura 2.6: Ilustração da câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético e das etapas de extinção de arcos elétricos.



Fonte: (FERREIRA, 2006).

2.3. CÂMARAS DE EXTINÇÃO

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

A câmara de extinção deve ser capaz de resistir aos esforços dielétricos, bem como aos esforços térmicos e mecânicos provenientes do arco elétrico, proporcionando condições favoráveis à extinção do arco. Além disso, a câmara e seus componentes devem ser projetados para suportar as solicitações químicas, que podem deteriorar os componentes internos e as juntas de vedação, dando origem a vazamentos do meio isolante.

Durante as operações de interrupção de corrente, uma tensão de alta frequência (na ordem de kHz) surge entre os contatos do disjuntor, conhecida como tensão de restabelecimento transitória (TRT), que pode atingir valores de pico várias vezes superiores a tensão do sistema em que o disjuntor está operando.

A TRT traz consigo a tendência de reignição do arco elétrico, seja por ruptura do dielétrico ou mesmo por reignição térmica, portanto, o disjuntor deve ser capaz de resfriar e recuperar o meio no interior da sua câmara de extinção mais rápido que o crescimento da TRT, além disso a rigidez dielétrica na câmara de extinção deve ser

capaz de suportar as solicitações impostas pelos valores de pico atingidos pela TRT. O grau de solicitação que a TRT pode causar depende não apenas do seu valor de pico, mas também da sua taxa de crescimento (TCTRT). Faltas nos terminais do disjuntor geram as maiores amplitudes da TRT e faltas distantes do disjuntor (quilométricas) causam maiores TCTRT.

O fechamento dos pólos do disjuntor ocorre no interior da câmara de extinção. O disjuntor se encontra na posição fechada quando há 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.

Os contatos fixo e móvel apresentam duas regiões distintas, denominadas de contato principal e contato de arco. 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 para seccionamento do circuito. Quando os contatos já se encontram galvanicamente separados, a corrente de arco circula entre os contatos de arco dos contatos fixo e móvel, até a extinção total do arco elétrico.

O processo de concepção dos contatos elétricos é bastante complexo, uma vez que a combinação de materiais e geometria deve ser otimizada, de modo a obter excelentes características elétricas e mecânicas. Além disso, uma análise técnica e econômica deve ser feita, considerando as fases de fabricação e manutenção.

Os contatos utilizados no circuito seccionador dos disjuntores devem ser capazes de suportar o calor gerado pela corrente de carga, e principalmente pelo arco elétrico, sem apresentar degradação excessiva. Além disso, eles precisam ter boas propriedades de condução, de forma a apresentar baixa resistência elétrica, quando o disjuntor se encontra na posição fechada (GARZON, 2002).

No que se refere à geometria, os contatos móveis geralmente são construídos em forma de haste sólida, que pode ser oca ou não, que se desloca durante a abertura e fechamento. O contato fixo, que permanece imóvel, é formado por uma carcaça cilíndrica com dedos de contato, que têm por objetivo melhorar o contato galvânico entre os contatos fixo e móvel, sendo a pressão em cada dedo do contato exercida por molas. Para evitar a queima excessiva dos dedos de contato durante o arco elétrico, o contato fixo é formado por um anel de arco.

Os contatos também devem possuir uma geometria que facilite a remoção dos subprodutos neles depositados, provenientes de gases e partículas dos contatos formadas em virtude do arco elétrico. Os subprodutos podem diminuir os níveis de isolamento interna provocando reignições do arco durante a abertura dos contatos em baixas correntes (PONS *et al*, 1993). Além disso, podem formar uma camada isolante no contato aumentando a resistência entre os contatos na posição fechada (NASRALLAH *et al*, 2007).

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.

2.4. MANUTENÇÃO EM DISJUNTORES

Assim como qualquer outro equipamento do sistema elétrico, os disjuntores, desde a sua instalação, sofrem com a deterioração dos seus componentes. Portanto, caso não sejam submetidos a um monitoramento e a manutenções periódicas, o alto nível de deterioração pode ocasionar falhas elétricas e avarias no próprio disjuntor e nos equipamentos protegidos por ele.

Em condições ideais, as técnicas de monitoramento devem possibilitar que desmontagens desnecessárias sejam evitadas. Durante as etapas de desmontagem e remontagem, novos problemas podem surgir, como a introdução de impurezas no óleo ou a danificação de juntas de vedação, tornando o disjuntor susceptível a falhas de operação, conseqüentemente reduzindo a confiabilidade do sistema elétrico.

A função da manutenção é assegurar aos equipamentos um elevado grau de disponibilidade e confiabilidade durante o desempenho de suas funções. 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).

Geralmente, os disjuntores seguem um padrão de manutenção cuja periodicidade é determinada com base no número de manobras efetuadas ou no tempo de serviço do equipamento.

As técnicas de monitoramento devem ser capazes de produzir dados precisos para o correto diagnóstico do estado do disjuntor, tanto em relação a parte elétrica como

a parte mecânica. Durante as inspeções/manutenções, os seguintes parâmetros são avaliados:

- Tempo de fechamento dos contatos;
- Tempo de abertura dos contatos;
- Sincronização de abertura dos contatos;
- Vibração durante as operações de abertura e fechamento;
- Operação dos circuitos de comando;
- Resistência dos contatos.

Um programa de manutenção bem definido e corretamente implementado 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 material.

A frequência da realização de inspeções/manutenções em disjuntores pode aumentar de acordo com a presença dos seguintes fatores (GILL, 2008):

- Atmosfera agressiva (presença de elementos que favoreçam a oxidação dos equipamentos);
- Temperatura ambiente alta;
- Excesso de poeira, sujeira ou fuligem;
- Umidade alta;
- Equipamentos mais antigos;
- Alta frequência de interrupção de falhas.

Dependendo do diagnóstico fornecido pelas técnicas de monitoramento, alguns serviços de manutenção podem ser necessários, neste caso, o disjuntor é submetido a uma rotina de ajustes ou reparos, e posteriormente é submetido a novos ensaios para verificar se os defeitos foram corrigidos.

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

2.2.1. AVALIAÇÃO DO MEIO ISOLANTE

Os disjuntores possuem um meio dielétrico com a função de promover o isolamento entre suas partes energizadas e a terra e entre os pólos, e um meio dielétrico com a função de promover a extinção dos arcos elétricos, conhecidos como meio isolante e meio extintor, respectivamente.

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

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

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

- Teste de rigidez dielétrica do óleo mineral isolante;
- Verificação da pressão do gás (SF_6 ou ar comprimido);
- Análise físico química para detecção de agentes contaminantes;
- Verificação da concentração de gases dissolvidos no óleo mineral isolante a partir de uma análise cromatográfica.

2.4.2. AVALIAÇÃO DA PARTE MECÂNICA

O sistema de acionamento de um disjuntor é responsável pelo armazenamento e liberação da energia necessária para as suas operações de abertura e fechamento. A grande quantidade de detalhes construtivos o torna umas das partes mais complexas do disjuntor. Sendo assim, o grau de confiabilidade do disjuntor está diretamente relacionado com o estado operativo do seu sistema de acionamento.

Sistemas de acionamento podem ser monoplares ou tripolares. Nos monoplares, o acionamento de cada pólo é feita individualmente, tornando o sistema mais caro e complexo. Já nos sistemas tripolares, o acionamento dos três pólos é efetuada simultaneamente.

Os principais tipos de sistemas de acionamento são:

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

Os principais teste realizados para avaliar a parte mecânica de disjuntores são:

- Medição do tempo de abertura dos contatos;
- Medição do tempo de fechamento dos contatos;
- Verificação da sincronização de operação dos contatos;
- Testes de vibração durante as operações de abertura e fechamento.

2.4.3. AVALIAÇÃO DOS CONTATOS

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

O desgaste dos contatos de disjuntores é algo normal e previsível. Este processo se dá início assim que o equipamento é colocado em operação. Contatos com nível de degradação muito elevado podem comprometer o desempenho do disjuntor, limitar sua capacidade de interrupção de corrente e causar falhas de operação (MCDONALD, 2003). Sendo assim, um monitoramento sistemático destes componentes deve ser realizado.

As causas do desgaste de contatos de disjuntores são:

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

Dentre as três causas supracitadas, os arcos elétricos são reconhecidos como a causa mais significativa.

A resistência elétrica dos contatos, que idealmente deveria ser zero, vai aumentando a medida que eles vão se desgastando. Por este motivo, as principais técnicas destinadas a verificar o grau de degradação dos contatos se baseiam na medição de resistência. Dependendo da fabricação dos contatos, também é possível que a degradação provoque uma erosão dos contatos, de tal forma a reduzir o seu comprimento.

2.5. MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CONTATO EM DISJUNTORES

Um dos principais componentes dos disjuntores são os contatos fixos e móveis, visto que são eles os responsáveis pela condução da corrente elétrica em condições normais ou adversas do sistema. Apesar de serem projetados com uma geometria e com materiais que apresentam boa resistência aos efeitos do arco elétrico, os contatos ainda sofrem com um inevitável processo de degradação, que se dá início desde a instalação do disjuntor.

O principal fator contribuinte para a degradação dos contatos são os arcos elétricos (PANCU *et al*, 2009). O desgaste dos contatos resulta em um aumento da resistência elétrica entre os mesmos, portanto, as principais técnicas utilizadas para diagnosticar o estado dos contatos se baseiam na medição de resistência. Valores anormais de resistência podem ser um indicativo da existência de algum material estranho na superfície dos contatos, do desgaste excessivo dos contatos, da perda de pressão nos dedos dos contatos ou da perda de conexão das buchas. Qualquer um destes problemas pode ocasionar o surgimento de um ponto quente, o desgaste acelerado dos contatos ou até mesmo a falha do disjuntor.

Nos tópicos a seguir são descritas as técnicas de diagnóstico por medição de resistência estática de contato e por medição de resistência dinâmica de contato.

2.5.1. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ESTÁTICA DE CONTATO (MRE)

Atualmente a MRE é utilizada pelas concessionárias de energia para avaliar o estado dos contatos de disjuntores. A técnica é aplicada periodicamente e é tomada como base para decisões sobre a realização de operações de desmontagem e limpeza.

O ensaio de MRE é implementado com a injeção de um sinal de corrente contínua através dos contatos principais do disjuntor e medindo-se a queda de tensão

sobre os mesmos, sem a necessidade de remoção do meio isolante da câmara de extinção de arco (GILL, 2008). A resistência é calculada mediante a aplicação direta da Lei de Ohm.

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

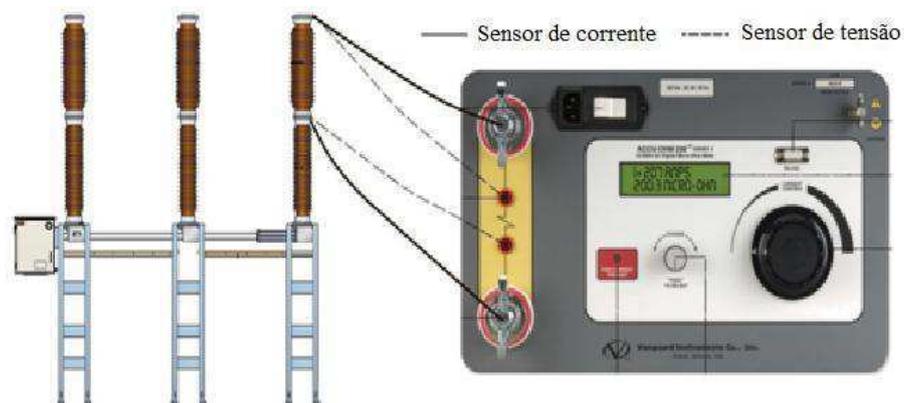
Algumas normas padronizam o nível de corrente que deve ser utilizado nos ensaios de resistência de contato. De acordo com a norma IEC, a resistência de contato deve ser medida com uma corrente de teste mínima de 50 A. A norma ANSI determina que a corrente de ensaio deve ser de no mínimo 100 A.

Para tomada de decisão sobre a troca dos contatos, os valores de resistência medidos devem ser comparados com os valores limite recomendados pelos fabricantes, com os valores das outras fase do disjuntor sobre ensaio ou com os valores de disjuntores similares.

Geralmente, os ensaios de MRE são implementados com o auxílio de analisadores de disjuntor, que possuem um microohmímetro incorporado. A medição é feita individualmente em cada pólo do disjuntor.

O sensores do microohmímetro são conectados de acordo com a ilustração apresentada na Figura 2.7.

Figura 2.7: Ilustração de um esquema de medição da resistência estática de contato com um microohmímetro (ABB, 2009), (VANGUARD, 2010).



Fonte: (ABB, 2009), (VANGUARD, 2010).

A MRE é realizada com os contatos completamente fechados, portanto, só há contato galvânico entre os contatos principais. Desse modo, a técnica só é capaz de avaliar o estado dos contatos principais. Como consequência, diagnósticos incorretos

podem ser gerados, já que baixos valores de resistência não implicam, necessariamente, contatos em bom estado.

2.5.2. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DINÂMICA DE CONTATO (MRD)

Com o objetivo de se obter dados mais concisos para produzir um diagnóstico mais preciso sobre o estado dos contatos de disjuntores, pesquisas vêm abordando a aplicação da MRD na avaliação dos contatos de disjuntores de alta tensão.

O ensaio de MRD é bastante semelhante ao ensaio de MRE, no entanto, ao invés de se medir apenas um valor de resistência, a resistência é determinada durante o processo de abertura dos contatos, resultando em uma curva de resistência R (Ω) em função do tempo de abertura (s) ou da distância dos contatos (mm).

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

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

A MRD pode ser realizada tanto no fechamento quanto na abertura dos contatos do disjuntor, entretanto, as medições não apresentam bons resultados durante operações de fechamento, visto que a corrente contínua existente no momento do contato galvânico dos contatos de arco gera um ruído indesejável, que compromete os resultados (LANDRY *et al*, 2008; LANDRY *et al*, 2006).

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

2.6. FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

Nesta seção serão descritos os métodos estatísticos utilizados para fazer a análise dos resultados obtidos nos ensaios de MRD.

2.6.1. COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2)

Idealmente, todas as curvas de resistência resultantes de ensaios de MRD com uma mesma configuração de ensaio (combinação de amostra de contatos, corrente de ensaio e velocidade de abertura dos contatos) deveriam ser idênticas. No entanto, devido às vibrações mecânicas durante as medições, à formação de películas de óleo na superfície dos contatos e outras fontes de interferência, existe uma certa diferença entre as curvas, que pode ser ampliada dependendo dos parâmetros de ensaio, como a corrente de teste e a velocidade de abertura dos contatos.

Para avaliar a reprodutibilidade dos resultados, ou seja, a proximidade das curvas de resistência, o coeficiente de determinação, também conhecido como R^2 , foi utilizado como uma medida para determinar o quanto cada uma das curvas se assemelha da curva de referência.

Para cada conjunto com n curvas, obtido para cada configuração de ensaio, as seguintes etapas foram seguidas para selecionar a curva de referência:

- Foram calculados os valores médios de cada curva de resistência: $R_{M1}, R_{M2}, \dots, R_{Mn}$;
- Foi calculada a média dos valores obtidos na etapa anterior: $R_{Média}$;
- A curva de referência foi escolhida como aquela cujo valor médio ($R_{M?}$) mais se aproxima de $R_{Média}$.

A definição geral do coeficiente de determinação é dada pela equação (1) (DUFOUR, 2011).

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

Sendo a soma dos quadrados dos resíduos (SQ_{res}) e a soma total dos quadrados (SQ_{tot}) dadas, respectivamente, pelas equações (2) e (3).

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n [r_o(i) - r_r(i)]^2 \quad (2)$$

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n [r_o(i) - r_m]^2 \quad (3)$$

Onde: n = Número de ponto em cada curva;

r_r = Curva de referência (Ω);

r_o = Curva observada (Ω);

r_m = Valor médio de r_r (Ω).

Por definição, o coeficiente de determinação pode variar entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 for o R^2 , mais semelhante é a curva observada em relação a curva de referência.

2.6.2. ERRO PERCENTUAL ABSOLUTO MÉDIO (EPAM)

Quando as curvas de resistência são muito diferentes umas das outras, é possível que o R^2 tenha um valor negativo, visto que o SQ_{res} pode ser maior que o SQ_{tot} . Nestes casos, o erro percentual absoluto médio (EPAM) foi utilizado para fazer a comparação entre as curvas.

O EPAM é média de todos os erros absolutos percentuais, fornecendo uma indicação do tamanho médio do erro, expresso como uma porcentagem do valor observado, independentemente do erro ser positivo ou negativo.

O EPAM é definido pela equação (4) (MACHADO, 2009).

$$EPAM = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - E_i}{O_i} \right| \quad (4)$$

Onde: n = Número de valores;

E = Valor esperado (Ω);

O = Valor Observado (Ω).

Neste capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica contendo informações referentes a disjuntores de alta tensão, seus aspectos construtivos e atividades de manutenção, além das ferramentas estatísticas utilizadas para interpretar os resultados obtidos nesta pesquisa. No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos encontrados na literatura relacionados a aplicação da MRD no diagnóstico de disjuntores.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados de pesquisas e estudos de caso reportados na literatura que abordam o monitoramento e diagnóstico do estado operativo dos contatos de disjuntores por meio da medição de resistência dinâmica de contato (MRD).

No artigo de Ohlen *et al* (1995) são descritos os pioneiros no estudo da aplicação da MRD na análise da condição dos contatos de disjuntores. Os autores afirmam que, nos ensaios de MRD, a utilização de altas correntes de teste são mais viáveis para reprodução da condição dos contatos. Além disso, as curvas de resistência obtidas durante operações de abertura dos contatos do disjuntor representam mais precisamente o estado real dos contatos do que as curvas obtidas durante operações de fechamento, visto que os saltos mecânicos provenientes do atrito entre os contatos podem provocar erros de medição. No procedimento de diagnóstico desenvolvido por Ohlen *et al* (1995), o grau de degradação dos contatos é determinado através do comprimento dos contatos de arco, que pode ser obtido a partir das curvas de MRD.

Apesar de fornecer resultados significativos quanto à aplicação da MRD na avaliação de disjuntores, o estudo desenvolvido por Ohlen *et al* (1995) não apresenta resultados conclusivos, visto que, dependendo do modelo do disjuntor, os contatos de arco podem atingir um elevado grau de degradação sem diminuição significativa do seu comprimento. Além disso, o estudo não relatou análises de casos com graus intermediários de degradação de contato, limitando-se apenas a casos com graus de degradação extremos, para os quais o comprimento do contato de arco estava visivelmente fora do padrão, facilitando a interpretação dos resultados. O estudo também não adotou modelagens matemáticas para analisar as curvas de MRD.

Landry *et al* (2006) desenvolveram uma nova metodologia para ensaios de MRD. Os autores sugerem que os ensaios de MRD devem ser realizados com redução na velocidade de abertura dos contatos, o que fornecerá resultados mais precisos que os ensaios realizados em velocidade nominal. Foi observado que os ensaios realizados em velocidade nominal fornecem curvas de MRD com muitos picos, dificultando a

identificação do instante de separação dos contatos principais. O método proposto por Landry *et al* (2006) se destaca por permitir uma fácil interpretação dos resultados do ensaio de MRD, utilizando a área sob a curva de MRD como parâmetro de avaliação para correlacioná-la com o estado de degradação dos contatos. O método propõe a utilização de uma corrente de teste de no mínimo 100 A, colocando-o de acordo com as normas ANSI C37.09 e IEC62271-1.

Landry *et al* (2008) estudaram a aplicação da MRD no diagnóstico de contatos de disjuntores a SF₆. Os autores propuseram novos procedimentos de ensaio baseados no método desenvolvido por Landry *et al* (2006), onde o ajuste da corrente de teste e da velocidade de abertura dos contatos nos ensaios de MRD de acordo com a suscetibilidade dos disjuntor à formação de fluoretos metálicos na superfície dos contatos. Os autores afirmam que a presença de fluoretos metálicos nos contatos, algo comum em disjuntores a SF₆, pode resultar em erros de diagnóstico, visto que os valores de resistência medidos serão maiores que a resistência dos contatos.

A partir dos resultados obtidos, Landry *et al* (2008) formularam os seguintes procedimentos de ensaio para o disjuntor a SF₆ analisado:

- Para disjuntores suscetíveis à formação de fluoretos metálicos nos contatos, a MRD deve ser realizada em velocidade nominal de abertura dos contatos, precedida pelo aquecimento dos contatos com a aplicação de uma corrente de 2.800 A, por pelo menos 15 minutos, com o objetivo de provocar a evaporação dos fluoretos metálicos, bem como de sucessivas operações de abertura e fechamento para limpeza dos contatos de arco;
- Para disjuntores não suscetíveis à formação de fluoretos metálicos nos contatos e para os quais a operação de abertura dos contatos pode ser realizada em baixa velocidade, a MRD deve ser executada em baixa velocidade, conforme sugerido por Landry *et al*. (2006);
- Para disjuntores não suscetíveis à formação de fluoretos metálicos nos contatos e para os quais a operação de abertura dos contatos não pode ser realizada em baixa velocidade, a MRD deve ser executada em velocidade nominal de abertura com aplicação de corrente de pelo menos 700 A.

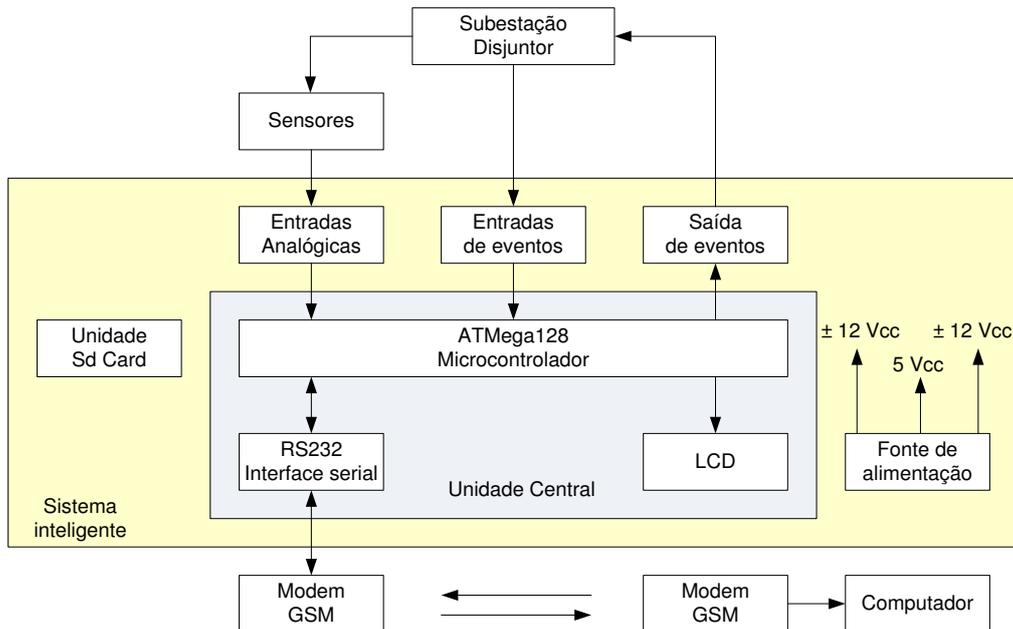
O método de ensaio de MRD proposto por Landry *et al* (2008) apresenta como principal vantagem a mitigação dos efeitos dos fluoretos metálicos que se formam nas

superfícies dos contatos de disjuntores. No entanto, os altos níveis de corrente recomendados para a aplicação do método inviabiliza a realização dos ensaios com analisadores de disjuntores, visto que estes equipamentos, em sua maioria, possuem um limite de 250 A. Sendo assim, se faz necessário o desenvolvimento de um sistema alternativo para realização dos ensaios de MRD.

Pancu *et al* (2009) propuseram uma modelagem matemática para estimativa do nível de erosão dos contatos a partir do volume de massa transferida dos contatos durante as operações de abertura em curto-circuito. Os autores afirmam que os principais fatores que influenciam no processo de eletroerosão dos contatos são: número de comutações; valor RMS da corrente de curto-circuito associado a cada comutação; período de duração do arco elétrico; parâmetros termofísicos dos materiais que constituem os contatos e condições ambientais as quais o disjuntor está submetido. Os pesquisadores utilizaram um microcontrolador e o programaram para estimar o número de operações do disjuntor, fazendo uso de sensores que fornecem os parâmetros necessários para o diagnóstico como dados de entrada no microcontrolador, que fornece uma estimativa do nível de erosão dos contatos, o desgaste linear do contato de arco e estimativa do número operações do disjuntor.

No estudo desenvolvido por Pancu *et al* (2009), foram formulados dois equacionamentos para determinar o número de operações seguras que o disjuntor pode executar. Um quando a corrente de curto-circuito é menor e outro quando é maior que 35% da capacidade do disjuntor. Segundo os autores, a estimativa do grau de erosão dos contatos fornecida pelo método permite indicar o momento mais propício para realizar a substituição dos contatos, garantindo um controle mais eficiente sobre a manutenção e operação dos disjuntores. Na Figura 3.1 é exibido um diagrama de blocos do sistema proposto.

Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema proposto para estimativa do nível de eletroerosão dos contatos, o desgaste linear do contato de arco e estimativa do número operações do disjuntor.

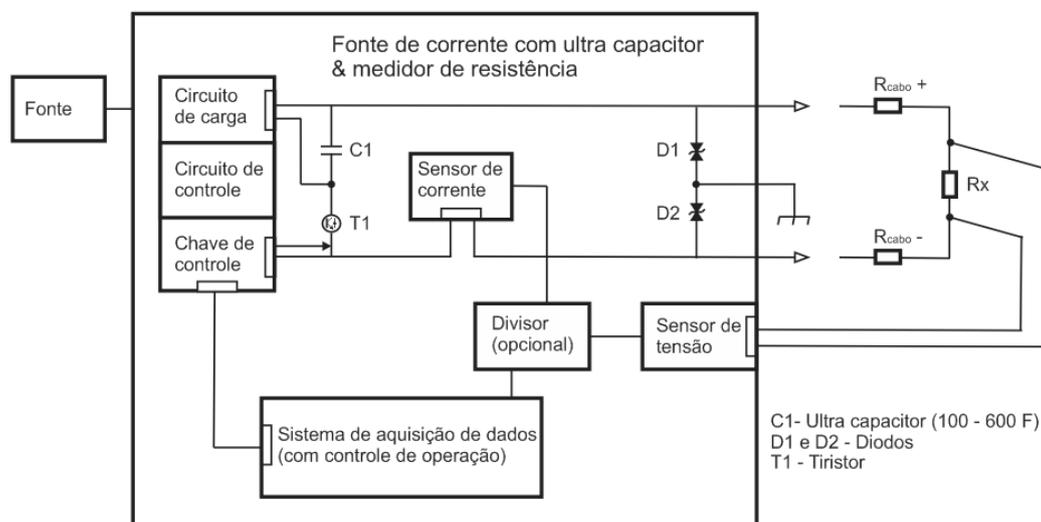


Fonte: (PANCU *et al*, 2009).

Stanisic & Neimanis (2010) desenvolveram um sistema eletrônico portátil como alternativa para medição da resistência estática ou dinâmica de contato. 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, gerando um alto nível de ruído de chaveamento que necessita ser filtrado, aumentando a complexidade do sistema de medição. Para aplicação da corrente de teste, os autores propuseram a substituição das baterias por um ultracapacitor com baixíssima resistência interna, que produziria a corrente de teste através da sua descarga.

Além do sistema de injeção de corrente, também foi desenvolvido um circuito de controle e um de aquisição de dados. O sistema proposto por Stanisic & Neimanis (2010) se destaca pela possibilidade de independência dos sistemas atualmente comercializados. No entanto, a pesquisa não apresenta resultados de ensaios de MRD, tão pouco um comparativo entre resultados de ensaios com analisadores de disjuntores comercializados, o que serviria de parâmetro para se avaliar a eficiência da aplicação do sistema. Na Figura 3.2 é apresentado um diagrama de blocos representando o sistema proposto.

Figura 3.2: Diagrama de blocos do sistema proposto para medição de baixas resistências utilizando um ultracapacitor.



Fonte: (STANISIC & NEIMANIS, 2010).

Jeyaraj & Habtay (2011) fizeram uma avaliação de algumas técnicas de análise do estado operativo dos disjuntores, destacando a necessidade de implantação de novas técnicas comprovadamente mais eficientes que as convencionais, como a MRD, a medição de capacitância dinâmica (MCD) e ensaios de vibração acústica. Os autores propuseram a aplicação da MRD associada a sensores de deslocamento para avaliar o estado operativo de disjuntores. As conclusões foram obtidas a partir dos seguintes estudos de caso:

- 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. Através da 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 400 kV, 50 Mvar, o ensaio de resistência estática resultou em valores acima do convencional. Através do ensaio da MRD resultou em uma curva fora do padrão. Através da abertura da câmara foi identificado deformação no conjunto do contato móvel e na câmara de compressão.

A partir dos resultados obtidos, Jeyaraj & Habtay (2011) concluíram que a MRD é uma técnica eficiente na avaliação de disjuntores. A técnica possibilita a realização de ensaios mais qualitativos de MRD devido aos sensores de deslocamento do contato móvel, permitindo, além da avaliação dos contatos, a avaliação da parte mecânica. Entretanto, o estudo desenvolvido limitou-se a casos de disjuntores com nível de degradação extremo, facilitando a interpretação dos resultados. Além disso, nenhum modelo matemático foi adotado para análise das curvas de MRD, sendo a tomada de decisão sobre a desmontagem do disjuntor é definida heurísticamente, com base na avaliação visual das curvas de resistência.

Sodha *et al* (2012) avaliaram a aplicação da MRD em disjuntores de alta tensão em serviço mediante alguns estudos de caso. Os autores propõem a formação de um banco de dados da MRD, contendo informações obtidas a cada intervenção, de modo a ser utilizado como referência para o disjuntor analisado, bem como para disjuntores do mesmo modelo. Os autores também destacam a importância da aplicação da MRD já durante o comissionamento da subestação. A curva de resistência resultante da primeira MRD em um disjuntor novo é denominada de “impressão digital” do disjuntor. A partir do monitoramento periódico, ter-se-ia a evolução da "assinatura" do disjuntor, que permitiria a identificação de defeitos a partir da comparação com as curvas de resistência obtidas anteriormente. Para avaliação da técnica de MRD, foram realizados quatro estudos de caso utilizando um analisador de disjuntor comercial com corrente de teste de 100 A.

- Estudo de caso 1: detectou-se a folga em um dos parafusos do sistema de acoplamento do contato móvel, algo que não foi identificado nos outros ensaios do disjuntor;
- Estudo de Caso 2: detectou-se o desgaste nos dedos do contato de arco do contato móvel;
- Estudo de Caso 3: detectou-se problemas no fechamento do contato móvel, identificando que o contato não estava fechando completamente;
- Estudo de Caso 4: detectou-se 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 Sodha *et al* (2012), a implantação da técnica seria capaz de reduzir consideravelmente a taxa de falha de disjuntores, gerando economia de recursos, pois permite evitar desmontagens desnecessárias. A tomada de decisão sobre a revisão ou inspeção interna é definida heurísticamente, com base na avaliação visual das curvas de resistência.

Souza & Costa (2014) desenvolveram um sistema alternativo para realização da MRD. O sistema proposto é capaz de aplicar uma corrente de teste de até 300 A a partir da associação em série com uma bateria estacionária com resistores de cromo-alumínio-ferro. O sistema desenvolvido é considerado de baixo custo em comparação com os microhmímetros disponíveis no mercado. Para avaliar a eficiência da técnica, um estudo de caso foi realizado em um disjuntor PVO, onde as medições foram realizadas com a aplicação de uma corrente de teste de 300 A. Foi observado que os contatos de arco identificados visualmente com um maior nível de degradação na região do contato de arco apresentaram maior área abaixo da curva de MRD, acentuadamente na região do contato de arco. Os autores afirmam que, para o disjuntor analisado, a medição de resistência dinâmica pode ser feita em velocidade nominal de abertura dos contatos com a aplicação de uma corrente de teste de 300 A. Além disso, os autores chegaram a conclusão de que a medição de resistência estática é inconclusiva para o modelo de disjuntor analisado.

Oliveira (2015) conduziu um estudo mais criterioso sobre os procedimentos adotados para ensaios de MRD em disjuntores. Na pesquisa, uma análise foi realizada a respeito da influência que os parâmetros de ensaio (corrente de teste e velocidade de abertura dos contatos) exercem sobre os resultados obtidos nos ensaios de MRD. Com este propósito, um sistema de medição alternativo foi desenvolvido, que permite a redução e o controle da velocidade de abertura dos contatos, além de permitir que isto seja feito com velocidade praticamente constante. O sistema de MRD também permite o ajuste da corrente de teste aplicada, que pode ser de até 300 A. Os ensaios foram realizados em disjuntores do tipo PVO. Uma análise sobre a reprodutibilidade dos resultados foi conduzida utilizando o coeficiente de determinação (R^2). O autor constatou que os ensaios de MRD realizados com velocidade nominal de abertura dos contatos e utilizando os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC e ANSI (50 e 100 A, respectivamente) não são adequados para ensaios de MRD, devido a baixa reprodutibilidade dos resultados e a alta interferência proveniente de películas de óleo e vibrações mecânicas, que comprometem a confiabilidade do diagnóstico. A

partir dos resultados obtidos, o autor pôde determinar um nível máximo de velocidade de abertura dos contatos e um nível mínimo de corrente de teste a serem utilizados nos ensaios de MRD, de modo a se obter resultados/diagnósticos mais confiáveis.

De forma sumarizada, são apresentadas na Tabela 3.1 as principais contribuições das pesquisas supracitadas, com relação ao tema abordado neste trabalho.

Tabela 3.1: Síntese da revisão bibliográfica.

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

Fonte: Próprio autor.

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

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e os métodos empregados nos ensaios de medição de resistência dinâmica em laboratório, com um sistema alternativo de medição.

4.1. MATERIAL

No desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados dois disjuntores de média tensão a pequeno volume de óleo (PVO). Não há registro do número de operações de interrupção de correntes de curto-circuito. Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais características dos disjuntores utilizados.

Tabela 4.1: Características dos disjuntores de média tensão

Característica	Disjuntor A	Disjuntor B
Tipo	3AC2711-4	PL 15C
Número	0003709	9351
Ano de fabricação	1978	1985
Corrente nominal	800 A	630 A
Tensão nominal	15 kV	17,5 kV
Corrente de interrupção simétrica nominal	12,5 kA	12,5 kA
Frequência	60 Hz	50/60 Hz
Meio isolante	Óleo	Óleo
Fabricante	Siemens	Beghim

Fonte: Próprio autor.

Nas Figura 4.1 e 4.2 são apresentadas fotografias dos disjuntores A e B, respectivamente.

Figura 4.1: Fotografia do disjuntor A.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.2: Fotografia do disjuntor B.



Fonte: Próprio autor.

Para o disjuntor B, apenas um conjunto de contatos (um contato fixo e um móvel) foi utilizado.

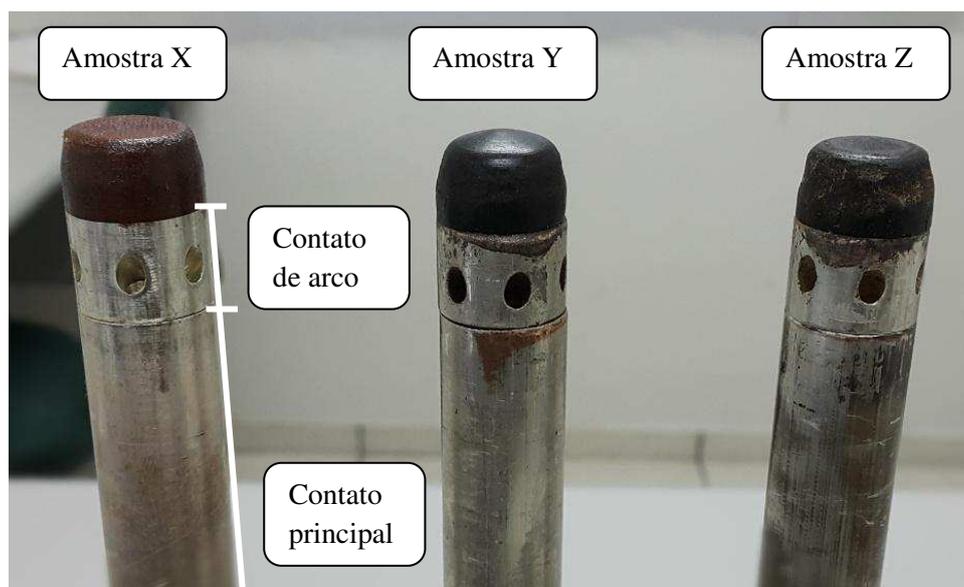
Para os ensaios no disjuntor A, foram utilizados três conjuntos de contatos com diferentes níveis de degradação. Nas Figuras 4.3 e 4.4 são apresentadas fotografias dos contatos fixos e móveis das três amostras ensaiadas, respectivamente.

Figura 4.3: Amostras de contato fixo do disjuntor A.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4: Amostras de contato móvel do disjuntor B.



Fonte: Próprio autor.

A amostra de contato X, apresentada nas Figuras 4.3 e 4.4, é um contato novo, utilizado pela primeira vez nos ensaios desta pesquisa, portanto possui um baixo nível de degradação. A amostra Y foi degradada por operações normais de interrupção de curto-circuito, e foi considerada como um contato de nível de degradação médio. Já a amostra Z, além de ter sido degradada por operações de interrupção de curto-circuito, foi submetida a um procedimento de envelhecimento acelerado baseado em Lemelson

(1973), em que os contatos são imersos em óleo aquecido a uma temperatura de aproximadamente 210°C por 6 horas, e em seguida são resfriados naturalmente por mais 6 horas. Este procedimento foi repetido até que os contatos apresentassem o nível de degradação desejado.

No estudo desenvolvido por Lemelson (1973), foi observado que a formação de películas de óleo na superfície de contatos elétricos isolados a óleo pode, sob certas circunstâncias, levar a falha de operação de equipamentos. Estas falhas, embora sejam raras, são mais comuns em casos onde os contatos conduzem uma alta corrente de carga e raramente (ou até mesmo nunca) operam. Desse modo, as películas de óleo passam a formar camadas de óleo carbonizado que provocam a falha dos equipamentos.

4.2. MÉTODOS

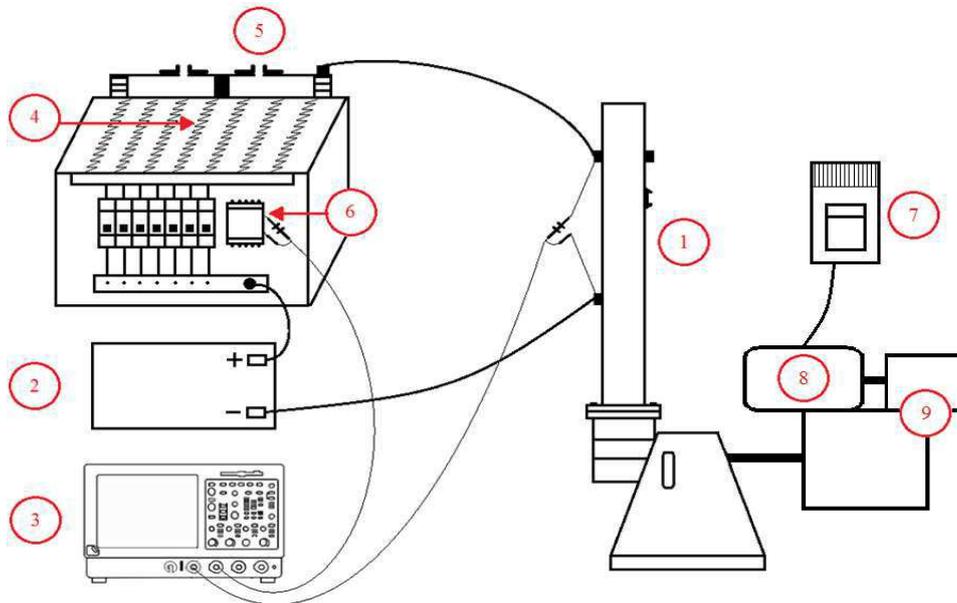
Para realização dos ensaios de MRD em laboratório, foi utilizado um sistema de medição originalmente desenvolvido por Souza & Costa (2014) e aprimorado nesta pesquisa, de modo a possibilitar a realização dos ensaios com redução/controle da velocidade de abertura dos contatos. No sistema proposto, a injeção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

O sistema de medição de corrente consiste em um *shunt* de corrente combinado a um transdutor de tensão, fornecendo um sinal de tensão proporcional a corrente de teste (com relação 500 A/5 V). A aquisição deste sinal de tensão é feita com um dos canais de um osciloscópio digital. O valor da queda de tensão sobre os contatos é obtido simultaneamente por meio da medição direta com um dos canais do osciloscópio.

Os sinais de tensão e corrente medidos durante as operações de abertura dos contatos são exportados para um computador. Os dados foram processados por uma rotina computacional desenvolvida no Matlab®, resultando nas curvas de resistência dinâmica.

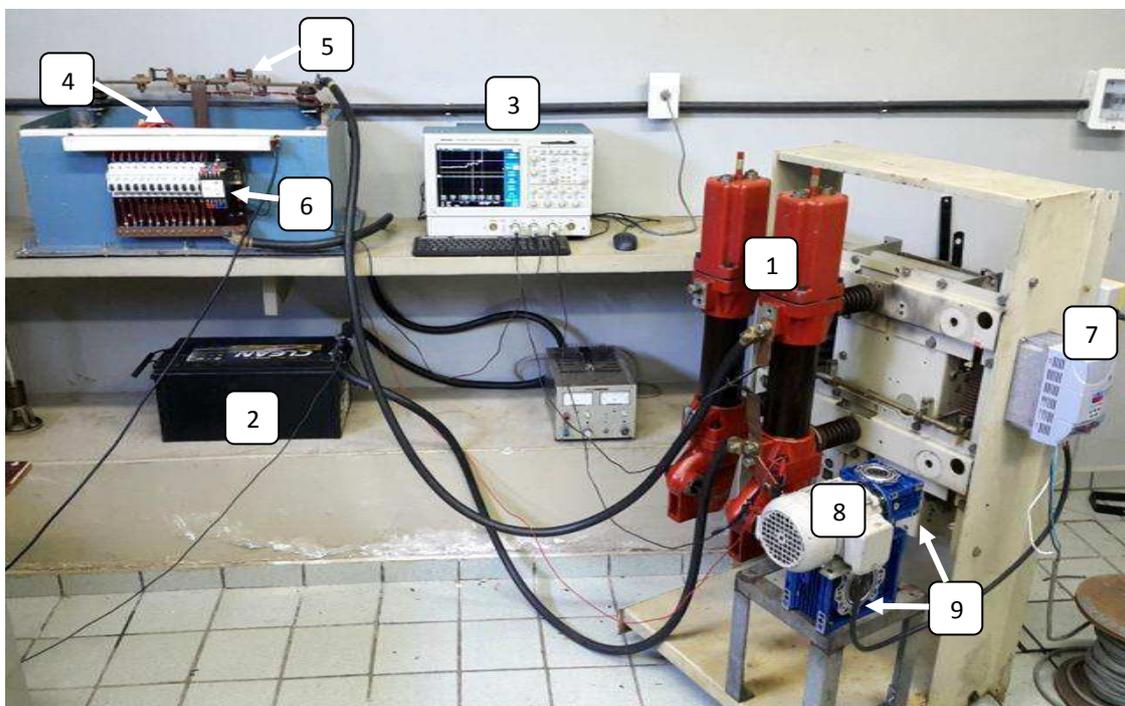
O sistema proposto para realização de ensaios de MRD em laboratório é representado de forma simplificada pela ilustração apresentada na Figura 4.5. Na Figura 4.6 é apresentada uma fotografia do arranjo real montado em laboratório.

Figura 4.5: Ilustração do arranjo adotado para ensaios de MRD. 1 - disjuntor; 2 - bateria estacionária; 3 - osciloscópio digital; 4 - resistores de cromo-alumínio-ferro; 5 - shunt de corrente; 6 - transdutor de tensão; 7 - inversor de frequência; 8 - motor assíncrono; 9 - redutor de velocidade



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6: Arranjo experimental utilizado nos ensaios de MRD. 1 - disjuntor; 2 - bateria estacionária; 3 - osciloscópio digital; 4 - resistores de cromo-alumínio-ferro; 5 - shunt de corrente; 6 - transdutor de tensão; 7 - inversor de frequência; 8 - motor assíncrono; 9 - redutor de velocidade



Fonte: Próprio autor.

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

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



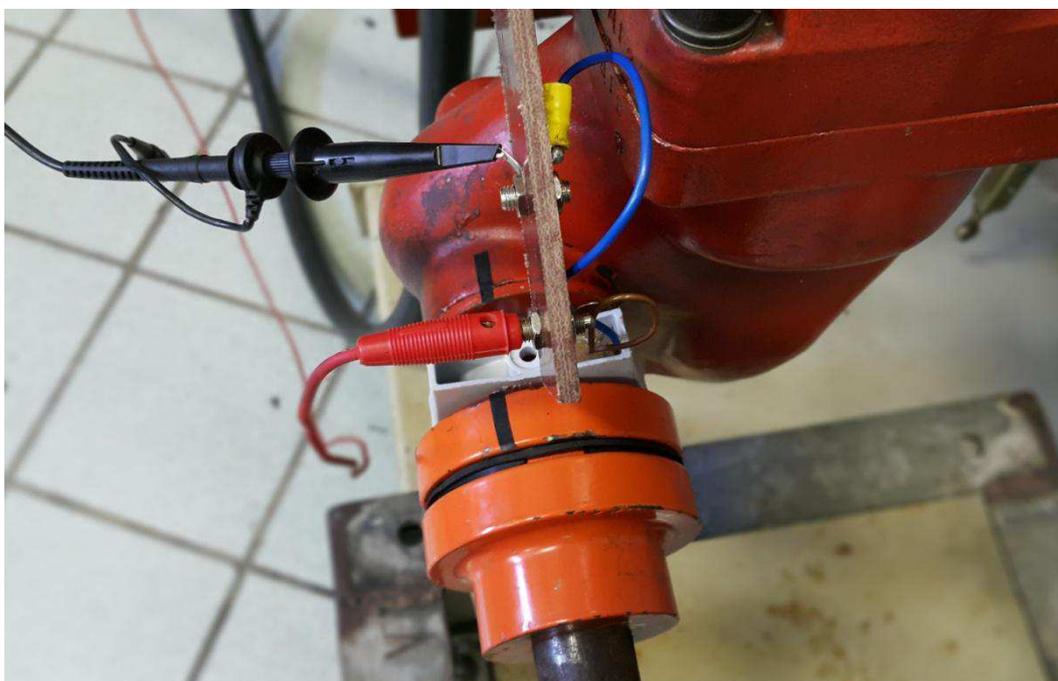
Fonte: Próprio autor.

Apesar do inversor de frequência, por si só, já ser capaz de reduzir a velocidade de rotação do motor, ele não foi suficiente para alcançar a faixa de velocidade desejada. Além disso, a redução da frequência de alimentação de motor também reduz o seu torque, impedindo o processo de abertura dos contatos. Sendo assim, adotou-se um redutor de velocidade duplo com relação de velocidades de 200:1 que, além de permitir a redução de velocidade para os níveis desejados, proporciona um torque praticamente constante durante a abertura.

Devido ao grande número de operações de abertura e fechamento dos contatos realizadas, foi montado um circuito de acionamento auxiliar para o inversor de frequência, visando não danificar os botões de controle do inversor. O circuito auxiliar, que pode ser visto no lado direito da Figura 4.7, contém uma chave de seleção ligar/desligar, uma chave de seleção para selecionar o sentido de rotação do motor e um potenciômetro para ajustar a frequência de alimentação do motor (consequentemente ajustando sua velocidade de rotação).

Para fazer a sincronização das medições no osciloscópio com as operações de abertura do disjuntor, foi utilizado um circuito auxiliar exibido na fotografia apresentada na Figura 4.8.

Figura 4.8: Circuito auxiliar para gatilhamento do osciloscópio.



Fonte: Próprio autor.

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

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

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão expostos os resultados dos ensaios de MRD realizados até a etapa presente da pesquisa. Estudos comparativos entre os resultados obtidos a partir de diferentes configurações de ensaio também serão apresentados e discutidos, utilizando técnicas estatísticas como apoio para justificar as afirmações.

Inicialmente foram realizados ensaios de MRD no disjuntor A, com velocidade nominal de abertura dos contatos, diferentes níveis de corrente de teste e todos com a amostra Z de contatos. Para tal propósito, o arranjo de ensaio apresentado na Figura 4.6 foi utilizado, porém, utilizando o próprio sistema de acionamento por molas do disjuntor e descartando o sistema de redução de velocidade. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.1. As curvas estão com cores diferentes apenas para efeito de comparação, visto que todas foram obtidas a partir de medições com as mesmas configurações de ensaio (mesma velocidade de abertura dos contatos e mesma amostra de contatos).

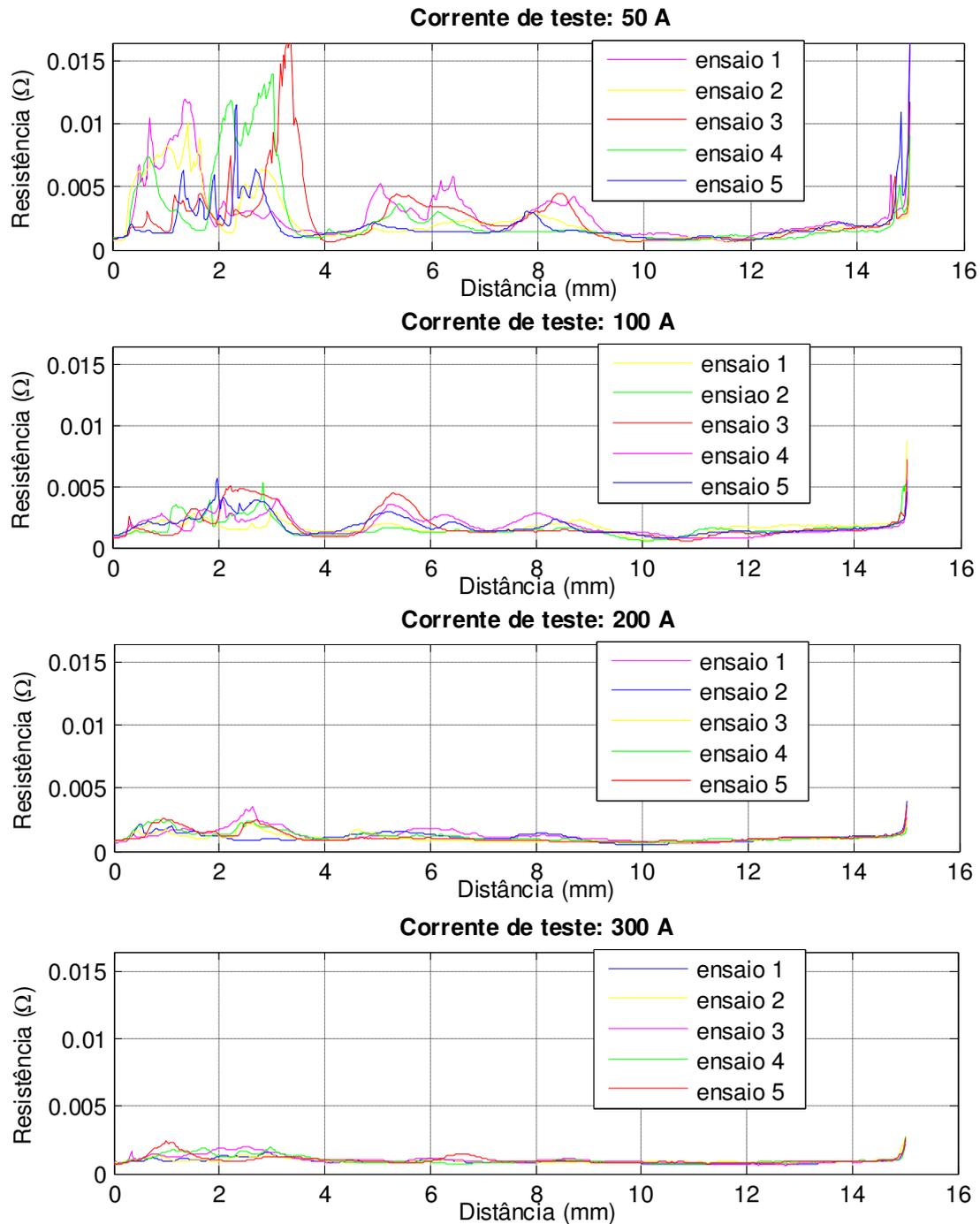
Tendo em vista que todos os gráficos apresentados na Figura 5.1 encontram-se na mesma escala de resistência, observa-se que quanto maior a corrente de teste utilizada nos ensaios, menor são os valores de resistência obtidos. Isto ocorre devido à formação de películas de óleo e impurezas na superfície dos contatos, gerando uma resistência adicional que representam uma interferência nas medições. Sendo assim, correntes de teste mais elevadas ajudam a diminuir este efeito (LEMELSON, 1973).

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.1 também pode-se concluir que a corrente de teste a ser usada nos ensaios de MRD, nos disjuntores de mesmo modelo que o disjuntor A, deve ser de pelo menos 200 A, visto que, a partir deste valor, as curvas de resistência tendem a se manter no mesmo nível. Ensaios adicionais devem ser realizados para verificar se este valor de corrente de teste também é indicado para ensaios de MRD em outros modelos de disjuntor.

Outra informação referente aos procedimentos de ensaios de MRD que pode ser obtida dos resultados da Figura 5.1 é que os ensaios realizados com os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC e ANSI (50 e 100 A, respectivamente)

fornecem resultados não-confiáveis, devido à grande susceptibilidade à interferência de películas de óleo e impurezas.

Figura 5.1: Curvas de MRD obtidas em velocidade nominal e diferentes correntes de teste.

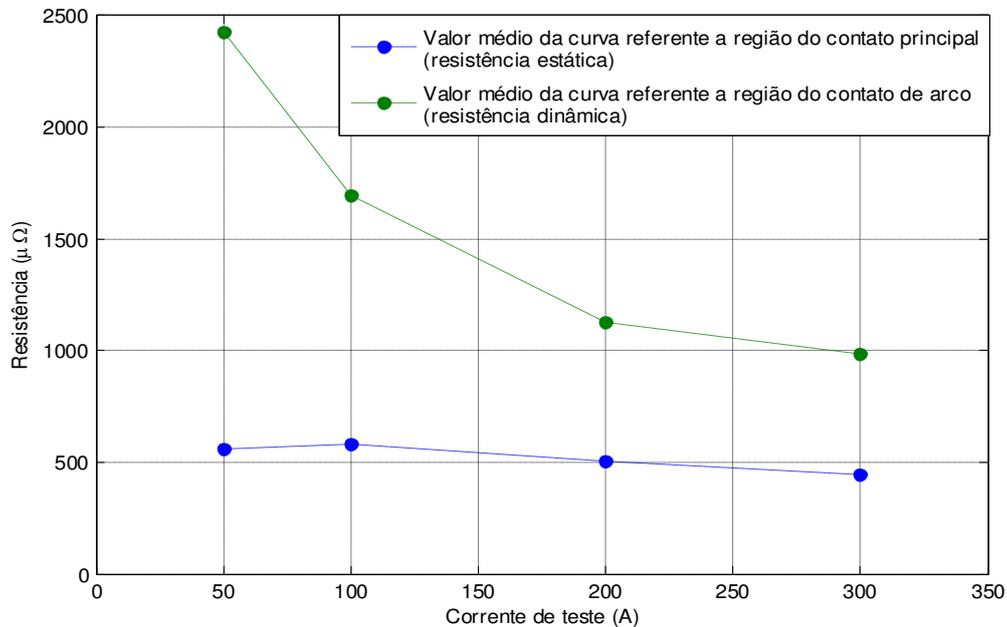


Fonte: Próprio autor.

As curvas de resistência exibidas na Figura 5.1 são referentes apenas à região do contato de arco, no entanto, os valores médios de resistência estática, referentes aos

contatos principais, foram calculados para cada nível de corrente e estão exibidos na Figura 5.2 juntamente com os valores médios das regiões das curvas referentes ao contato de arco.

Figura 5.2: Curva de comportamento da MRD e MRE em função da corrente de teste.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Figura 5.2 pode-se observar mais claramente que os valores medidos de resistência de contato são diretamente influenciados pela corrente de teste aplicada. O aumento da corrente de teste resulta em uma redução significativa dos valores medidos, no entanto, este efeito é bem mais evidente para os valores de resistência dinâmica que para os valores de resistência estática. Vale ressaltar que, para correntes de teste acima de 200 A, a variação da resistência medida já não é tão significativa.

Para o disjuntor A, o valor máximo recomendado para a resistência estática pelo fabricante, até que seja realizada a troca dos contatos, é de $600 \mu\Omega$, obtido com uma corrente de teste de 100 A (SIEMENS, 1988). Portanto, é possível afirmar que o grau de degradação do contato em questão (amostra Z) é relativamente alto, visto que a resistência estática medida para este valor de corrente foi de $579,4 \mu\Omega$. Neste caso, uma manutenção de caráter urgente seria necessária para efetuar a troca dos contatos.

Praticamente todas as técnicas adotadas para correlacionar as curvas de MRD com o grau de degradação dos contatos de disjuntores utilizam a área abaixo da curva

de resistência na região do contato de arco ou o valor médio das curvas como parâmetros de avaliação. Sendo assim, foram calculados os valores de erro percentual absoluto médio (EPAM) desses dois parâmetros com o objetivo de avaliar o quanto os mesmos variam em cada conjunto de curvas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Erro percentual absoluto médio da área e valor médio das curvas de resistência.

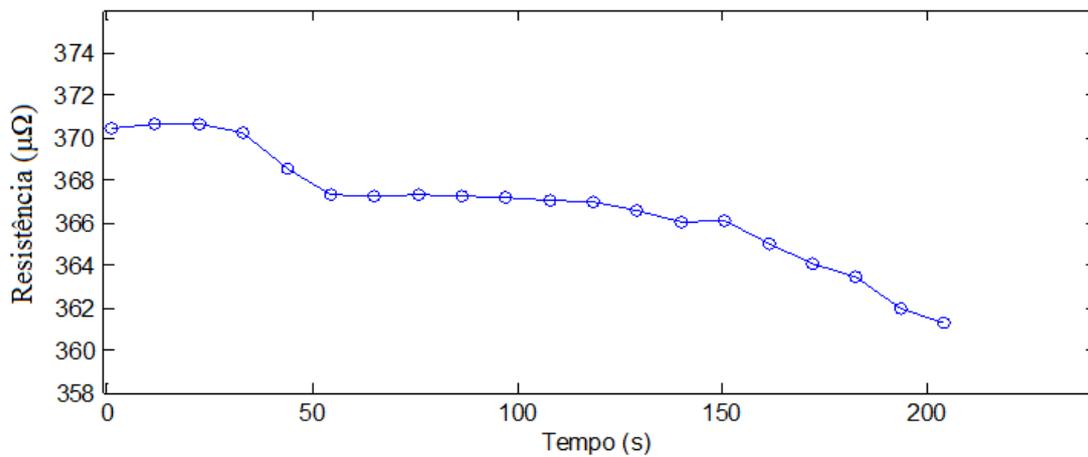
Corrente de teste	EPAM da área abaixo das curvas de resistência	EPAM do valor médio das curvas de resistência
50 A	10,78%	10,38%
100 A	7,67%	6,78%
200 A	7,56%	5,21%
300 A	4,62%	4,43%

Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados na Tabela 5.1 evidenciam que, além de diminuir a interferência proveniente de películas de óleo e impurezas, o aumento da corrente de teste também contribui para aumentar a reprodutibilidade dos resultados, ou seja, as curvas de resistência obtidas com uma mesma configuração de ensaio são mais semelhantes, visto que tanto o EPAM da área abaixo das curvas como o EPAM do valor médio das curvas apresentaram uma redução significativa.

Para avaliar o quanto a resistência adicional proveniente de películas de óleo interfere nos ensaios de medição de resistência, foi realizado um ensaio de medição de resistência estática no disjuntor B. O ensaio foi realizado com uma corrente contínua de teste de 200 A, durante aproximadamente 3,5 minutos. O resultado está apresentado na Figura 5.3.

Figura 5.3: Resistência estática em função do tempo.



Fonte: Próprio autor.

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 5.3, observa-se que durante o ensaio houve uma redução de aproximadamente $10 \mu\Omega$ no valor da resistência estática (apenas 2,7% do valor inicial). Não houve uma indicação clara na curva de que o valor da resistência já estaria estabilizado. Não foi possível realizar um ensaio mais duradouro devido ao sobreaquecimento dos resistores e às limitações da bateria. Uma variação tão pequena não é considerada relevante para aplicações práticas. No entanto, um estudo mais aprofundado se faz necessário para comprovar este resultado.

Para avaliar a influência da velocidade de abertura dos contatos e da corrente de teste utilizada nos ensaios de MRD, uma série de ensaios foi realizada utilizando o arranjo apresentado na Figura 4.6. Os parâmetros de ensaio são descritos a seguir:

- 3 amostras de contatos: amostra X (baixo nível de degradação), amostra Y (médio nível de degradação) e amostra Z (alto nível de degradação);
- 4 níveis de corrente de teste (50, 100, 200 e 300 A);
- 4 faixas de velocidades de abertura dos contatos (0,092~0,095 m/s, 0,168~0,173 m/s, 0,370~0,420 m/s e 0,692~0,736 m/s).

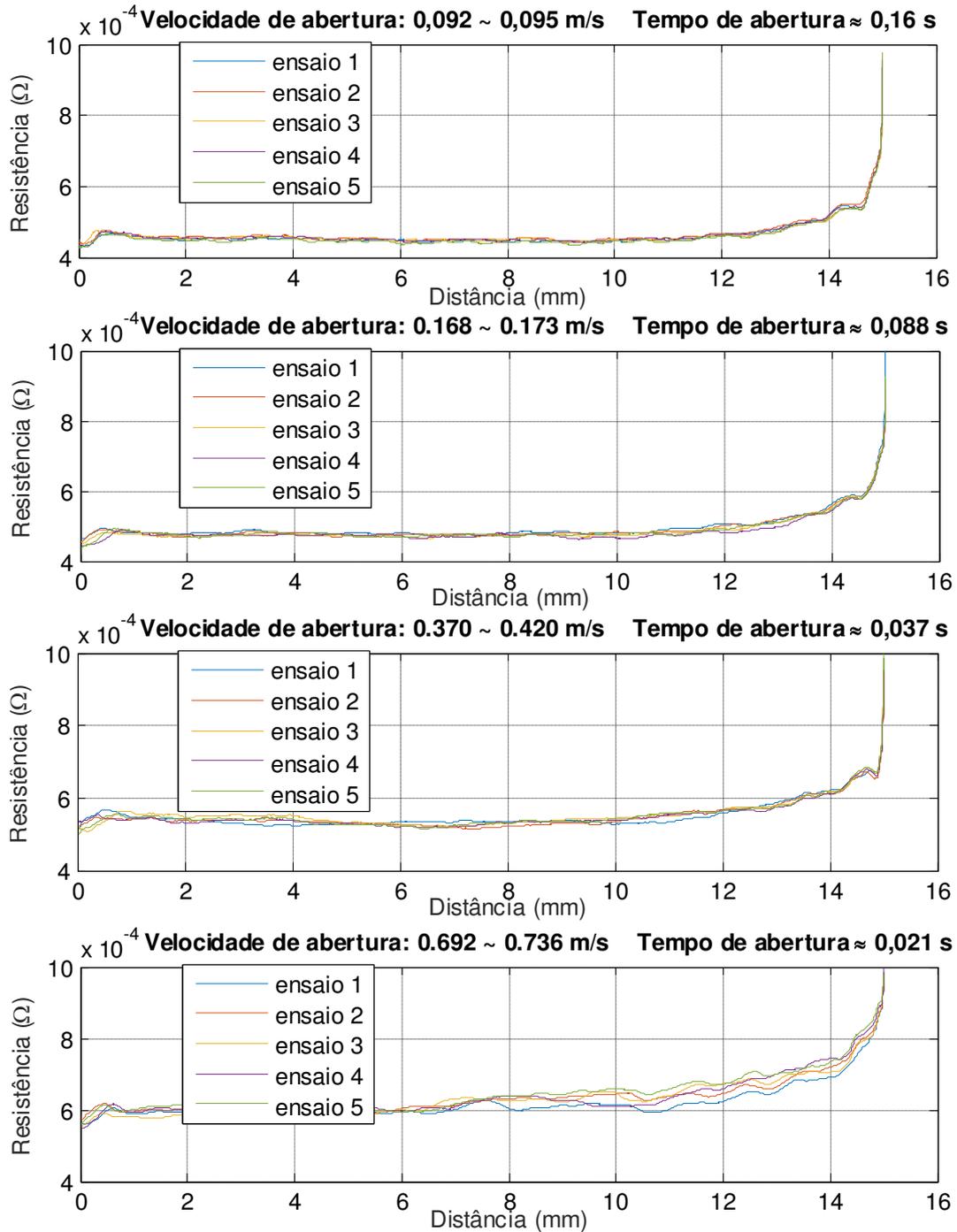
Para cada configuração de ensaio (combinação entre os parâmetros descritos anteriormente) foram realizadas 6 ou 7 medições, totalizando cerca de 300 ensaios.

O osciloscópio foi configurado para gravar 25000 pontos em cada medição, resultando em uma medição com alta resolução e intervalo de amostragem de apenas $8 \mu s$.

A partir da execução de ensaios de MRD com redução da velocidade de abertura dos contatos, aplicando uma corrente de teste de 50 A e utilizando a amostra Y de contatos foram obtidas as curvas de resistência dinâmica apresentadas nos gráficos da Figura 5.4. A partir da comparação destes resultados com os apresentados na Figura 5.1, pode-se observar que, mesmo para o menor nível de corrente de teste adotado nos ensaios, a redução de velocidade resulta em um aumento significativo da reprodutibilidade das curvas. No entanto, a partir de um certo nível de velocidade, as curvas começam a se diferenciar.

A partir das curvas apresentadas na Figura 5.4 também pode-se observar que, quanto maior a velocidade de abertura dos contatos, maior são os valores de resistência medidos. Este efeito ocorre, provavelmente, devido ao fato de que menores velocidades de abertura ajudam a melhorar o contato entre os contatos. Para velocidades de abertura mais altas, ocorrem micro-separações entre os contatos durante o processo de abertura, fazendo com que maiores valores de resistência sejam medidos.

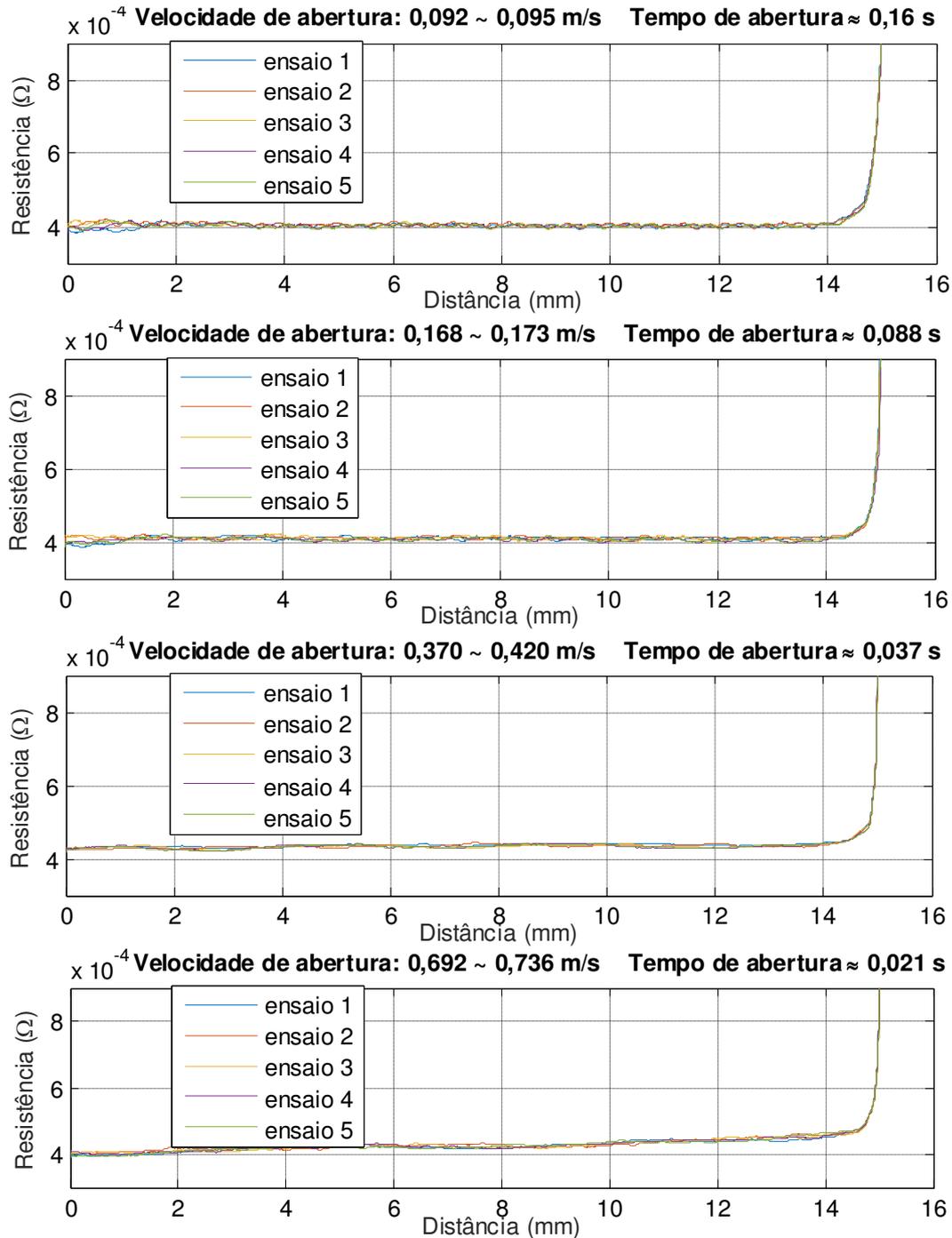
Figura 5.4: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 50 A (amostra Y).



Fonte: Próprio autor.

As curvas de resistência apresentadas na Figura 5.5 foram obtidas a partir de ensaios de MRD com redução de velocidade de abertura dos contatos. A corrente de teste aplicada foi de 50 A. A amostra de contato X foi utilizada.

Figura 5.5: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 50 A (amostra X).

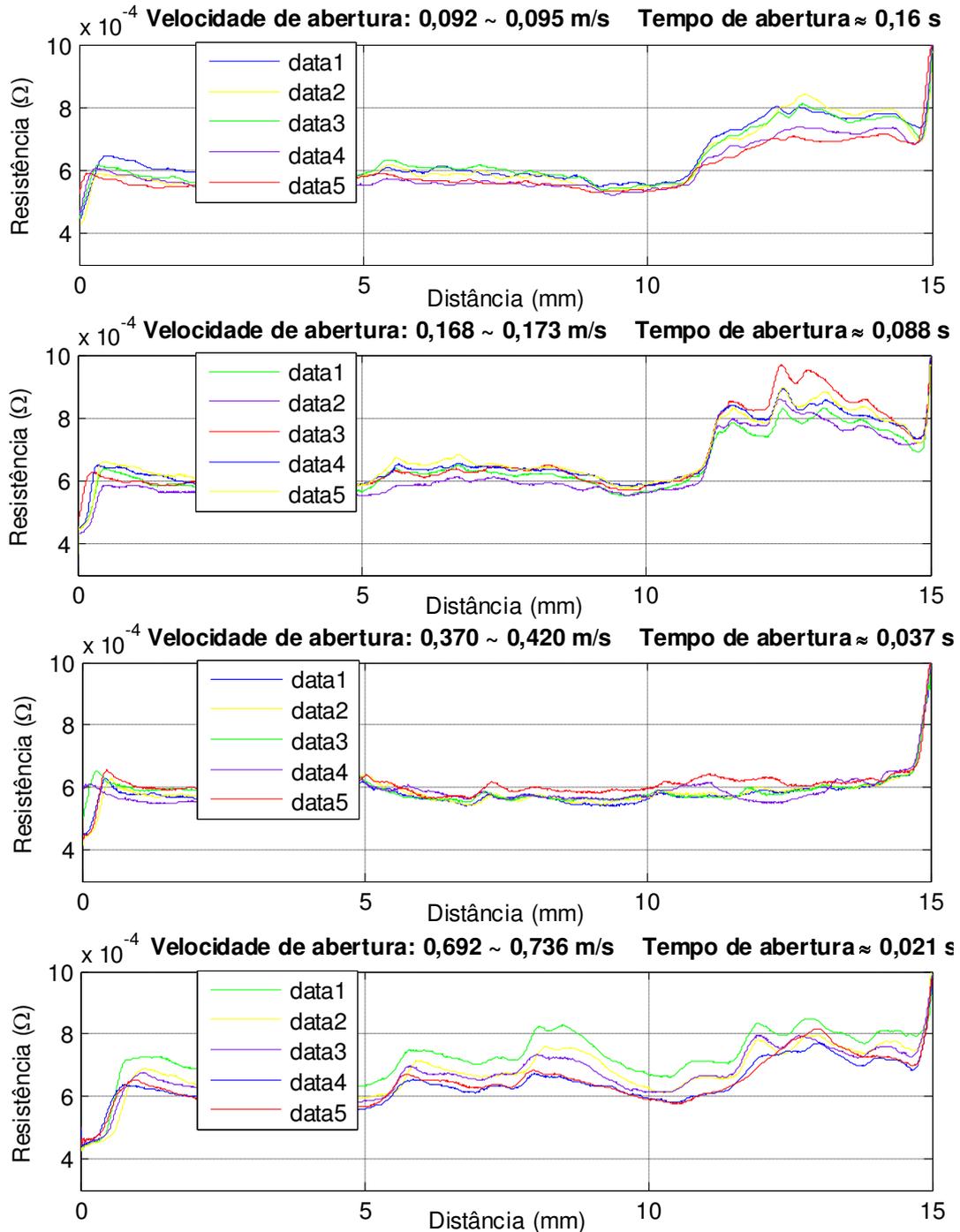


Fonte: Próprio autor.

A partir dos gráficos exibidos na Figura 5.5 pode-se concluir que, para um contato com baixo nível de degradação, as curvas de resistência obtidas tendem a apresentar um bom nível de reprodutibilidade, independentemente do nível de corrente utilizado ou da velocidade de abertura dos contatos durante as medições.

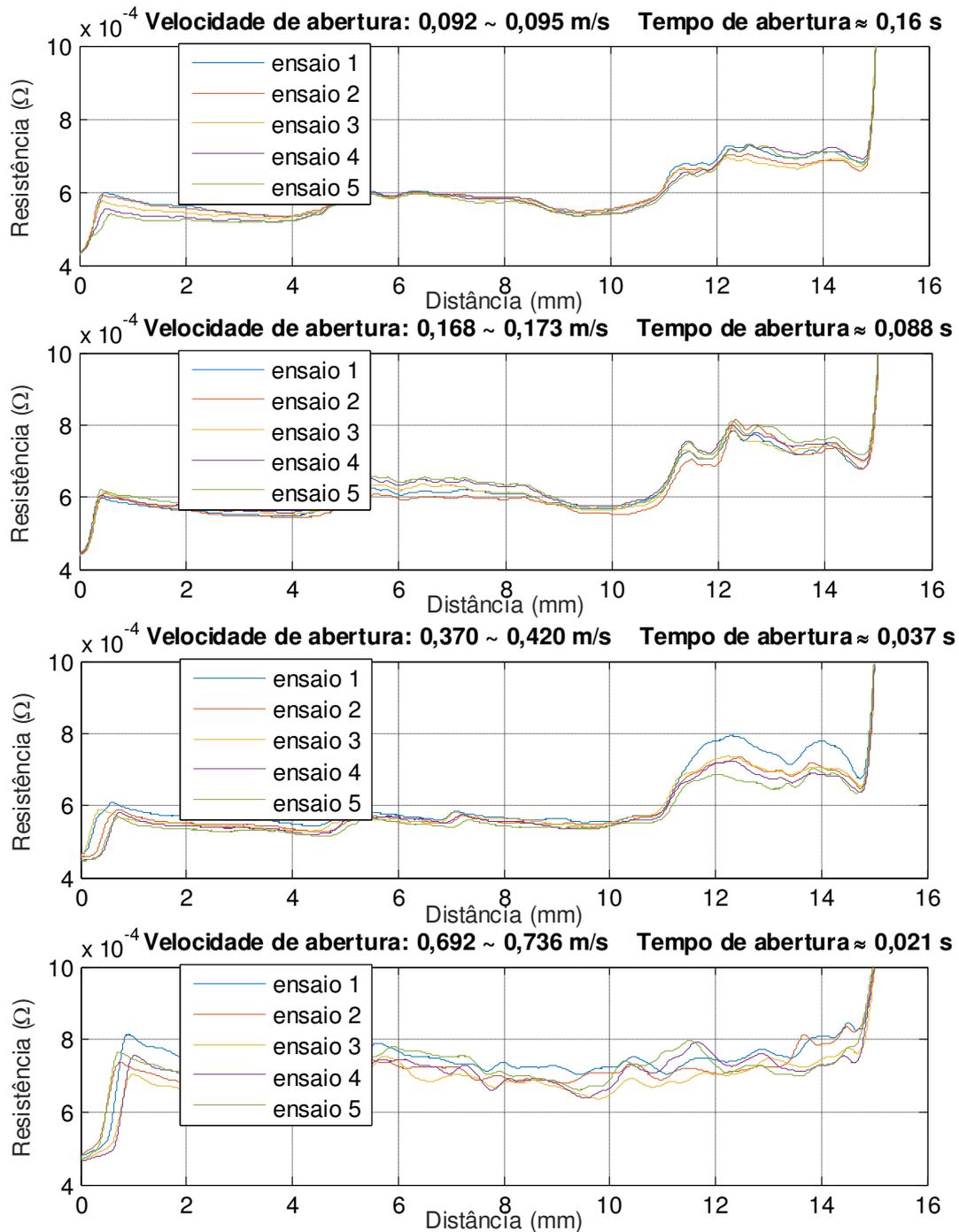
As curvas de resistência exibidas nas Figura 5.6 e 5.7 foram obtidas a partir de ensaios de MRD com redução de velocidade de abertura dos contatos. A corrente de teste aplicada foi de 50 e 300 A, respectivamente. A amostra de contatos Z foi utilizada.

Figura 5.6: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 50 A (amostra Z)



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.7: Curvas de MRD obtidas com redução de velocidade e corrente de teste de 300 A (amostra Z)



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados exibidos na Figura 5.6 pode-se concluir que, quanto maior o nível de degradação do contato, maior a tendência de que as curvas obtidas a partir de ensaios de MRD apresentem baixo grau de reprodutibilidade. Isto ocorre mesmo para valores mais altos de corrente de teste, como foi observado nos ensaios com 300 A (Figura 5.7). Ademais, o efeito de aumento dos valores de resistência

medidos para velocidades mais altas de abertura de contato (visto na Figura 5.4) também pode ser observado nos resultados das Figuras 5.6 e 5.7.

Para resumir todas dados referentes à reprodutibilidade das curvas resultantes dos ensaios de MRD com velocidade reduzida de abertura dos contatos, os coeficientes de determinação médios calculado para cada conjunto de curvas (de cada configuração de ensaio) estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Coeficientes de determinação médios para cada configuração de ensaio.

Velocidade de abertura (m/s)	Amostra X			
	50 A	100 A	200 A	300 A
0,092 ~ 0,095	0,967	0,974	0,974	0,974
0,168 ~ 0,173	0,951	0,955	0,984	0,975
0,370 ~ 0,420	0,958	0,957	0,984	0,974
0,692 ~ 0,736	0,964	0,949	0,978	0,932
Velocidade de abertura (m/s)	Amostra Y			
	50 A	100 A	200 A	300 A
0,092 ~ 0,095	0,975	0,961	0,978	0,980
0,168 ~ 0,173	0,958	0,978	0,958	0,954
0,370 ~ 0,420	0,946	0,872	0,871	0,840
0,692 ~ 0,736	0,891	0,918	0,716	0,964
Velocidade de abertura (m/s)	Amostra Z			
	50 A	100 A	200 A	300 A
0,092 ~ 0,095	0,833	0,912	0,895	0,966
0,168 ~ 0,173	0,912	0,937	0,932	0,940
0,370 ~ 0,420	0,720	0,645	0,634	0,858
0,692 ~ 0,736	0,757	0,549	0,594	0,410

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.2 pode-se verificar que todos os R^2 calculados para as medições com a amostra X são maiores que 0,93, indicando que ensaios de MRD em contatos com baixo nível de degradação tendem a fornecer resultados bastante parecidos para cada configuração de ensaio, mesmo que os ensaios sejam realizados nas condições menos favoráveis (altas velocidades de abertura e baixas correntes de teste).

Os valores de R^2 referentes às amostras Y e Z indicam que, a partir de um certo nível de velocidade de abertura entre as segunda e terceira faixas de velocidade, os ensaios de MRD passam a fornecer resultados com baixa reprodutibilidade, com R^2 geralmente menor que 0,9. Sendo assim, em casos onde a instalação de um sistema de redução de velocidade for possível, os ensaios de MRD realizados com este modelo de disjuntor ou modelos semelhantes deveriam utilizar uma velocidade de abertura dos contatos inferior a 0,2 m/s.

Os valores de R^2 obtidos a partir das medições com a amostra Z indicam que, quanto maior a corrente de teste utilizada, maiores são os valores de R^2 , ou seja, maior a reprodutibilidade das curvas. No entanto, a partir de um certo nível de velocidade, este efeito já não é tão notável.

Os valores de R^2 para os resultados dos ensaios realizados em velocidade nominal de abertura dos contatos também foram calculados, no entanto, foram obtidos valores muito incoerentes, inclusive valores negativos de R^2 , comprovando mais uma vez que a abertura dos contatos em velocidade nominal não é indicada para ensaios de MRD, devido a baixa reprodutibilidade obtida nos resultados.

Os resultados apresentados na Tabela 5.2 também indicam que a redução da velocidade de abertura dos contatos traz uma contribuição muito mais significativa para o aumento da reprodutibilidade dos resultados que o aumento da corrente de teste.

Deve-se observar que a maior faixa de velocidade de abertura dos contatos utilizada para obter os resultados apresentados na Tabela 5.2, que já resultou em baixos valores de R^2 , é, ainda assim, bem menor que a velocidade de abertura nominal do disjuntor, que é de aproximadamente 3,1 m/s.

Nos ensaios descritos neste capítulo, o desgaste dos contatos provocado pela execução dos próprios ensaios é considerado insignificante, visto que as correntes de teste utilizadas não chegam nem a metade da corrente nominal dos disjuntores utilizados.

Nos ensaios de MRD realizados neste trabalho, as resistências dos cabos e das diversas conexões utilizadas no arranjo de ensaio não interferem nas medições, visto que a medição de resistência foi implementada com um sistema de medição a quatro fios, como foi descrito no capítulo 4 (Figuras 4.5 e 4.6).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma análise da técnica de medição de resistência dinâmica e dos diagnósticos fornecidos por ela, mais especificamente, no que se refere ao ajuste de dois parâmetros de ensaio: corrente de teste e velocidade de abertura dos contatos. De modo geral, até a etapa atual da pesquisa, os resultados obtidos forneceram informações significativas quanto à aplicação da MRD no diagnóstico do grau de degradação dos contatos de disjuntores.

A partir das análises feitas com o auxílio de métodos estatísticos nos resultados experimentais, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A partir dos resultados experimentais, comprovou-se que os resultados dos ensaios de MRD realizados com velocidade nominal de abertura dos contatos não se repetem para ensaios com a mesma configuração, independentemente da corrente de teste utilizada. Desse modo, a confiabilidade dos diagnósticos é comprometida;
- Comprovou-se que os ensaios de MRD realizados com velocidade nominal de abertura dos contatos, e utilizando os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC e ANSI (50 e 100 A, respectivamente) são significativamente afetados pela interferência proveniente de películas de óleo e impurezas que se formam na superfície dos contatos. Portanto, tais ensaios resultam em falsos valores de resistência de contato e, conseqüentemente, diagnósticos não-confiáveis;
- Os ensaios de MRD em velocidade nominal de abertura dos contatos devem ser realizados com a aplicação de uma corrente de teste de no mínimo 200 A, a fim de reduzir as interferências provenientes de películas de óleo e impurezas;

- Verificou-se que os ensaios de MRD realizados com redução de velocidade de abertura dos contatos fornecem resultados com maior reprodutibilidade, melhorando a confiabilidade do diagnóstico. De acordo com os valores de R^2 calculados para as diferentes configurações de ensaio, os ensaios de MRD devem ser realizados com velocidade de abertura de 0,2 m/s ou inferior (quando a instalação de um sistema de redução de velocidade for possível), a fim de evitar erros de medição devido a interferências provenientes de vibrações mecânicas;
- A partir dos resultados obtidos para as amostras de contatos com diferentes níveis de degradação, comprovou-se que, quanto maior a degradação dos contatos, menor o grau de reprodutibilidade das curvas de resistência obtidas nos ensaios de MRD;
- A partir dos valores de R^2 calculados, comprovou-se que para ensaios de MRD realizados com redução de velocidade de abertura dos contatos, a utilização de correntes de teste mais elevadas ajudam a melhorar a reprodutibilidade dos resultados. No entanto, a medida que a velocidade de abertura aumenta, este efeito passa a ser menos notável;
- A partir dos resultados obtidos com diferentes configurações de ensaio, verificou-se que, quanto maior a velocidade abertura dos contatos durante os ensaios de MRD, maiores são os valores de resistência medidos;
- A partir do ensaio de MRE prolongado e dos ensaios de MRD (pelos quais também se pode determinar o valor da resistência estática), verificou-se que, em comparação com os ensaios de MRD, as medições de resistência estática são pouco influenciadas pela corrente de teste utilizada.

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

TRABALHOS FUTUROS

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

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

- Estudar a aplicação da técnica de medição proposta neste trabalho em outros modelos de disjuntor (como disjuntores a SF₆ e outros modelos de disjuntores a óleo);
- Desenvolver um sistema de medição portátil para aplicação da técnica proposta neste trabalho, como alternativa aos analisadores de disjuntores comerciais disponíveis atualmente;
- Desenvolver um sistema de medição capaz de fornecer informações a respeito do estado operativo de disjuntores sem a necessidade de desinstalar o equipamento ou colocá-lo fora de operação;
- Avaliar a aplicação de medição de radiação com antenas no monitoramento de disjuntores;
- Avaliar a aplicação de medições com fibra ótica no monitoramento de disjuntores;
- Avaliar métodos estatísticos e técnicas computacionais que possam ser utilizadas para interpretar os resultados das medições e correlacioná-los com o estado operativo dos disjuntores;

REFERÊNCIAS

ABB. *Live Tank Circuit Breakers - Buyer's Guide*. Suécia, 2009.

ADAM M.; BARABOI A.; PANCU C. *Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers*. International Conference on Electromechanical and Power Systems, pp. 55-60, 2007.

ANSI / IEEE STD C37.09. *Test procedure for ac high-voltage circuit breakers*, 1999.

ARAÚJO R. L. *Disjuntores*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Paraná, 2001.

BHEL. *Handbook of switchgears*. McGraw-Hill Professional, New York, 2006.

BRAITHWAITE N. S. J. *Introduction to gas discharges*. Plasma Sources Sci. Technol. United Kingdom, vol. 9, pp. 517-527, 2000.

CARVALHO A. C. C. *et al. Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência*. Niterói-RJ: EDUFF, 1995.

COSTA E. G.; FELIX T. A.; GERMANO A. D.; ALMEIDA G. J. C.; SOUZA V. C., *Estudo das características de curvas de resistência dinâmica de disjuntores utilizando redes neurais artificiais*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), pp.1-6, 2010.

D'AJUZ A.; RESENDE F. M.; CARVALHO F. M. S.; NUNES I. G. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. FURNAS/UFF. 1985.

DUFOUR J. M. *Coefficients of Determination*. McGill University, Montreal, 2011.

FERREIRA J. R. R. P. *Principais Tipos de Disjuntores*. 2006.

FLURSCHEIM C. H. *Power circuit breaker theory and design. V. 1.* The Institution of Engineering and Technology. London, 2008.

FRONTIM S. O. *Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas.* Brasília: Teixeira, 2013.

GARZON R. D. *High voltage circuit breakers: Design and applications.* CRC Press, New York, 2002.

GILL P. *Electrical power equipment maintenance and testing.* Boca Raton: CRC Press, 2008.

GREMMEL H. *Switchgear Manual.* Central-Druck Trost GmbH & Co. 10^o ed, Berlin, 2002

IS/IEC 62271-1: *High-Voltage Switchgear and Controlgear, Part 1: Common Specifications,* 2007.

JEYARAJ S. G. & HABTAY Y. *Effective and efficient circuit breaker analysis.* Reliability of Transmission and Distribution Networks, pp. 1,6, 22-24, 2011.

LANDRY M.; MERCIER A.; OUELLET G.; RAJOTTE C.; CARON J.; ROY M.; BRIKCI F. *A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers.* IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1002-1009, 2006.

LANDRY M.; TURCOTTE O.; BRIKCI F. *A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breaker.* IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, pp. 710-716, 2008.

LEMELSON K. *About the Failure of Closed Heavy Current Contact Pieces in Insulating Oil at High Temperature.* IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, PHP-9, pp. 50-52, 1973.

MACHADO T. N. M. *Modelação de Séries Temporais - Métodos Lineares e Não Lineares*. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação) - Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança, Bragança, 2009.

MCDONALD J. D. *Electric Power Substations Engineering*. CRC Press, Florida, 2003.

NASRALLAH E.; BRIKCI F.; PERRON S. *Electrical contacts in MV & HV power circuit breakers*. Electric Energy T&D Magazine, pp. 50-55, 2007.

OHLEN M.; DUECK B.; WERNLI H. *Dynamic Resistance Measurements – A Tool for Circuit Breaker Diagnostics*. Stockholm Power Tech International Symposium on Electric Power Engineering, Vol. 6 , pp. 108-113, 1995.

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

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

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

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

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

SOUZAR. T. & COSTA E. G. *Diagnóstico da Condição dos Contatos em Disjuntores Através da Resistência Dinâmica*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Montevideu, 2014.

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

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

VANGUARD. Data sheet Micro-ohmmeter Accu-Ohm 200 Series 2. Vanguard Instruments Company, 2010.

VIP. (s.d.). *Tungsten in electrical contact metals*. Acesso em 29 de 05 de 2014, disponível em Vacuum Impregnated Products: <http://www.vipproducts.co.uk/products.htm>.