

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Danilo Turkievicz dos Santos

**SISTEMA INTELIGENTE PARA APOIO À  
PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO**

Florianópolis

2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Danilo Turkievicz dos Santos

**SISTEMA INTELIGENTE PARA APOIO À  
PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dr. Jacqueline Gisèle Rolim

Florianópolis

2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Danilo Turkievicz dos  
Sistema inteligente para apoio à programação da manutenção  
de disjuntores de alta tensão / Danilo Turkievicz dos  
Santos ; orientadora, Jacqueline Gisèle Rolim -  
Florianópolis, SC, 2013.  
162 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. disjuntor. 3. ensaio. 4.  
gerenciamento. 5. lógica fuzzy. I. Rolim, Jacqueline Gisèle  
. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Danilo Turkievicz dos Santos

**SISTEMA INTELIGENTE PARA APOIO À  
PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.  
Florianópolis, 10/07/2013.

---

Patrick Kuo Peng, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.  
Orientadora

---

Flavio Antonio Becon Lemos, Dr., UFRGS

---

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr., UFSC

---

Hans Helmut Zurn, PhD., UFSC



## AGRADECIMENTOS

À minha família e esposa Regine, em especial, por entenderem o desafio e aceitarem momentos de ausência. Por terem paciência e me apoiarem em todos os momentos.

Agradeço à minha orientadora Jacqueline por ter, desde antes da matrícula, me incentivado e orientado na realização dessa dissertação.

À COPEL, por ter proporcionado e patrocinado essa oportunidade ímpar.

Aos colegas do LABSPOT, em especial ao Leonardo, Luiz, Patrícia, Daniel, Edson, Ciro, Nastasha, Eduardo, Caroline, Guilherme e André.

Aos colegas da COPEL, que cobriram minha ausência, em especial ao Carpes e ao Clailton.



## RESUMO

Presente na maioria dos sistemas elétricos, os disjuntores de alta tensão têm sua importância garantindo a extinção do arco elétrico oriundo da interrupção de correntes de curto-circuito e corrente nominal do equipamento, evitando danos aos demais componentes do sistema elétrico. A vida útil do disjuntor pode ser estendida pela adoção do correto planejamento da manutenção, evitando intervenções precoces ou tardias. Existem diversas metodologias para planejamento da manutenção, consolidadas e adaptadas para as necessidades das concessionárias, sendo raro encontrar programas de manutenção idênticos. Nessa dissertação é preconizada a utilização dos resultados de ensaios de manutenções anteriores e de registros de intervenções corretivas para sugestão de data de intervenção em disjuntores de alta tensão. Um sistema baseado em conhecimento fundamentado na lógica *fuzzy* é empregado para avaliar os valores de ensaios de disjuntores, comparando com valores de referência constantes nos manuais, normas ou em casos omissos, por determinação do especialista. Os resultados obtidos permitem avaliação em dois modos: individual do disjuntor e por modelo de disjuntor. O primeiro fornece ao usuário maiores detalhes das análises. No segundo dados concisos, mas ideais para fácil identificação de disjuntores defeituosos em grandes grupos.

**Palavras-chave:** disjuntor, ensaios, gerenciamento, manutenção, lógica *fuzzy*.



## ABSTRACT

Present in most power systems, high voltage circuit breakers have their importance ensuring the extinction of the arc originated from the interruption of short circuit and the circuit rated current, preventing damages to other components of the electrical system. The lifetime of a circuit breaker can be extended by the adoption of proper maintenance planning, in order to avoid early or late interventions. There are several consolidated methodologies for maintenance planning, adapted to the specific needs of electric utilities, therefore it is rare to find identical maintenance programs. The methodology described in this dissertation uses the results of tests, and records of corrective intervention dates, to suggest the next date intervention in high voltage circuit breakers. A knowledge-based system based on fuzzy logic evaluates the results of tests of circuit breakers comparing them to the reference values in the manuals, to the standards or, in neither case, as determined by the expert. The results allow evaluation in two ways: individual and by group model. The first provides the user with details of the analyses. In the latter the provided information is more concise, but ideal for easy identification of defective circuit breakers in large groups.

**Keywords:** circuit breaker, tests, management, maintenance, fuzzy logic.



## LISTA DE FIGURAS

1	Utilização de <i>wavelets</i> na corrente da bobina . . . . .	27
2	Corrente na bobina . . . . .	27
3	Principais partes do disjuntor tripolar . . . . .	32
4	Principais partes do disjuntor monopolar . . . . .	33
5	Principais partes de um polo . . . . .	34
6	Principais partes do mecanismo . . . . .	35
7	Câmara primitiva . . . . .	39
8	Câmara de extinção de sopro transversal . . . . .	40
9	Câmara de extinção de sopro axial . . . . .	40
10	Disjuntor GVO <i>single-tank</i> . . . . .	41
11	Disjuntor GVO <i>3-tank</i> . . . . .	41
12	Disjuntor PVO . . . . .	42
13	Polo PVO em corte . . . . .	43
14	Avaliação do desgaste do contato . . . . .	44
15	Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a $SF_6$ de dupla pressão . . . . .	47
16	Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a $SF_6$ de única pressão . . . . .	49
17	Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a $SF_6$ <i>self blast</i> . . . . .	50
18	Curva de enchimento do $SF_6$ e valores de atuação do densímetro . . . . .	51
19	Corte do densímetro de disjuntor a $SF_6$ . . . . .	52
20	Densímetro de disjuntor a $SF_6$ . . . . .	52
21	Corte de uma ampola a vácuo . . . . .	53
22	Forças magnéticas em um TMF . . . . .	55
23	Disjuntor a vácuo de 230 kV . . . . .	55
24	Diagrama de conexões de um dispositivo de manobra tripolar . . . . .	62
25	Distribuição do tamanho das partículas em óleo para uso . . . . .	64
26	Medidor de rigidez dielétrica do óleo . . . . .	67
27	Instrumento portátil para avaliação de $SF_6$ . . . . .	70
28	Ensaio de força de atrito . . . . .	71
29	Formas de conexão no ensaio de resistência de contato . . . . .	73
30	Acompanhamento do desgaste da ampola a vácuo . . . . .	75
31	Relação entre os principais tempos durante o processo de abertura . . . . .	79

32	Analisador de disjuntor .....	80
33	Corrente na bobina de abertura .....	82
34	Analisador de assinatura de mecanismo .....	83
35	Cadastro de ensaio no sistema de gerenciamento da manutenção .....	89
36	Cadastro de equipamento no sistema de gerenciamento da manutenção .....	91
37	Ordem de serviço .....	92
38	Ensaio dos irmãos .....	95
39	Taxa de falha por idade .....	99
40	Taxas de falhas de diferentes modelos de disjuntores ....	102
41	Definição do intervalo máximo entre manutenções .....	106
42	Função de Pertinência .....	108
43	Função de pertinência triangular .....	109
44	Função de pertinência gaussiana .....	109
45	Função de pertinência trapezoidal .....	110
46	Exemplo Sistema <i>fuzzy</i> .....	111
47	Funções de pertinência de entrada .....	116
48	Função de pertinência de saída .....	119
49	Exemplo de aplicação das funções de pertinência de saída	120
50	Exemplo de saída do sistema <i>fuzzy</i> para um espécime ...	121
51	Tabela de saída .....	123
52	Lista de piores ensaios do espécime .....	124
53	Lista de ensaios que necessitam de intervenção urgente ..	125
54	Gráfico de tempo para próxima manutenção .....	125
55	Taxa de falha por modelo .....	137
56	Tempo para próxima manutenção por modelo .....	138
57	Resultados obtidos do sistema proposto .....	141

## LISTA DE TABELAS

1	Condição de ensaio no caso geral . . . . .	62
2	Níveis de isolamento nominais para tensões nominais da classe I, série I. . . . .	63
3	Principais diferenças entre ASTM D 877 e ASTM D 1816	65
4	Valores mínimos de rigidez dielétrica de óleo em operação	67
5	Níveis máximos de impurezas para $SF_6$ novo. . . . .	69
6	Valores típicos de resistência de contato . . . . .	74
7	Taxa de falha . . . . .	96
7	Taxa de falha . . . . .	97
7	Taxa de falha . . . . .	98
8	Resumo dos parâmetros para as funções de pertinência de entrada. . . . .	117
9	Resumo dos parâmetros para as funções de pertinência de saída . . . . .	119
10	Espécimes . . . . .	132
11	Resultados comparativos entre sistema proposto e sistema atual . . . . .	142
12	Resultados comparativos entre tecnologias de extinção . .	144
13	Resultados comparativos entre tecnologias de mecanismo	146
14	Resultados comparativos entre espécimes de mesmo modelo . . . . .	148
15	Comparação entre periodicidades . . . . .	149
16	Lista de ensaios anormais . . . . .	151



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$SF_6$	Hexafluoreto de Enxofre.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function.</i>
DLL	<i>Dynamic-Link Library.</i>
GDMaSE	Gerenciador da Manutenção da Distribuição.
GMT	Gerenciador da Manutenção da Transmissão.
GVO	Grande Volume de Óleo.
IMC	Índice de Massa Corpóreo.
MBC	Manutenção Baseada em Confiabilidade.
OS	Ordem de Serviço.
PDF	<i>Probability Density Function.</i>
PVO	Pequeno Volume de Óleo.
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance.</i>
TC	Transformador de Corrente.
TMF	<i>Transverse Magnetic Field.</i>
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
1.2 OBJETIVO GERAL .....	30
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	30
<b>2 DISJUNTORES</b> .....	31
2.1 INTRODUÇÃO .....	31
2.2 PRINCIPAIS PARTES DE UM DISJUNTOR .....	31
<b>2.2.1 Polos</b> .....	33
<b>2.2.2 Mecanismo</b> .....	34
2.3 MEIOS DE EXTINÇÃO .....	36
<b>2.3.1 Disjuntor a Óleo</b> .....	37
2.3.1.1 Grande Volume de Óleo - GVO .....	39
2.3.1.2 Pequeno Volume de Óleo - PVO .....	42
<b>2.3.2 Disjuntor a Hexafluoreto de Enxofre - SF<sub>6</sub></b> .....	45
2.3.2.1 Disjuntores de Dupla Pressão .....	46
2.3.2.2 Disjuntores de Pressão Única .....	48
<b>2.3.3 Disjuntor a Vácuo</b> .....	53
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
<b>3 ACOMPANHAMENTO DE DISJUNTORES EM SERVIÇO</b> .....	57
3.1 AVALIAÇÃO DO ISOLAMENTO .....	58
<b>3.1.1 Meio Isolante e Meio Extintor</b> .....	59
<b>3.1.2 Medição da Resistência de Isolamento</b> .....	59
<b>3.1.3 Ensaio de tensão à frequência industrial</b> .....	61
<b>3.1.4 Medição da Rigidez Dielétrica do óleo</b> .....	62
3.1.4.1 Medidor de rigidez dielétrica do óleo .....	65
<b>3.1.5 Avaliação do SF<sub>6</sub></b> .....	67
3.2 AVALIAÇÃO DOS CONTATOS .....	69
<b>3.2.1 Ensaio para Medição da Resistência de Contato</b> ..	72
<b>3.2.2 Influência do Meio de Extinção</b> .....	74
<b>3.2.3 Curva I<sup>2</sup>t</b> .....	77
3.3 AVALIAÇÃO DA PARTE MECÂNICA .....	78
<b>3.3.1 Avaliação do tempo de operação</b> .....	78
3.3.1.1 Tempo de Abertura, Fechamento, Interrupção .....	78
3.3.1.2 Analisador de disjuntor .....	79
<b>3.3.2 Assinatura do mecanismo</b> .....	81
<b>4 PROPOSTA DO SISTEMA</b> .....	85

4.1	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	86
4.1.1	Banco de dados de ensaios .....	86
4.1.2	Banco de dados de características técnicas dos disjuntores .....	89
4.1.3	Banco de dados de ordens de serviço .....	90
4.1.4	Banco de dados de valores de referência.....	92
4.1.5	Seleção dos ensaios.....	93
4.2	DADOS COMPLEMENTARES .....	96
4.2.1	Taxa de falha .....	96
4.2.1.1	Ajuste dos dados da Taxa de Falha .....	100
4.2.2	Definição dos limites .....	103
4.2.3	Intervalo máximo entre manutenções.....	105
4.2.4	Cálculo da discordância entre polos .....	106
4.3	SISTEMA <i>FUZZY</i> .....	107
4.3.1	Funções de Pertinência de Entrada.....	111
4.3.2	Funções de Pertinência de Saída .....	118
4.3.3	Regras .....	120
4.4	TIPOS DE EXECUÇÃO DO SISTEMA .....	122
4.4.1	Análise Individual.....	122
4.4.2	Análise Geral .....	123
4.5	IMPLEMENTAÇÃO .....	125
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>131</b>
5.1	MODELOS DE DISJUNTORES ADOTADOS.....	132
5.1.1	Modelo 1 .....	132
5.1.2	Modelo 2 .....	133
5.1.3	Modelo 3 .....	133
5.1.4	Modelo 4 .....	133
5.1.5	Modelo 5 .....	134
5.1.6	Modelo 6 .....	134
5.1.7	Modelo 7 .....	134
5.1.8	Modelo 8 .....	135
5.1.9	Modelo 9 .....	135
5.1.10	Modelo 10 .....	136
5.1.11	Resultados obtidos pelo sistema proposto .....	136
5.2	COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMA PROPOSTO E SISTEMA ATUAL.....	139
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS DE EXTINÇÃO.....	144
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS DE MECANISMO.....	146

5.5	COMPARAÇÃO ENTRE ESPÉCIMES DE MESMO MO- DELO .....	147
5.6	LISTA DE ENSAIOS EXCEPCIONAIS .....	151
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>153</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	155



## 1 INTRODUÇÃO

Os disjuntores são responsáveis pelas manobras com e sem carga nos sistemas elétricos de potência e capazes de extinguir correntes de curto-circuito em equipamentos como transformadores, linhas de transmissão, etc. Uma falha na operação de um disjuntor quando este deveria interromper uma falta em equipamento próximo, pode ter consequências catastróficas para o equipamento sendo protegido, para o próprio disjuntor, e inevitavelmente amplia a área a ser desligada para interrupção do defeito, prejudicando a seletividade do sistema de proteção.

A manutenção em equipamentos elétricos é uma das principais atividades de uma concessionária e o investimento na manutenção tem seu retorno com a melhoria dos indicadores de confiabilidade do sistema. Com o agente regulador buscando cada vez mais a modicidade tarifária, as concessionárias têm desenvolvido diversas ferramentas para reduzir os custos e as interrupções de energia. Cabe ao setor de manutenção de equipamentos elétricos promover a máxima vida útil do equipamento com o menor custo.

A Manutenção Baseada em Confiabilidade (MBC) ou *Reliability Centered Maintenance* (RCM) é definida pela norma SAE JA 1011 [1] e uma importante metodologia para nortear a periodicidade de manutenção de disjuntores, estabelecendo o mínimo de intervenção observando a condição do equipamento. No caso de disjuntores levam-se em consideração diversos aspectos, tais como o tipo de acionamento (mola, pneumático, solenoide, hidráulico, etc.), tipo de meio de extinção (pequeno volume de óleo, grande volume de óleo, hexafluoreto de enxofre, sopro magnético, vácuo, etc.), tipo de circuito no qual o disjuntor está instalado (geral de transformador, geral de banco de capacitor, entrada de linha, etc.) [2]. Por exemplo, um disjuntor instalado em um circuito de linha de transmissão tende a operar mais frequentemente que um disjuntor instalado em um circuito geral de transformador, portanto seu intervalo entre manutenções deve ser menor.

Tem se observado que levar em conta apenas as características principais dos equipamentos não é suficiente para se obter os indicadores necessários à programação da manutenção, pois existem fatores particulares de cada modelo ou lote de equipamentos de um determinado modelo que apresentam defeitos ou falhas semelhantes [3], como exemplo pode-se citar o desgaste de um anel de compressor de um dis-

juntor pneumático, a vedação de um acumulador hidráulico, defeitos de projeto em vedações, tipos de cimentações de polos que ocasionam corrosões alcalinas, etc. Muitos desses defeitos só são observados após muitos anos de instalação com a ação do tempo e desgaste das peças, sendo impossível prevêê-los nos moldes da manutenção baseada em confiabilidade e em muitos casos nem mesmo são citados em manuais como peças recomendadas para a substituição nas manutenções preventivas.

Com milhares desses equipamentos sendo atendidos por diversas equipes descentralizadas no campo de atuação da concessionária, fica difícil identificar essas falhas e acompanhar todos os defeitos descritos nas ordens de serviços das equipes, podendo passar despercebidos alguns defeitos que se correlacionam com outros detectados por outras equipes.

Defeitos simples como a falta de uma simples lubrificação que é reposta em campo, a reposição do meio isolante ou queima de um fusível, podem não despertar a atenção das equipes de campo, mas se forem um padrão de certo tipo de equipamento devem ser observadas para que sejam feitas preventivamente e não corretivamente através de intervenções de emergência com interrupção de cargas [4].

Os dados históricos de ensaios de manutenção preventiva em disjuntores podem fornecer dados sobre a evolução dos tempos de abertura e fechamento, sincronia dos polos, resistência dos contatos, resistência dielétrica do óleo, resistência de isolamento, número de operações, qualidade e pressão do hexafluoreto de enxofre, assinatura do mecanismo através do ensaio da corrente na bobina e assim, em conjunto com outros ensaios, indicar desvios de parâmetros com a evolução do tempo [5]. O ideal é que a data da manutenção não seja definida apenas por intervalo de tempo pré-estabelecido, mas a partir de informações específicas sobre o disjuntor (função, corrente de curto-circuito no ponto da instalação, mecanismo de abertura, meio e isolação, etc.) e de variáveis fornecidas por ensaios que não necessitem de desligamento, assim como informações provenientes de sistemas de monitoramento.

Por serem equipamentos essenciais à operação segura dos sistemas de energia e com tempo de reparo e substituição longos, não é possível aceitar que disjuntores operem até falhar, portanto é necessário também que se preveja a aproximação do fim da vida útil do equipamento e que se distingam as situações onde o equipamento pode ser mantido das situações onde é necessário planejar a sua substituição [6].

Um sistema dotado das ferramentas de inteligência artificial pode, a partir das informações de ensaios e de histórico de falha, avaliar a condição do equipamento e sinalizar para a engenharia de manutenção um padrão de defeito ou desvio da condição normal, que ainda não tenha ficado evidente e desta forma aumentar ou diminuir o intervalo de tempo previsto para a próxima manutenção.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O disjuntor é um equipamento fundamental para a subestação fazendo parte do sistema de proteção dos equipamentos mais vitais para o sistema elétrico tais como, geradores, linhas de transmissão, alimentadores e transformadores. Contudo não se encontram muitas publicações sobre sua manutenção e sistemas inteligentes de diagnósticos para estes equipamentos estando comumente associado a prática das concessionárias.

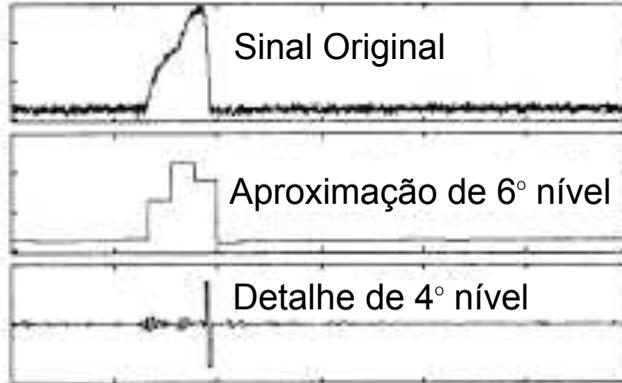
As primeiras pesquisas sobre falhas em disjuntores foram realizadas pelo CIGRÉ [7] entre 1974 e 1977 e os resultados apontaram para a predominância de defeitos originados por fatores mecânicos com 70 % do total. Entre 1988 e 1991 pesquisas fomentaram um novo relatório do CIGRÉ [8] sobre falhas em disjuntores com extinção por Hexafluoreto de Enxofre - ( $SF_6$ ), novamente destacando-se o mecanismo de operação como principal fonte de falhas, agora com cerca de 44 % do total. A redução elevada de 70 % para 44 % pode ser melhor compreendida levando em conta que na última pesquisa do CIGRÉ foram considerados apenas disjuntores a  $SF_6$ , e essa tecnologia de extinção exige menos energia para extinguir o arco elétrico, reduzindo esforços nos componentes dos mecanismos e conseqüentemente suas falhas.

Diagnosticar problemas em disjuntores não é elementar para implementação em programas computacionais devido à elevada confiabilidade destes equipamentos (dificuldade de elaboração de estudos sobre falhas frequentes) e aos avanços tecnológicos que trazem diversas particularidades para interpretação de um mesmo defeito. Como exemplo, um ensaio de tempo de operação que obteve valores elevados para um disjuntor que emprega mola no seu mecanismo, possivelmente isto seja causado por problemas de lubrificação. Por outro lado estes tempos são muito reduzidos em disjuntores hidráulicos por possuírem menos partes móveis lubrificadas e expostas ao ambiente. Outro exemplo pode ser a

elevada resistência de contato, que em disjuntores a óleo possivelmente esteja ligada ao acúmulo de óleo nos contatos internos à câmara, enquanto que em disjuntores a vácuo ou  $SF_6$  é mais provável que seja devido à oxidação no contato externo à câmara. No primeiro caso seria necessário uma intervenção maior com abertura de câmara, substituição do óleo e no segundo uma simples e rápida limpeza externa.

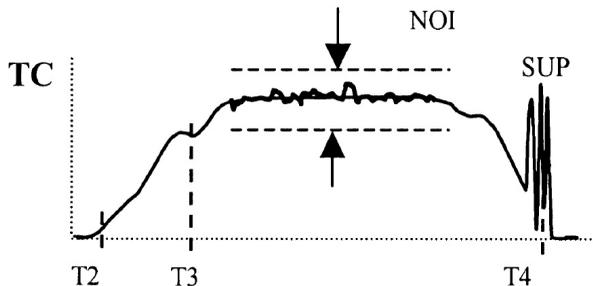
Sistemas de monitoramento em tempo real podem agregar diversas informações relevantes para a manutenção como: pressão do  $SF_6$ , forma de onda da corrente nas bobinas, tempos de operações através de oscilografias de cada abertura do disjuntor, desgastes dos contatos, análise de vibração, etc. e têm sido estudados e implantados em diversos casos. Entretanto, a viabilidade econômica é uma questão sempre levantada e a aplicação e escolha do detalhamento necessário acaba se restringindo a alguns disjuntores dentro do parque da concessionária, normalmente em circuitos críticos. Com o consumo de energia elétrica avançando muitas vezes mais rápido que os investimentos, os desligamentos ou redução da confiabilidade do sistema se tornam cada vez mais dispendiosos, sendo necessário assumir o risco calculado de prolongamento do intervalo entre manutenções.

Em [5] aborda-se o monitoramento das correntes nas bobinas do disjuntor utilizando a análise de *wavelets* para determinar automaticamente 10 principais tempos envolvidos durante a operação do disjuntor, na Figura 1 é apresentada a forma de onda original da corrente na bobina e as formas obtidas após a utilização das *wavelets*. A Figura 2 ilustra os tempos extraídos da forma de onda da corrente na bobina durante a abertura do disjuntor, sendo: T2 - Tempo no qual iniciou o pulso da bobina, T3 - Tempo no qual o gatilho liberou o mecanismo principal, T4 - Tempo no qual a bobina é desenergizada, NOI - referente ao ruído do sinal e SUP - referente a corrente de surto após abertura da bobina. Após essa análise e estimativa dos tempos que envolvem: corrente na bobina que possui forma característica apresentada na Figura 2, corrente nos contatos auxiliares do disjuntor, correntes nas fases do disjuntor e outros pontos monitorados no circuito de comando é criada uma base de dados de entrada que é analisada por um sistema especialista composto de 99 regras, desenvolvido no *software* de domínio público CLIPS e depois encapsulado em *Dynamic-Link Library* (DLL). As regras mais simples são disparadas pela comparação dos tempos com o padrão e a tolerância aceitável e quando combinadas podem identificar defeitos mais complexos no disjuntor. A saída do programa fornece

Figura 1: Utilização de *wavelets* na corrente da bobina

Fonte: [5]

Figura 2: Corrente na bobina



Fonte: Baseado em [5]

dados para a interface gráfica do *software* e os dados são armazenados em dois locais distintos, na subestação e no repositório. Os dados ainda podem ser acessados por aplicativo através da internet, nele constam os principais tempos, os gráficos de corrente com possibilidade de comparação com outros disjuntores e o resultado do sistema especialista. Para a parametrização do sistema especialista são levados em consideração os valores padrões, tolerâncias, limites máximos, fabricante e modelo e algumas alterações nas regras que forem necessárias.

Na avaliação desse sistema percebe-se bom comportamento para

disjuntores do mesmo fabricante que possuem a mesma característica de corrente na bobina, em 70% dos casos houve ruído no sinal, baixa ocorrência de problemas graves e a limitação do sistema especialista de possuir detecção restringida somente aos problemas já relatados.

Para implementação de um sistema semelhante ao descrito em [5] é necessário desenvolver *hardware* e *software* específicos. Além de depender do sistema de comunicação para o bom funcionamento, para instalação do *hardware* é necessário a retirada do disjuntor de operação, contudo uma vez instalado não são mais necessárias intervenções para aquisição dos dados. O bom funcionamento da ferramenta requer do histórico para base de comparação e sua função é evitar interrupções de energia originadas por defeito ou por manutenções desnecessárias, monitorando adicionalmente o desempenho do disjuntor. Sua principal vantagem é o monitoramento do mecanismo do disjuntor, colhendo informações vitais para diagnosticar defeitos oriundos da baixa frequência de operação de alguns disjuntores que podem muitas vezes não apresentar repetibilidade após a primeira operação. A avaliação do dielétrico e do estado dos contatos não é abordada nesse sistema que necessita ser complementado com outras fontes de dados para o completo diagnóstico do disjuntor.

Abordagem semelhante ocorre em [9], utilizando assinatura do mecanismo por meio do monitoramento da corrente nas bobinas, contudo a principal abordagem é no sistema inteligente que permite o agrupamento dos resultados do monitoramento visando identificar características de um mesmo modelo de disjuntor. Cada mecanismo possui uma característica (assinatura) e modelos iguais possuem assinaturas semelhantes que podem ser consideradas como referência para os demais disjuntores.

Na avaliação das características dessa assinatura são envolvidos 5 parâmetros durante um acionamento da bobina. A primeira fase consiste da obtenção dos dados e avaliação desses tempos, separando em grupos distintos de mesma característica de forma de onda. Na segunda etapa um algoritmo age sobre cada grupo analisando as redondezas dos valores, identificando os 5 tempos que serão avaliados e separados em 3 grupos (normal, defeito e falta) de acordo com preceitos definidos pelos especialistas. Na etapa final os tempos subsidiam um sistema especialista que sugere os possíveis defeitos que podem ser identificados por esta ferramenta.

Utilizando também *wavelets* para análise multirresolução[10], são

apresentados em [11, 12, 13, 14] formas para obtenção dos tempos de abertura do disjuntor e de extinção do arco, contudo a corrente analisada pelo algoritmo passa a ser proveniente dos transformadores de corrente instalados no circuito principal do disjuntor. Para a boa resolução e desempenho do algoritmo a amostragem dessas correntes deve ser mais elevada que as encontradas na maioria dos relés de proteção. Um registrador digital de perturbação (oscilopertubógrafo) com taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo pode prover os dados para o algoritmo.

Encontrar o ponto ótimo para realizar a manutenção envolve muitos aspectos, inclusive, alguns não tão fáceis de mensurar, como a satisfação do cliente da concessionária frente a interrupções de energia programadas ou não programadas. A confiabilidade do sistema é essencial e o custo de manutenção tem se tornado um fator importante para as empresas na gerência da manutenção.

Em [15] e [16] o custo da manutenção aliado às informações de sensores que fornecem o estado de equipamentos instalados nas redes de distribuição inteligentes, mais comumente conhecida como *smart-grid*, são utilizados para sugerir o agendamento das manutenções através de um sistema empregando lógica *fuzzy* para tomada de decisão, objetivando a máxima entrega de energia e o mínimo custo de operação. A lógica *fuzzy* é empregada para cálculo da confiabilidade, que leva em consideração as variações dos parâmetros: probabilidade de falha e tempo médio para falha, que são consequentemente dependentes dos dados provenientes da *smart-grid* tais como: idade, carga e temperatura. Com as medições constantes, imprevistos e alterações na rede, como por exemplo aumento de carga em um determinado ramal, alteram o planejamento da manutenção prevendo um envelhecimento acelerado, que nesse caso origina da degradação do isolamento do transformador devido a elevação de temperatura do óleo originada através do aumento de corrente no ramal. A avaliação econômica é realizada levando em consideração o custo da energia não atendida, custo de falha e custo operacional servindo de parâmetros para a predição de uma data para a manutenção.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional que se assemelhe ao raciocínio humano, utilizando para essa finalidade um sistema inteligente baseado em lógica *fuzzy*, tendo como dados de entrada um banco de dados de ensaios realizados em manutenções preventivas, valores de referências, dados específicos sobre o equipamento e históricos das manutenções corretivas, fornecendo ao usuário dados relevantes de forma que seja possível a sugestão de uma data para a próxima intervenção e alertas para os equipamentos que estejam com os valores fora da faixa de aceitação.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação se divide em 6 capítulos. Aspectos construtivos dos principais tipos de disjuntor constam no capítulo 2. Alguns ensaios para disjuntores e valores de referência bem como as normas aplicáveis encontram-se no capítulo 3. O sistema de apoio à manutenção desenvolvido utilizando lógica *fuzzy*, juntamente com as considerações necessárias para sua parametrização constam no capítulo 4. Algumas comparações entre os resultados obtidos do sistema proposto e o sistema existente hoje na COPEL e observações da resposta do sistema aos dados de entrada são apresentadas no capítulo 5. As conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos propostos são apresentadas no capítulo 6.

## 2 DISJUNTORES

### 2.1 INTRODUÇÃO

Parte fundamental do sistema de proteção tanto de equipamentos em subestações como linhas de transmissão e distribuição, os disjuntores de alta tensão tiveram sua primeira aparição no início do século XX. Um dos primeiros disjuntores foi desenvolvido pela J.N. Kelman em 1901 e sua primitiva construção consistia de dois barris de madeira preenchidos com uma mistura de óleo e água na qual os contatos ficavam imersos. O disjuntor operou por cerca de dois anos em uma rede de 40 kV e sua capacidade de interrupção de corrente de curto era entre 200 e 300 A [17].

Com o consumo de energia aumentando, a expansão da rede e suas interconexões com outros sistemas elétricos foi inevitável, exigindo dos disjuntores suportabilidade a maiores níveis de corrente de curto-circuito e tempo de extinção cada vez menor, de forma a garantir a estabilidade do sistema. Esses fatores impulsionaram a pesquisa de novas tecnologias aplicáveis a disjuntores, reduzindo a duração do arco de 20 ciclos em disjuntores a óleo, para até 2 ciclos nos atuais disjuntores [18].

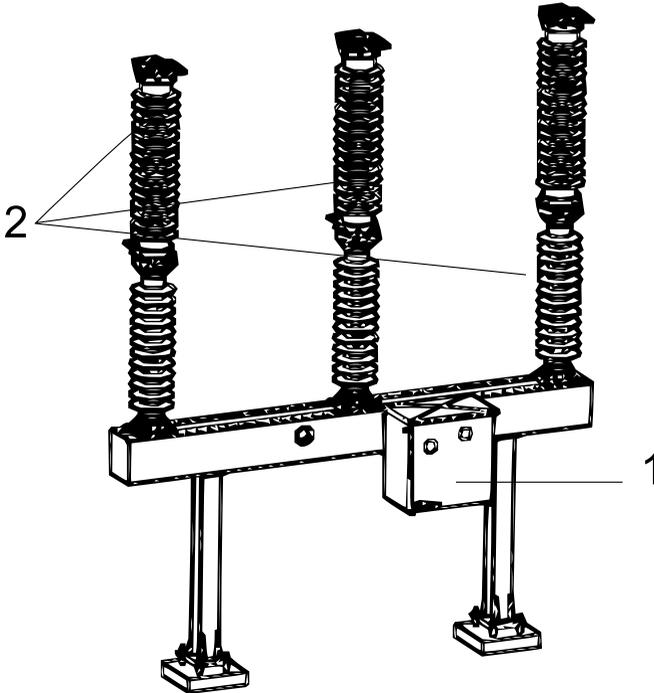
Os disjuntores são usualmente classificados levando em consideração suas características técnicas construtivas e então agrupados quanto ao seu nível de tensão, tipo de instalação, tipo de mecanismo e principalmente pelo meio de extinção da corrente. Os disjuntores podem ser divididos em duas grandes e importantes partes, mecanismos e polos. Na Seção 2.2 são descritas as principais partes de um disjuntor e na Seção 2.3 são descritos os principais tipos de disjuntor, classificados de acordo com os meios de extinção do arco.

### 2.2 PRINCIPAIS PARTES DE UM DISJUNTOR

As duas principais partes de um disjuntor, polos e mecanismo, possuem características completamente diferentes. O polo é responsável por extinguir o arco enquanto o mecanismo deve prover a energia necessária para realizar a movimentação dos contatos em um tempo adequado. Apesar das suas diferenças, polos e mecanismos

precisam ser projetados conjuntamente, adequando as necessidades técnicas de capacidade de extinção com as econômicas no desenvolvimento de mecanismos capazes de atendê-las.

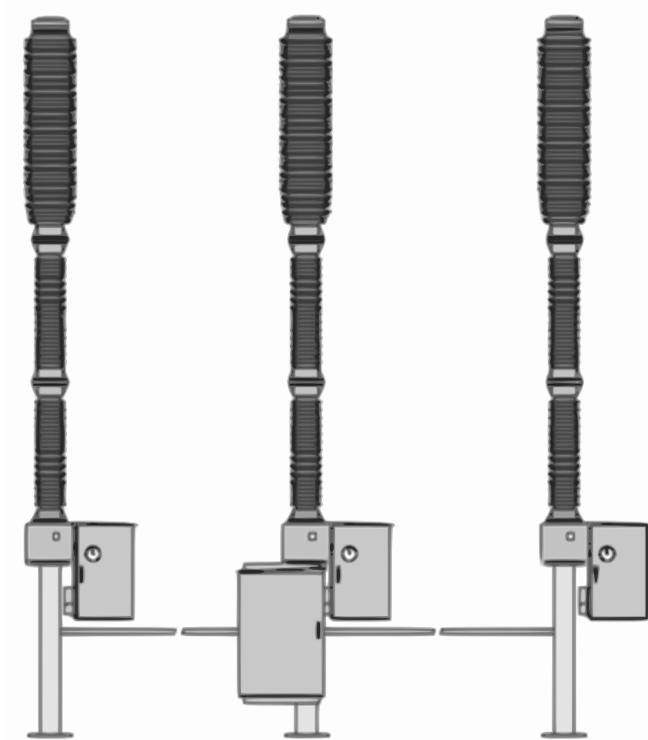
**Figura 3: Principais partes do disjuntor tripolar**



Fonte: [19]

Na Figura 3 são indicados o mecanismo em 1 e os polos em 2. Todos os polos são acionados pelo mesmo mecanismo e a transmissão do movimento é realizada através de hastes, definindo dessa forma um disjuntor tripolar. No caso da Figura 4 é apresentado um disjuntor monopolar, cada polo pode agir independentemente sendo necessário para tanto mecanismos individuais por polo. Os disjuntores monopolares são comuns em tensões superiores a 230 kV, mas existindo a necessidade também podem ser utilizados em tensões menores.

Figura 4: Principais partes do disjuntor monopolar



Fonte: [20]

### 2.2.1 Polos

Independente da tecnologia empregada, o polo pode ser dividido ainda em algumas partes, como ilustra a Figura 5: câmara de extinção (1), contato fixo (2), contato móvel (3) e haste isolante (4). Apesar da ilustração representar um polo de disjuntor  $SF_6$  tanque vivo (*live tank*) e possuir diversas particularidades em seu projeto, as partes principais são encontradas na grande maioria dos disjuntores.

A câmara de extinção é responsável por confinar o arco elétrico, impedindo que evolua para as demais partes do disjuntor. Nela também estão: o meio extintor (óleo,  $SF_6$ , vácuo, ar, etc.), o contato fixo e o móvel. Normalmente é confeccionada de material isolante e resistente a

**Figura 5: Principais partes de um polo**

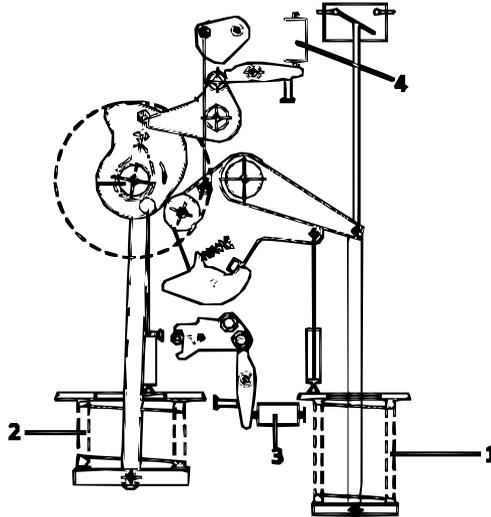
Fonte: [19]

altas temperaturas. A conexão com o sistema elétrico de alta tensão é realizada pelo contato fixo. Sua função é fornecer um caminho de baixa impedância entre uma extremidade da câmara de extinção e outra. O material empregado na sua confecção deve ser capaz de conduzir as correntes nominais e de curto sendo muito utilizado o cobre e alumínio na sua parte externa ao disjuntor. Internos ao disjuntor e sujeitos à ação do arco bem como a deterioração do meio isolante, materiais mais nobres como prata podem ser empregados. O contato fixo pode ainda possuir duas segmentações, uma destinada à transferência de corrente denominada de contato principal, outra para suportar o arco durante a extinção, conhecida como contato de arco. Semelhante ao contato fixo, o contato móvel é movimentado pela haste isolante quando o mecanismo é acionado e normalmente também possui os contatos principais e de arco.

### 2.2.2 Mecanismo

Existem diversos tipos e formas de mecanismos de disjuntores e diferentes maneiras de armazenar a energia necessária para efetuar, pelo menos, uma sequência de abertura, fechamento e abertura. Mesmo

Figura 6: Principais partes do mecanismo



Fonte: [20]

distintos, os mecanismos apresentam alguns dispositivos comuns que podem ser observados na Figura 6 como: acumulador de energia (1) e (2), bobina de abertura (3), bobina de fechamento (4).

O acumulador de energia pode ser considerado o principal componente do mecanismo e o que possui a maior variedade de tecnologias. Sua função é prover energia aos polos para efetuar os movimentos de abertura e fechamento dentro de um tempo determinado. O mais importante movimento é o de abertura, que deve levar o menor tempo possível para evitar maiores danos aos equipamentos e à estabilidade do sistema. A energia acumulada pode ser provida de diversas formas. Na hidráulica uma bomba de óleo pressuriza o fluido contra um gás que fica comprimido e conforme forem as operações o gás desloca o óleo no sentido desejado (abertura ou fechamento). Os disjuntores com mecanismo pneumático agem de maneira semelhante aos hidráulicos, porém a bomba de óleo e o fluido são substituídos por um compressor e ar, respectivamente. Nos mecanismos a mola podem existir várias combinações de número e forma de molas. Na grande maioria desses mecanismos as combinações mais comuns são: somente com mola espiral, mola espiral e helicoidal, uma para cada movimento (abertura

e fechamento) e mecanismos só com molas helicoidais. As molas de fechamento são normalmente maiores e mais robustas, pois devem ser capazes de movimentar todo o mecanismo e ainda carregar a mola de abertura, possibilitando dessa maneira a operação de abertura, fechamento, abertura sem a necessidade de recarregamento das molas. Assim como nos polos algumas variações de mecanismos também existem. Como exemplo existe um curioso mecanismo, inserido no próprio polo, que utiliza diferenças de pressão entre duas câmaras de  $SF_6$  para fazer os movimentos de abertura e fechamento [21].

Simples, mas de extrema importância, as bobina de abertura e de fechamento possuem construções análogas, uma vez que suas funções se assemelham, ou seja, receber o comando elétrico e liberar a energia do acumulador de energia para que o movimento se inicie. Em alguns casos as bobinas (abertura e fechamento) podem ser intercambiáveis por possuírem a mesma potência e sistema de disparo, contudo em alguns modelos podem existir diferenças, normalmente na de abertura com mais potência para reduzir o tempo entre o sinal de disparo e o tempo final de abertura dos polos. Sua importância leva a alguns usuários a utilizarem sistemas de monitoramento para alertar quando as bobinas podem apresentar defeitos. Sistemas de monitoramento mais complexos utilizam a forma de onda da corrente na bobina para concluir a respeito da condição do mecanismo.

### 2.3 MEIOS DE EXTINÇÃO

O meio de extinção é o principal responsável por garantir que o disjuntor possa cumprir as especificações de interrupção de corrente nominal e corrente de curto-circuito. Um bom meio de extinção caracteriza-se por possuir principalmente grande capacidade de resfriamento do arco, alto valor de rigidez dielétrica, manter suas características mesmo a altas temperaturas e, obviamente, não ser combustível.

Na grande maioria das aplicações o óleo mineral isolante, ar,  $SF_6$  ou vácuo são empregados como meio de extinção. Alguns outros meios de extinção, como o ar comprimido, foram vastamente aplicados no passado, principalmente nas redes de transmissão na qual o óleo já não era a melhor opção. Embora existam outros tipos de disjuntores além dos relacionados, estes não serão citados pois não fazem parte do

escopo deste trabalho.

No início do século XX até a década 50 o óleo mineral isolante prevaleceu como meio extintor em grande parte dos disjuntores. A aplicação de ar comprimido iniciou-se na Europa na década de 20. Consolidou-se na década de 50 cobrindo os níveis de tensão extremamente altos que os disjuntores a óleo não conseguiam atender, chegando a ser empregado em redes de 765 kV na Rússia. Somente com o advento do  $SF_6$  é que passou a ser obsoleto. Nos últimos anos o vácuo vem crescendo no segmento de média tensão e já experimenta níveis de 138 kV [22].

Disjuntores com várias décadas de serviço, mesmo possuindo meios de extinção já obsoletos, ainda são facilmente encontrados nas concessionárias. A busca pela modicidade tarifária faz com que as equipes de manutenção estendam seu uso através da reciclagem e substituição dos meios isolantes, que são acompanhados através dos ensaios contidos nos programas de manutenção de cada empresa [18].

### 2.3.1 Disjuntor a Óleo

Um dos principais meios de extinção é o óleo mineral isolante, seu surgimento é contemporâneo ao primeiro disjuntor construído em 1901. O acompanhamento das propriedades do óleo em serviço é de grande importância, pois o arco elétrico pode degradar o óleo isolante a ponto de levar o disjuntor a uma falha de isolamento. Mesmo sendo de conhecimento que o arco elétrico reduz significativamente a tensão de ruptura e eleva os fatores de perda, existem poucos estudos do efeito do arco no desempenho dos líquidos dielétricos [23].

Um óleo novo deve consistir inteiramente de hidrocarbonetos saturados, principalmente parafínicos e naftênicos podendo apresentar pequenas quantidades de aromáticos saturados [24].

O óleo naftênico derivado do petróleo está presente em quase todos os disjuntores que utilizam óleo como meio extintor. Ele é caracterizado por possuir uma excelente rigidez dielétrica, boa condutividade térmica e grande capacidade térmica. Além de ser utilizado como meio extintor, muitos disjuntores o usam também como isolante das partes vivas como é o caso dos disjuntores de tanque morto. Uma rápida avaliação acerca da qualidade do óleo pode ser realizada observando sua cor e transparência. Um óleo em bom estado apresenta cor clara e boa

transparência, já em um óleo deteriorado a carbonização é responsável pela alteração para a cor preta e sua opacidade. O ensaio de rigidez dielétrica do óleo é utilizado para melhor avaliar suas condições [17].

Longos arcos elétricos são difíceis de serem controlados e na maioria dos casos levam a grandes períodos de faiscamento. A duração do arco e seu comprimento assim como seu comportamento são afetados por fatores como: tipo de câmara e velocidade de abertura, sendo questões muito complexas de serem previstas ou simuladas no projeto da câmara do disjuntor, que deve se basear portanto em seus máximos valores de corrente de curto [25].

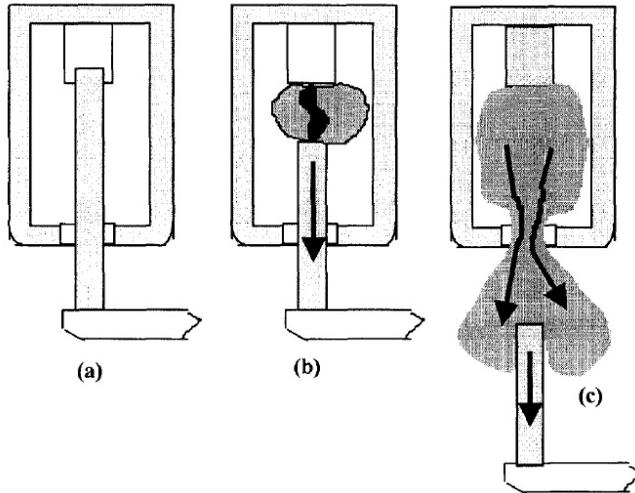
A carbonização é resultante da alta temperatura que o arco elétrico alcança no momento em que os contatos do disjuntor iniciam sua separação. Essa alta temperatura que pode alcançar valores de 5.000 a 15.000 K sobreaquecendo o óleo e formando gases, liberando elétrons e formando íons. A composição dos gases oriundos da extinção no óleo isolante é aproximadamente de 60 a 80 % de hidrogênio, 20 % de acetileno o restante são pequenas proporções de metano e outros gases. Essa mistura de gases envolve o arco elétrico e é responsável pela queda de temperatura que chega a valores entre 500 a 800 K auxiliando a desionização do arco [26].

A extinção do arco se dá pela turbulência do óleo na câmara aliada ao alongamento do arco elétrico e o aumento da pressão produzida pelo aquecimento do óleo na região do arco.

Os primeiros disjuntores a óleo não possuíam uma câmara de extinção e o arco era extinto sem nenhum tipo de confinamento, sendo somente restrito pelas paredes do disjuntor. Esse tipo de tecnologia ficou limitada a sistemas de 15 kV e correntes de falta de no máximo 200 A. A adição da câmara de extinção a esses disjuntores fez com que o arco ficasse confinado contendo a bolha de hidrogênio que auxiliava na melhor extinção do arco. A câmara de extinção era um corpo cilíndrico com um orifício ao centro pelo qual o contato móvel encontrava o contato fixo, como na Figura 7. Sua primitiva construção não suportava os grandes valores de pressão que os elevados níveis de corrente de curto proporcionavam, o que podia levar à destruição da câmara [17].

As câmaras de sopro transversal, ilustrada na Figura 8, surgiram na sequência e sua estrutura é composta por pastilhas isolantes que permitiam um caminho restrito para o arco. O projeto permitia que a pressão gerada durante a extinção impulsione o arco contra as paredes frias e ao mesmo tempo que ocorria o resfriamento, o alonga-

Figura 7: Câmara primitiva. (a) Contato Fechado (b) Início do arco com a separação dos contatos (c) Escape de gases da câmara



Fonte: [17]

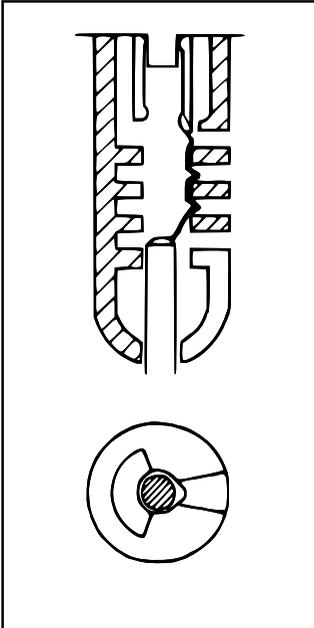
mento também contribuía na extinção. A evolução da câmara de sopro transversal foi o sopro axial, utilizando a mesma técnica desenvolvida no sopro transversal. Nesta nova versão, a modificação nas pastilhas permitia não somente um caminho para o arco, mas vários, melhorando ainda mais a extinção, como apresentado na Figura 9 [27].

### 2.3.1.1 Grande Volume de Óleo - GVO

Seu uso foi mais intensificado quando os disjuntores que utilizavam o sistema de ar comprimido para extinção já não atendiam os níveis de tensão que eram necessários pois ocupariam muito espaço nas subestações.

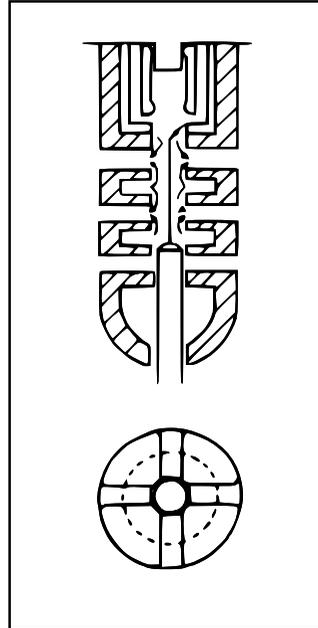
Os disjuntores a grande volume de óleo são caracterizados por utilizarem o óleo tanto como isolante das partes ativas como para a extinção do arco elétrico. Utilizando-se esse princípio é possível encontrar dois tipos de construção: no primeiro e mais comumente encontrado, todas as fases estão em um mesmo tanque, no segundo, cada fase fica em um tanque isolado. Em ambos os casos essas características re-

Figura 8: Câmara de extinção de sopro transversal



Fonte: [27]

Figura 9: Câmara de extinção de sopro axial



Fonte: [27]

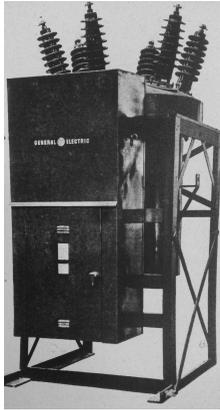
metem aos disjuntores *dead tank* ou tanque morto, que possuem essa denominação devido ao fato de que o envólucro do polo está aterrado.

Na década de 60 o Canadá possuía 73% dos disjuntores de seu parque apresentando apenas um tanque (*single tank*) ao invés de três e esse número foi se elevando à medida que esses últimos eram substituídos [28]. Alguns benefícios foram percebidos, dentre eles o baixo custo de instalação, baixo custo de relocação e fácil e baixo custo de manutenção. Mesmo não tendo suas fases separadas por tanques distintos, a falha em uma câmara não impactava em danos significantes nas câmaras adjacentes nos disjuntores *single-tank*.

A área ocupada por esses disjuntores era reduzida e a porta de acesso ao mecanismo nos disjuntores *single-tank* ocupava menos espaço que nos disjuntores *3-tank* em que o mecanismo se localizava adjacente aos polos, como podem ser observado comparando as Figuras 10 e 11.

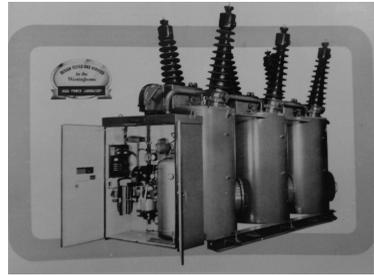
Por possuir apenas uma câmara seu mecanismo era mais simples utilizando menos hastes e acoplamentos, além disso nas manutenções as partes eram de fácil acesso e identificação. A fábrica podia despachar o *single-tank* mais rapidamente reduzindo o prazo de entrega e a quantidade de óleo empregado era equivalente ao *3-tank*, não sendo observados maiores problemas de contaminantes no óleo devido à opção de construção, nem diferente índices de falhas [28]

**Figura 10: Disjuntor GVO *single-tank***



Fonte: [29]

**Figura 11: Disjuntor GVO *3-tank***



Fonte: [30]

O volume de óleo empregado nos disjuntores GVO varia entre 200l e 50.000l sendo encontrados mais comumente até níveis de tensão de 72,5 kV, mas atendendo também ao sistema de 230 kV.

Para sustentar tanta massa é necessário que haja um projeto de base adequado, levando em consideração também os esforços exigidos durante as interrupções, que podem chegar a 4 vezes o valor do peso total do disjuntor [17].

O tanque é aterrado mantendo-o ao potencial de terra, por isso é necessário a utilização de buchas que façam a transição do isolamento ar-óleo. Seu tamanho permite a instalação de transformador de corrente (TC) nas buchas, os quais ficam imersos em óleo e integram parte da proteção. Para movimentar os contatos um forte mecanismo de acionamento é necessário e diversas tecnologias são empregadas ou combinadas para executarem as operações de abertura e fechamento, dentre elas podem ser citadas mola, pneumático, solenoide e hidráulico.

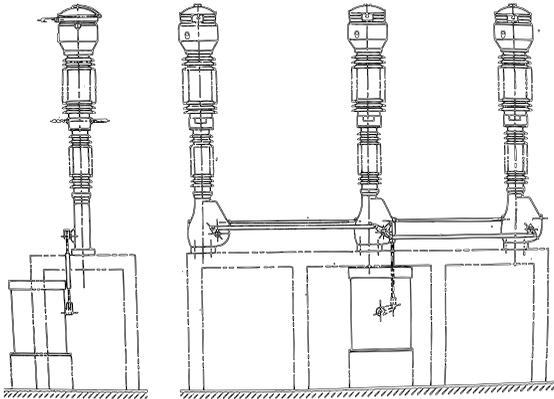
A manutenção em disjuntores GVO exige o acompanhamento da rigidez dielétrica do óleo, filtragem com razoável frequência, sendo necessário, em alguns casos, o emprego de caminhões tanque para armazenar o óleo carbonizado que irá para tratamento, assim como para deslocar vultosos volumes de óleo aplicados na manutenção desses disjuntores [27].

Alguns materiais como o papel, papelão e madeira são empregados nas câmaras de extinção e estão sujeitos às altas pressões e temperaturas originadas nos processos de extinção do arco, exigindo inspeções visuais frequentes com a retirada do óleo, o que demanda bastante tempo das equipes de manutenção.

### 2.3.1.2 Pequeno Volume de Óleo - PVO

O preço do óleo e o tamanho do GVO foram alguns dos fatores que popularizaram os disjuntores do tipo PVO. Nesse tipo de disjuntor o óleo é usado somente para extinção e a isolação fica a cargo de algum material isolante, normalmente porcelana ou fibra de vidro, caracterizando então um disjuntor do tipo *live tank* [17].

**Figura 12: Disjuntor PVO**

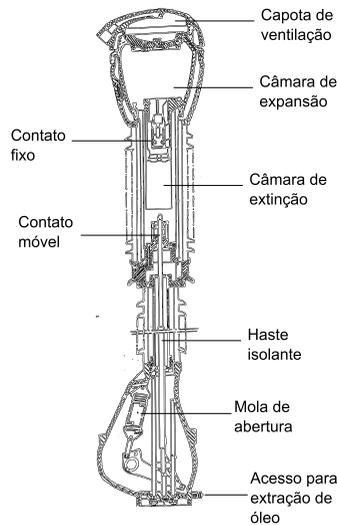


Fonte: [31]

Como elucidada a Figura 12, o disjuntor do tipo PVO é esbelto e cada câmara é alojada em um polo individual. A quantidade de óleo utilizado é 20 % da utilizada nos GVO porém não se encontra TC junto

ao disjuntor. O polo pode ser dividido em duas partes, na primeira se encontra a câmara de extinção e na segunda fica a haste isolante que faz a conexão entre o mecanismo e o contato móvel, como pode ser observado na Figura 13. Tanto na primeira como na segunda o óleo é encontrado, porém na segunda o óleo não faz parte do sistema de extinção, ficando principalmente para dar longevidade ao isolante da haste, isolando da umidade do meio ambiente [27].

**Figura 13: Polo PVO em corte**



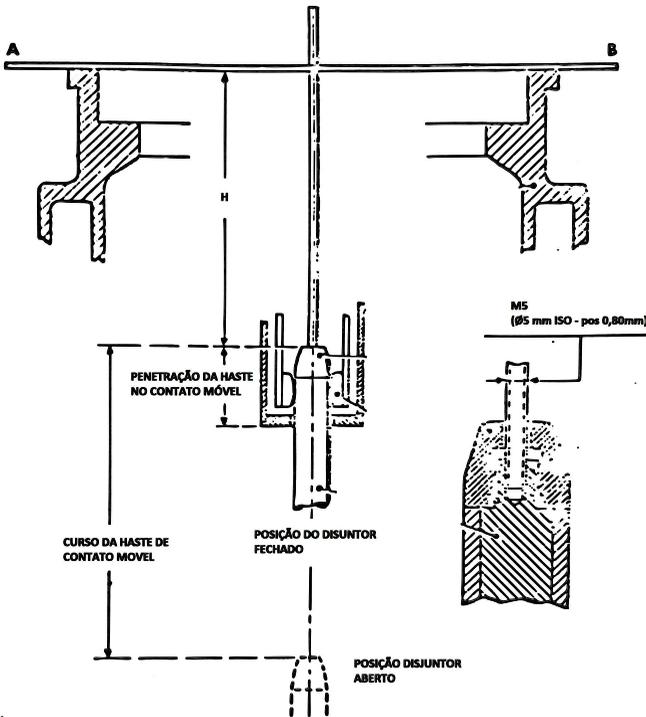
Fonte: [31]

O mecanismo mais encontrado em disjuntores PVO é o que emprega mola e normalmente está situado abaixo do polo central. O polo possui uma câmara de expansão e capota de ventilação, necessária para a exaustão dos gases oriundos da extinção. O controle do nível do óleo é realizado através de um indicador de nível de óleo e seu acompanhamento é importante para identificar vazamentos e a qualidade do óleo através de uma avaliação visual. Muitos desses disjuntores apresentam dois acessos para extração de óleo, o primeiro na base da câmara de extinção e outro na base do polo. Os acessos independentes visam minimizar a quantidade de óleo que será degradado nas interrupções e também na hora da sua substituição. Apesar de estarem interconectados através de um pequeno orifício que mantém o nível igual em ambos

os compartimentos, o óleo da câmara dificilmente se mistura com o óleo para isolamento. É comum encontrar óleo com diferentes valores de rigidez dielétrica, e algumas vezes a substituição de óleo de apenas um desses acessos, normalmente o da câmara de extinção, é suficiente para restabelecer a rigidez dielétrica do óleo.

Os contatos sofrem erosão durante as interrupções e a abertura da câmara para inspeção e substituição dos contatos é necessária com frequência. Os desgastes dos contatos podem ser avaliados através da medida da altura entre a parte superior do disjuntor e a ponta do contato móvel, normalmente esse valor é indicado nos manuais e varia conforme o projeto de cada fabricante, na Figura 14 é apresentado um exemplo da forma como é feita a avaliação.

Figura 14: Avaliação do desgaste do contato



Fonte: [31]

Abaixo da câmara de extinção existe a haste isolante conectando

o contato móvel à haste principal e na parte mais inferior não é raro encontrar molas de abertura que auxiliam na abertura do disjuntor. Borra de óleo e muito óleo carbonizado pode ser extraído da base do disjuntor e em caso de má vedação na câmara de extinção, razoáveis quantidades de água também são observadas. Na substituição do óleo é aconselhável circular óleo diversas vezes para retirar resíduos acumulados entre as pastilhas e no caso de uma desmontagem da câmara todo o material isolante deve ser acondicionado em estufa, sendo necessária a circulação de óleo quente no caso de observância de baixos valores de isolamento.

A manutenção em disjuntores PVO é mais rápida, simples e barata quando comparada ao GVO, porém problemas com vedação, vazamento e merejamento (micro vazamento de óleo que se apresenta na forma de mancha) ocorrem com mais frequência principalmente no reentor existente na alavanca que conecta a haste principal (que fica exposta ao meio ambiente) com a haste isolante que se conecta ao contato móvel. Raios UV aliados a longos períodos sem uma intervenção mais minuciosa contribuem para a deterioração da vedação e conseqüentemente o surgimento de vazamentos na área do visor de nível de óleo. No mecanismo os cuidados consistem em manter boa e não excessiva lubrificação, verificando os tempos de operação e ruídos durante o carregamento da mola.

### 2.3.2 Disjuntor a Hexafluoreto de Enxofre - $SF_6$

Composto de seis moléculas de flúor e uma de enxofre, o  $SF_6$  forma uma estrutura octaédrica e não é encontrada nessa forma na natureza, tendo sido sintetizada pela primeira vez em 1900 na Faculdade de Farmacologia de Paris. Apesar disso, somente no final da década de 30 é que a *General Electric Company* começou seus estudos para aplicação na indústria. Seu uso nos disjuntores data da década de 60 [2].

Dentre as características que o  $SF_6$  possui, pode-se ressaltar que em condições normais de temperatura e pressão sua rigidez dielétrica supera o dobro da do ar, apresenta alta eletronegatividade e devido à baixa viscosidade, uma alta capacidade de transferência de calor. Essas características o tornam um excelente meio isolante. Além disso, por ser inodoro, incolor, não inflamável, quimicamente inerte e, apesar de

prejudicar a camada de ozônio, o  $SF_6$  puro não é tóxico para a saúde dos seres humanos e sua manipulação não exige cuidados excessivos com a saúde. Porém, em alguns casos, as altas temperaturas ocorridas durante a extinção do arco são capazes de desfazer as ligações químicas que ficam susceptíveis à recombinação com outras moléculas que por ventura existam na câmara criando diversos subprodutos. Alguns desses subprodutos são ácidos e podem causar irritação na pele e problemas respiratórios, assim como atacar a porcelana, flange, vedações e outras partes do disjuntor [17].

Além dos problemas dos subprodutos do  $SF_6$ , sua forma original é extremamente prejudicial para o meio ambiente atacando a camada de ozônio. Para o efeito estufa o  $SF_6$  é aproximadamente 23.000 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono, razão pela qual diversas concessionárias tem o máximo cuidado em querer mitigar a fuga desse gás para o meio ambiente. Novas técnicas para monitorar, gerir a manutenção e prolongar a vida útil das vedações têm sido desenvolvidas com esse objetivo, assim como a manipulação e reciclagem desse gás através de máquinas de tratamento específicas. A falta de padronização mundial para válvulas nos cilindros e nos equipamentos contribuem para a dificultar ainda mais a correta manipulação do  $SF_6$  pelas equipes de manutenção dada a grande variedade de modelos de equipamento existentes nas concessionárias.

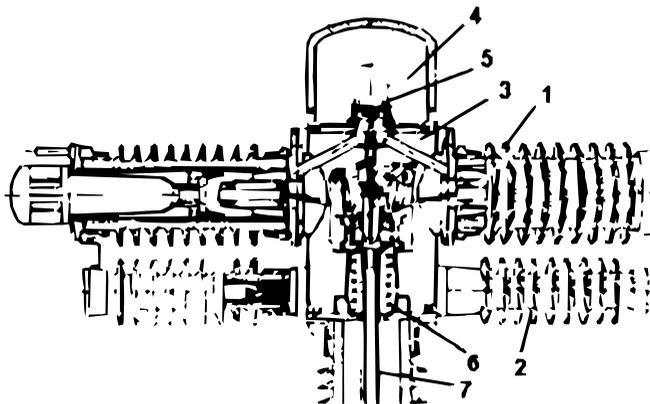
### 2.3.2.1 Disjuntores de Dupla Pressão

Atualmente o  $SF_6$  é o principal meio isolante em disjuntores de alta e extra alta tensão abrangendo também, mas em menor volume, os disjuntores de média tensão que hoje são de domínio da tecnologia a vácuo, detalhada na Seção 2.3.3. Os primeiros equipamentos utilizavam a tecnologia de dupla pressão, semelhante à aplicada nos disjuntores ar comprimido.

Nesse primórdio o gás da câmara era mantido a uma baixa pressão e tinha o objetivo de manter a isolação das partes ativas. Em um cilindro separado outra parte do  $SF_6$  era armazenado a alta pressão e se comunicava com a câmara sendo injetado diretamente na região na qual o arco se formaria, assumindo assim a função de meio extintor. Após a operação de abertura o gás era bombeado novamente ao acumulador de alta pressão e ficava disponível para a nova interrupção [17].

Durante o processo de abertura do disjuntor a separação dos contatos tem sua origem com o deslocamento da barra isolante (item 7 da Figura 15) que também aciona um mecanismo liberando o gás armazenado no reservatório (item 4 da Figura 15) através da abertura da válvula de sopro (item 5 da Figura 15) disponibilizando  $SF_6$  a alta pressão, cerca de 2,5 MPa, que é aplicado de forma axial na câmara (item 1 da Figura 15) que possui pressão em torno de 0,25 MPa, extinguindo dessa forma o arco com um sopro.

**Figura 15:** Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a  $SF_6$  de dupla pressão



1. Unidade de interrupção
2. Capacitor de equalização
3. Cabeçote de distribuição
4. Reservatório intermediário de  $SF_6$  em alta pressão
5. Válvula de sopro
6. Mola de desligamento
7. Barra isolante

Fonte: [27]

Essa tecnologia possibilita interromper elevadas correntes de curto em reduzidos tempos de interrupção. A forma de extinção exige menos energia do mecanismo dado que parte da energia para a extinção é realizada por compressores na transferência do gás para o acumulador. Para combater a liquefação é necessário o emprego de resistores de aquecimento nesses acumuladores agregando pontos negativos para a confiabilidade do sistema do disjuntor. A manutenção nesses

equipamentos é mais complicada pela existência de compressores que possuem partes móveis sujeitas a desgastes e sempre que se trabalha com pressões elevadas problemas de vedações são mais críticos acarretando em emissões ao meio ambiente e manutenções mais demoradas e frequentes. Além disso um complexo mecanismo com diversas partes móveis existente no interior da câmara era necessário para abrir as válvulas do gás a alta pressão enquanto o contato se deslocava [18].

Por dependerem de um compressor e pelo  $SF_6$  se liquefazer a temperatura ambiente nos acumuladores, essa tecnologia foi utilizada até meados da década de 90, dando espaço à nova tecnologia de pressão única ou *puffer type*.

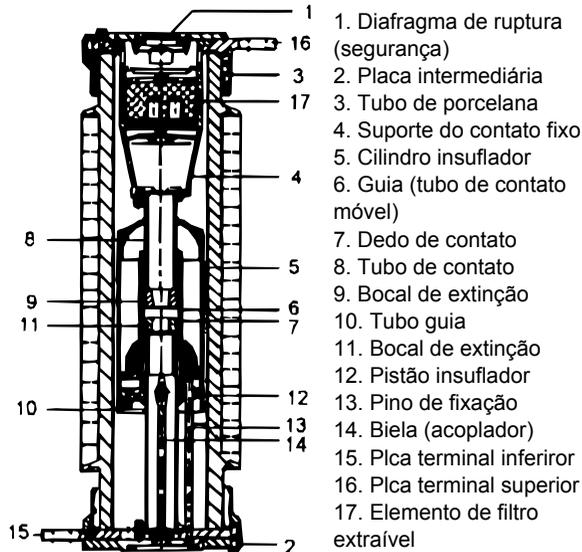
### 2.3.2.2 Disjuntores de Pressão Única

Na sequência da evolução, surgiram os disjuntores de pressão única, simplificando os componentes no interior da câmara. Na sua construção não é necessário o emprego de compressores e a extinção do arco se dá também pelo o aumento de pressão, só que esse é causado agora pelo deslocamento do contato móvel que comprime o  $SF_6$  em uma câmara.

A Figura 16 apresenta o corte desse tipo de disjuntor, nele todo o  $SF_6$  está armazenado dentro da câmara a uma única pressão. No momento da interrupção o contato móvel começa seu deslocamento e ao mesmo tempo o volume no interior da câmara começa a reduzir, essa redução leva ao aumento de pressão que se eleva até que um pequeno caminho surja no bocal de sopro do disjuntor. O bocal de sopro, normalmente confeccionado em um material isolante e resistente a altas temperaturas permite o caminho justamente no momento da separação dos contatos de arco do disjuntor, soprando sobre o arco  $SF_6$  a alta pressão [27].

Com a ausência do compressor para elevar a pressão do  $SF_6$ , o mecanismo de abertura e fechamento do disjuntor deve ter energia suficiente para além de deslocar todas as hastes, suprir também a energia para a pressão necessária no processo de extinção do arco elétrico. Isso faz com que o mecanismo tenha que ser maior e mais robusto que os de dupla pressão. Normalmente empregam-se mecanismos baseados no sistema de molas, hidráulico ou pneumático sendo que os dois últimos utilizados principalmente em disjuntores de extra alta tensão e tempos

**Figura 16:** Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a  $SF_6$  de única pressão



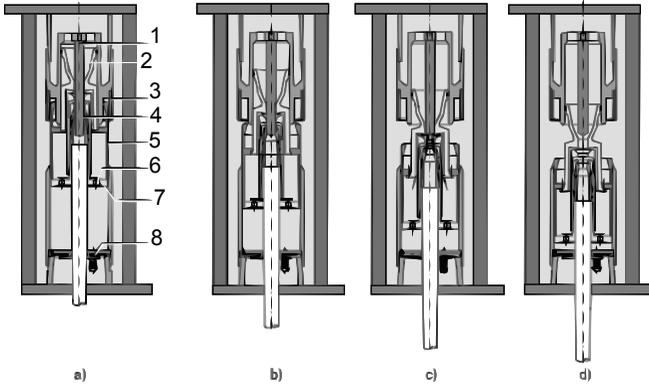
Fonte: [27]

de interrupção de até dois ciclos.

Visando diminuir a energia que o mecanismo deve acumular para o processo de extinção, o sistema *self blast*, ilustrado na Figura 17, utiliza a alta temperatura do arco elétrico para aumentar a pressão do  $SF_6$ . O arco elétrico gerado no momento da extinção aquece o gás, que vai para a câmara e por sua vez aumenta a pressão em seu interior. Essa pressão adicional causada pela elevação de temperatura ajuda na extinção do próprio arco. Quanto maior for a corrente de curto maior será o efeito do aumento da pressão e mais facilmente o arco elétrico será extinto. No caso de interrupção de corrente nominal esse efeito não é significativo. O emprego dessa tecnologia possibilitou a utilização de mecanismos a mola para níveis de extra alta tensão, que possuem menos complexidade que os hidráulicos e pneumáticos [20].

O desempenho do disjuntor *self blast* está diretamente ligado ao projeto do bocal de sopro de cada disjuntor. Altos valores de corrente requerem diâmetros maiores do bocal de sopro, para correntes de magnitudes menores a influência do tamanho do diâmetro já não é percebido [17].

**Figura 17:** Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a  $SF_6$  *self blast*



1. Pino
2. Bocal de extinção
3. Dedo de contato
4. Contato de arco móvel
5. Cilindro de aquecimento
6. Válvula de retenção
7. Pistão
8. Grupo de válvulas

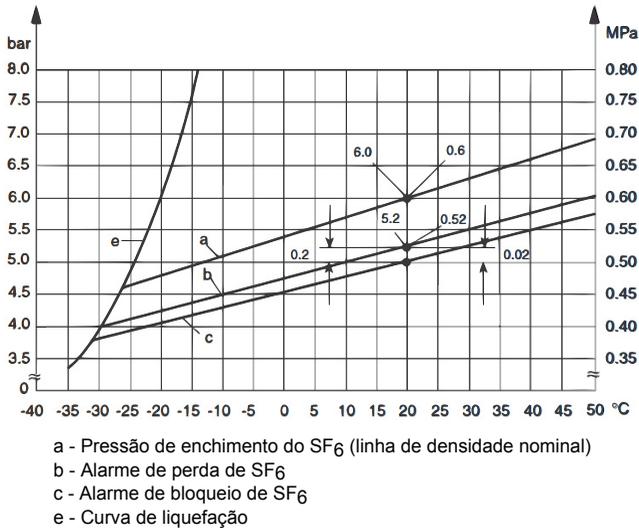
- a) Posição FECHADO
- b) Abertura: contato principal aberto
- c) Abertura: contato do arco aberto
- d) Posição ABERTO

Fonte: [20]

Monitorar somente a pressão de  $SF_6$  não é interessante, haja vista que com o aumento de temperatura, o gás tende a se expandir e com o volume do polo constante, a pressão em seu interior se eleva. Analogamente, com baixas temperaturas a pressão do  $SF_6$  se reduz e em alguns casos pode atingir os níveis de alarme e bloqueio do disjuntor. A maioria dos disjuntores possui, além dos densímetros, manômetros para acompanhamento do nível de  $SF_6$ , mas para interpretá-lo corretamente é necessário sempre utilizar uma curva para correção de pressão pela temperatura ambiente, como apresentado na Figura 18. O  $SF_6$  não é um gás ideal e, portanto, a lei de Gay-Lussac (sob volume e quantidade de gás constante, a pressão é diretamente proporcional a temperatura) não se aplica, implicando no uso de curvas diferentes na correção da pressão de  $SF_6$  pela temperatura para cada tipo de polo.

Como a rigidez dielétrica do  $SF_6$  não sofre variações significativas com a temperatura, a densidade é o principal parâmetro a ser observado para que as características de interrupção possam ser cumpridas, portanto é necessário monitorá-la [32]. Um exemplo de sistema

**Figura 18: Curva de enchimento do  $SF_6$  e valores de atuação do densímetro**

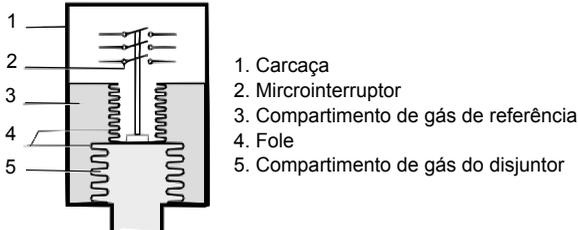


Fonte: [20]

de alarme é o densímetro ou densostato, como ilustrado pela Figura 20. Uma das formas conhecidas de densímetro baseia-se em um sistema que possui uma quantidade de gás e volume conhecidos, esse gás serve de controle e referência ao sistema de alarme. O gás de referência fica dentro de um fole metálico que tem um lado acoplado à câmara, como apresentado na Figura 19. Conforme a temperatura do ambiente se altera, tanto o gás da câmara como o de referência alteram sua pressão e a força exercida no fole é anulada, não registrando nenhum alarme. Caso haja um pequeno vazamento na câmara, a pressão do fole será maior que a da câmara e um alarme será gerado, caso o vazamento seja elevado um segundo estágio de alarme é disparado. Dependendo da filosofia da concessionária o segundo alarme pode disparar um comando de abertura no disjuntor ou simplesmente bloqueá-lo na posição em que está. Em ambos os casos a intervenção da manutenção é necessária para restabelecer a funcionalidade do equipamento.

Em climas amenos a liquefação do  $SF_6$  se torna importante mesmo a pressões reduzidas como a existente em disjuntores de pressão única. Para contornar esse efeito sem a utilização de resistores de aque-

Figura 19: Corte do densímetro de disjuntor a  $SF_6$



Fonte: [20]

Figura 20: Densímetro de disjuntor a  $SF_6$



A - Conexão para teste

B - Densímetro

Fonte: [20]

cimento na câmara, a mistura com nitrogênio é a alternativa adotada por fabricantes. Como o  $SF_6$  é inerte, o  $N_2$  permite que se eleve a pressão sem que o  $SF_6$  atinja seus valores de liquefação e sem prejudicar a capacidade de extinção do equipamento.

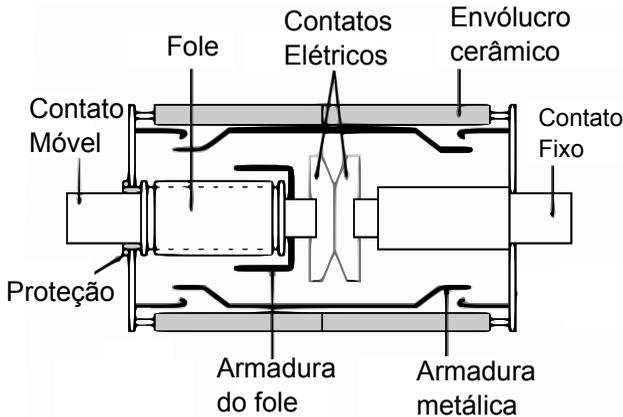
Os disjuntores de pressão única do tipo *self blast* são vastamente empregados no sistema e atualmente dominam a venda de disjuntores nos segmentos de alta e extra alta tensão.

### 2.3.3 Disjuntor a Vácuo

A tecnologia a vácuo começou a ser empregada por volta de 1920 mas seu uso se consolidou, principalmente na média tensão, na década de 60 [17]. O vácuo possui como principal característica uma grande rigidez dielétrica devida a significativa diminuição de colisão entre moléculas. Além disso não apresenta qualquer risco ao meio ambiente, como a emissão de gases de efeito estufa presente nos disjuntores a  $SF_6$ , nem de explosão como presente nos disjuntores a óleo [27].

Seu princípio baseia-se na separação dos contatos em um ambiente de vácuo que está entre  $0,133\text{ mPa}$  e  $1,33\text{ }\mu\text{Pa}$ . Para garantir a estanqueidade da ampola o contato móvel é preso a um fole metálico que permite que o contato móvel se desloque nas operações de abertura e fechamento sem comprometer a vedação [17].

Figura 21: Corte de uma ampola a vácuo



Fonte: [33]

Nas primeiras câmaras o vácuo era feito individualmente, retirando o ar de cada polo que então era selado. É fácil identificar essa tecnologia de câmaras pois possuem um tubo pelo qual era realizado o vácuo. Uma melhor forma de fabricação dessas câmaras, que permite menor quantidade de impurezas e uma melhor qualidade de vácuo, foi possível através da montagem da câmara em que todo o ambiente de fabricação se encontrava no vácuo.

Conforme Figura 21, a câmara é composta de uma parte cerâmica selada em ambos os lados, sendo que de um lado está o fole metálico que permite o deslocamento do contato móvel e no outro o contato fixo. Internamente os contatos são planos com algumas ranhuras que em conjunto com o campo magnético fazem com que o arco não desgaste somente um ponto específico do contato. Uma armadura metálica protege a câmara de vapores metálicos oriundos do processo de erosão decorrentes da interrupção de correntes que poderiam prejudicar os níveis de isolamento.

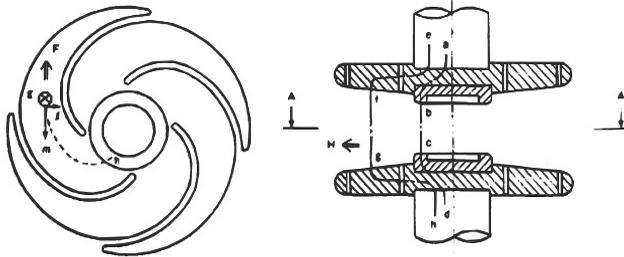
As características desse meio isolante são favoráveis à preservação dos contatos. Além disso esses equipamentos podem executar rápidos religamentos não sendo necessário ter o tempo para restabelecimento do meio dielétrico. Os mecanismos que equipam essa tecnologia não necessitam de muita energia nem grandes deslocamentos e normalmente utilizam molas ou até mesmo solenóides [18].

Não existe manutenção na câmara e o desgaste dos contatos pode ser medido através do sistema de proteção utilizando-se o somatório de correntes interrompidas ou fisicamente através de uma marca de acompanhamento. Conforme o contato se desgasta, a sua espessura diminui o que faz com que a haste acoplada ao contato móvel necessite de percurso mais longo para permitir a passagem de corrente, esse maior percurso faz com que a marca percebida na haste se desloque dando informações das condições do contato [26].

O projeto dos contatos das câmaras utiliza o *Transverse Magnetic Field* (TMF) para contribuir na extinção do arco. O TMF faz com que a corrente se desloque pelo contato evitando o desgaste pontual da superfície do contato preservando a baixa resistência de contato. A Figura 22 descreve como o projeto do contato de um interruptor a vácuo é importante para criar o TMF [17, 33].

Outra característica dessa tecnologia é o baixo efeito da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), sendo superior à tecnologia  $SF_6$  [17].

Para interromper níveis de tensões de 230 kV ou acima as câmaras podem ser associadas em série como é o caso da série VBU-T fabricada pela empresa Joslyn, que interrompe correntes nominais de 600 A e correntes de curto de 4 kA [34]. Apesar de ser possível atingir tensões maiores, algumas implicações como a limitação para interrupção de corrente de curto ainda os mantém nos níveis entre 5 kV e 38 kV. A inacessibilidade visual dos contatos e a dificuldade em

**Figura 22: Forças magnéticas em um TMF**

Fonte: [17]

avaliar a qualidade do vácuo são alguns problemas que as equipes de manutenção enfrentam com esses disjuntores.

**Figura 23: Disjuntor a vácuo de 230 kV**

Fonte: [34]

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A existência de modelos de disjuntores com tecnologias tão diferentes ainda comumente encontrados nas subestações, é um grande desafio para a manutenção, que tem que lidar com tantas variedades e particularidades. A preparação para manutenção, estimativa de materiais, tempo e mão de obra necessários diferem muito entre um disjuntor a vácuo e um GVO. Esse capítulo apresentou uma síntese das principais tecnologias encontradas em disjuntores focando em aspectos construtivos e de manutenção.

Para garantir a longa e confiável vida útil aos disjuntores são necessárias intervenções, normalmente acompanhadas de desligamentos dos disjuntores o que na sua grande maioria dos casos não exige a interrupção do fornecimento de energia. Dependendo do disjuntor, ensaios diferenciados são exigidos e outros suprimidos buscando a maximização da sua vida útil e confiabilidade ao sistema. Avaliações de resultados satisfatórios em alguns ensaios podem ser considerados anormais dependendo da tecnologia avaliada, tornando a rotina das equipes de manutenção dependente de manuais, normas e recomendações para cada tipo de disjuntor. No capítulo seguinte serão abordados os principais ensaios realizados em disjuntores.

### 3 ACOMPANHAMENTO DE DISJUNTORES EM SERVIÇO

O acompanhamento de disjuntores em serviço é realizado através de ensaios que podem ser divididos, de uma maneira geral, na avaliação de três grandes componentes:

- Avaliação do isolamento;
- Avaliação dos contatos;
- Avaliação da parte mecânica.

A aceitação de um disjuntor normalmente ocorre em fábrica na recepção do lote. Após a instalação no circuito e antes de sua energização alguns testes ainda são repetidos para verificar se houve problemas no transporte ou durante a montagem. Na fábrica são avaliados os aspectos abaixo, observando quando aplicável a norma ABNT NBR IEC 60694[35]:

- Ensaio dos vasos de pressão, quando aplicável, mediante a apresentação do certificado da realização do mesmo;
- Verificação das placas de identificação;
- Verificação de vazamentos;
- Verificação dos valores dos resistores, aquecedores, bobinas e capacitores;
- Verificação da cor, qualidade da pintura e dimensões principais;
- Verificação de fiação de comando e auxiliares (conformidade com os desenhos, continuidade e operação);
- Verificação de ajustes mecânicos, quando aplicável;
- Verificação do ajuste dos pressostatos e do densímetro de  $SF_6$ ;
- Ensaio de funcionamento mecânico;
- Ensaio de tempos de operação (abertura, fechamento e religamento), simultaneidade para as operações de abertura e fechamento do,s contatos;

- Ensaio do sistema de acumulação de energia (funcionamento de válvulas, número de operações e tempo de recarga) e medição da corrente no motor durante o carregamento;
- Medição das resistências ôhmicas do circuito principal;
- Ensaio de tensão suportável do circuito principal à frequência industrial e a seco;
- Ensaio de tensão suportável dos circuitos de comando e dos circuitos auxiliares à frequência industrial;
- Ensaio de funcionamento do sistema de comando com variação da tensão de alimentação (mínimo, nominal e máximo);
- Verificação da galvanização conforme norma ABNT NBR 7397 [36], NBR 7398 [37], NBR 7399 [38] e NBR 7400 [39];
- Medição do teor de umidade no gás SF<sub>6</sub>, conforme norma IEC 60376 [40];
- Verificação do funcionamento da sequência nominal de operação (sem entrada do motor alimentado em CA), quando aplicável.;
- Verificação da estanqueidade das caixas do mecanismo de operação e outras caixas existentes.

### 3.1 AVALIAÇÃO DO ISOLAMENTO

A principal função do disjuntor é interromper correntes, portanto avaliar a condição do meio isolante é fundamental para que o equipamento tenha um desempenho satisfatório. Além de garantir que os disjuntores mantenham suas características técnicas nominais, os ensaios são importantes também na questão de segurança dos operadores, avaliando o isolamento das partes ativas à terra até mesmo sob tensões de impulso que podem alcançar a 650 kV em um disjuntor de 145 kV [35]. É importante que o disjuntor seja projetado para suportar tanto os esforços elétricos como mecânicos aos quais poderá ser submetido, frente às correntes de curto-circuito e sobretensões.

### 3.1.1 Meio Isolante e Meio Extintor

O disjuntor pode possuir dois meios dielétricos em seu polo: um específico para a extinção do arco elétrico e outro somente para isolamento. Alguns exemplos são os disjuntores com extinção a vácuo e isolamento a  $SF_6$ , ou disjuntores com extinção e isolamento a óleo, onde apesar de possuírem o mesmo material, existe uma barreira que impede que o óleo da câmara se misture com o óleo de isolamento.

O meio de extinção possui a finalidade de extinguir propriamente o arco, por consequência tende a estar mais deteriorado que o meio de isolamento. Muitas vezes é possível constatar isso somente observando o aspecto do óleo.

O meio de isolamento tem como finalidade isolar outras partes do disjuntor que estão sob tensão nominal, evitando assim que cheguem a valores perigosos de tensão de toque para os usuários e outros equipamentos conectados a eles. Sua deterioração não é percebida rapidamente porque existem menos contaminantes quando comparado ao meio de extinção.

Essa separação visa principalmente a substituição ou tratamento de somente parte do dielétrico, reduzindo o tempo de manutenção e a contaminação.

### 3.1.2 Medição da Resistência de Isolamento

Encontram-se no mercado instrumentos de várias tecnologias e formas de medir a resistência de isolamento dos disjuntores como: o fator de potência, ponte de Schering, ponte de Wheatstone e megôhmetro. Neste trabalho será abordado somente o instrumento conhecido como megôhmetro, que utiliza alta tensão contínua aplicada aos terminais de alta tensão do disjuntor e a massa.

Nesse ensaio é aplicado uma alta tensão contínua, por exemplo 2.500 V, pelo meio isolante e o equipamento mede a corrente circulante pelo circuito. Por se tratar de uma corrente de fuga, sua magnitude é muito baixa levando a resultados de resistência muito elevados, na faixa de megohms. Quanto maior o valor, melhor é o dielétrico.

Comumente são executadas duas montagens nesse mesmo ensaio. Uma para avaliar o dielétrico na câmara de extinção, e para isso a alta tensão contínua é aplicada entre os terminais do disjuntor na

posição aberta. No caso de um disjuntor a pequeno volume de óleo, tanto a porcelana como o óleo isolante existente na câmara de extinção estão sendo avaliados. O resultado reflete normalmente o estado do óleo isolante, que devido à carbonização oriunda das ações extintivas sob a qual o disjuntor foi acionado, acabaram degradando o óleo. A porcelana tem a função de, através de suas saias, aumentar a distância de escoamento e nunca deve ser fator limitante para questões de isolamento. Normalmente descarta-se a porcelana e assume-se que o resultado encontrado nessa montagem do ensaio é referente à resistência de isolamento do óleo. Caso haja dúvidas sobre se a resistência de isolamento encontrada é da porcelana ou do óleo, é possível descontar a corrente que passa pela porcelana utilizando o cabo guarda, presente em muitos equipamentos. A instalação do cabo guarda deve ser junto à porcelana, e toda a corrente que for conduzida pelo cabo guarda não será considerada para o cálculo da resistência de isolamento. Com essa montagem, pode-se também verificar que a porcelana não influi significativamente nos resultados das medições sem uso do cabo guarda.

A segunda montagem objetiva a avaliação principalmente da haste isolante, que está solidária ao contato móvel e a haste de transmissão do movimento. Nessa montagem normalmente deixa-se o disjuntor na posição fechada e instalam-se os cabos conectados entre o terminal do disjuntor e sua massa. A corrente circulante entre o terminal e a massa servirá de base para a indicação da resistência de isolamento da haste isolante. Normalmente o valor nessa montagem é menor que o da montagem anterior, isso se justifica pelo fato de que a haste isolante se conecta solidamente à massa do equipamento através da alavanca que transmite o movimento, e a haste isolante é higroscópica fragilizando-a frente ao óleo isolante. A avaliação nessa montagem é importante para que não haja descargas pela haste, sendo possível recomendar a troca ou o tratamento dessa haste isolante.

Tanto na primeira montagem como na segunda, observa-se no campo que esse ensaio pode apresentar falsos valores devido à influência eletromagnética que permeia os cabos de alta tensão, induzindo correntes que não refletem a realidade do meio isolante levando a baixos valores de resistência de isolamento. Por isso deve-se ter um certo cuidado ao avaliar esse ensaio, principalmente quando se está próximo de circuitos vizinhos energizados. Outra recomendação é que seja aplicada a tensão por pelo menos 1 minuto, dessa forma diminui-se a influência capacitiva da polarização das moléculas do óleo. Particularmente nesse

ensaio, a questão de interpretação de unidades é um problema comum. Os instrumentos podem apresentar os resultados em diversos múltiplos desde  $\Omega$  até  $T\Omega$  podendo causar más interpretações se o usuário não atentar para tal detalhe. Existe também nesse ensaio a questão de fundo de escala dos instrumentos, que em instrumentos mais antigos era de 250.000  $M\Omega$ , muito abaixo dos atuais que são da ordem de  $T\Omega$ ; nesse caso recomenda-se a adoção de instrumentos semelhantes a cada intervenção. Em disjuntores a  $SF_6$  esse ensaio pode ser suprimido, a rigidez dielétrica do  $SF_6$  comparada à do óleo é muito superior, e a umidade existente que poderia diminuir o isolamento da haste é praticamente inexistente. Esse ensaio não é normatizado, contudo os valores de referência podem ser encontrados em alguns manuais, podendo variar em longas faixas como entre 100  $M\Omega$  a 100.000  $M\Omega$ .

### 3.1.3 Ensaio de tensão à frequência industrial

Nos ensaios de rotina de disjuntores, a avaliação do meio isolante não é realizada por aplicação de alta tensão contínua como o visto na Seção 3.1.2. A IEC 62271-100:2006 [41] exige que sejam feitos ensaios de tensão à frequência industrial por 1 minuto, segundo a tabela 2.

Nesse ensaio a tensão é aplicada nos terminais do disjuntor aberto conforme Figura 24 segundo a Tabela 2 aplicando tensão de acordo com a Tabela 1. No entanto para esse ensaio é necessário um instrumento grande e pesado dificultando o ensaio nas manutenções em campo.

O instrumento é praticamente um transformador que eleva a tensão para os níveis da tabela. Existe um cabo que está conectado normalmente à massa do disjuntor e monitora a corrente de fuga que é conduzida pela carcaça. Caso não ocorra descarga disruptiva durante o tempo de 1 minuto, que é o que rege a norma, o equipamento é considerado aprovado.

Esse ensaio, além de ser de difícil aplicação em campo devido ao tamanho do instrumento de ensaio, também estressa o meio isolante do disjuntor. Para questões de verificação da condição em equipamentos até 245 kV, a NBR IEC 60694:2006 recomenda a redução da tensão aplicada para 80% do valor da tabela 2, coluna 3. Isso é motivado pela margem de segurança que consideram o envelhecimento, desgaste e outra deterioração normal. Por isso, recorre-se a ele preferencialmente em

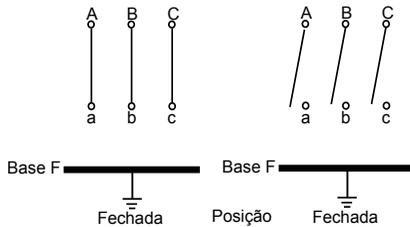
casos em que haja fortes indícios de falha no meio isolante constatados através de outros ensaios quando mesmo a troca do meio isolante, quando aplicável, não surtiu o efeito desejado. Dessa forma evita-se o estresse do meio isolante e também do deslocamento para campo de um instrumento de grande porte [35].

**Tabela 1: Condição de ensaio no caso geral**

Condição de Ensaio	Dispositivo de manobra	Tensão aplicada a	Terra conectada a
1	Fechado	Aa	BCbcF
2	Fechado	Bb	ACacF
3	Fechado	Cc	ABabF
4	Aberto	A	BCabcF
5	Aberto	B	ACabcF
6	Aberto	C	ABabcF
7	Aberto	a	ABCbcF
8	Aberto	b	ABCacF
9	Aberto	c	ABCabF

Fonte: [35]

**Figura 24: Diagrama de conexões de um dispositivo de manobra tripolar.**



Fonte: [35]

### 3.1.4 Medição da Rigidez Dielétrica do óleo

Nos disjuntores a óleo avaliar a rigidez dielétrica do óleo é um fator chave para a isolação do equipamento. A rigidez dielétrica é afetada pelas impurezas contidas no óleo, umidade e principalmente

**Tabela 2: Níveis de isolamento nominais para tensões nominais da classe I, série I.**

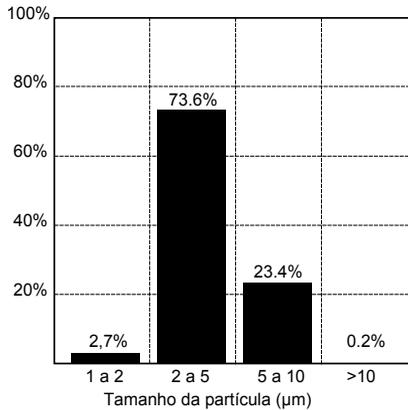
Tensão Nominal $U_r$ kV (eficaz)	Tensão Suportável nominal de curta duração à frequência industrial $U_d$ kV (eficaz)		Tensão suportável nominal de impulso atmosférico $U_p$ kV (crista)	
	(2)	(3)	(4)	(5)
3,6	10	12	20	23
			40	46
7,2	20	23	40	46
			60	70
12	28	32	60	70
			75	85
17,5	38	45	75	85
			95	110
24	50	60	95	110
			125	145
36	70	80	145	165
			170	195
52	95	110	250	290
72,5	140	160	325	375
100	150	175	380	440
	185	210	450	520
123	185	210	450	520
	230	265	550	630
145	230	265	550	630
	275	315	650	750
170	275	315	650	750
	325	375	750	860
245	360	415	850	950
	395	460	950	1050
	460	530	1050	1200

Fonte: [35]

pelas partículas suspensas.

O óleo diminui a rigidez dielétrica linearmente com a concentração de particulados e exponencialmente com a água, porém isso só é observado quando a concentração de água no óleo é próxima da saturação. Na maioria dos casos, dificilmente se encontrará o óleo próximo da saturação sendo mais significativo, para a rigidez dielétrica, a quantidade de material particulado encontrado na amostra [42]. Para que o óleo possua uma boa rigidez dielétrica é aconselhável reduzir a contaminação por partículas maiores que  $1\ \mu\text{m}$ ; a Figura 25 ilustra a distribuição da quantidade de partícula versus seu tamanho. A redução do material particulado pode ser realizada através da adoção de elementos filtrantes dimensionados para esse tamanho de partículas [42].

**Figura 25: Distribuição do tamanho das partículas em óleo para uso**



Fonte: [42]

O teor de água (em ppm) presente no óleo por si só não é suficiente para caracterizar a condição do óleo. Disjuntores que possuem pequena distância entre os contatos são mais afetados por água dissolvida, ou seja, em concentrações próximas de 70 ppm ou até por gotículas suspensas, e geralmente essas concentrações não resultam em patamares perigosos para a rigidez dielétrica, contudo podem elevar a corrente de fuga. A rigidez dielétrica atinge os piores valores quando estão presentes no óleo gotas de água [43].

## 3.1.4.1 Medidor de rigidez dielétrica do óleo

Para a avaliação da rigidez dielétrica do óleo é necessário coletar uma amostra diretamente do polo. Desde que a segurança não seja comprometida, muitas vezes a coleta pode ser realizada com o equipamento energizado. Em disjuntores *dead tank* observam-se registros para fazer essa coleta e em alguns *live tank* é possível fazer a coleta sem o desligamento do equipamento.

Por não necessitar da intervenção no equipamento o ensaio pode, por exemplo, ser realizado como forma de comprovar a qualidade do meio isolante no caso de uma dúvida quanto ao tempo que o disjuntor levou para extinguir um arco que foi observado através do osciloper-tubógrafo. O ensaio será capaz de informar claramente se o óleo está dentro dos padrões aceitáveis de isolamento.

A rigidez dielétrica depende de vários fatores, a questão da quantidade de água e partículas já foi abordada na Seção 3.1.4, mas é necessário também levar em conta alguns fatores como:

- formato dos eletrodos;
- distância entre os eletrodos;
- polaridade;
- rampa de subida da tensão.

Por isso existem padrões e topologias regidas por norma como forma de padronizar valores e prover comparações entre os diversos ensaios e empresas, entre elas estão ASTM D 877 e ASTM D 1816. As principais diferenças entre as normas está relacionada na Tabela 3.

**Tabela 3: Principais diferenças entre ASTM D 877 e ASTM D 1816**

	ASTM D 877	ASTM D 1816
Formato	discos de 25,4 mm de diâmetro	calotas esféricas de 36 mm de diâmetro
Espaçamento	2,54 mm	1 ou 2 mm
Rampa	3 kV/s	0,5 kV/s

Fonte: Baseado em [46]

Ambas as normas utilizam a frequência de 60 Hz para aplicação da tensão. Por formar um campo não uniforme, devido aos vértices

dos discos, a ASTM D 877 é mais indicada para avaliar óleos que estão em fase de aceitação. Já a ASTM D 1816 possui um campo elétrico proporcionado pelos seus eletrodos que tende a ser mais uniforme, sendo mais aplicada na avaliação de óleos dielétricos empregados em sistemas que possuam tensão abaixo de 230 kV e para óleo em equipamentos que já estão em serviço.

Diversos tipos óleos são encontrados nos disjuntores, e muitas vezes não é levado em conta o fabricante e o tipo de óleo que está em cada equipamento, não sendo rara a reposição de óleo no disjuntor sem se atentar ao óleo existente. Em [47] é feita uma análise entre diversos óleos existentes no mercado e comparados os resultados de diversos ensaios normatizados, concluindo que não existe diferença expressiva quanto à rigidez dielétrica entre os óleos isolantes dos diferentes fabricantes.

O ensaio é realizado em um instrumento semelhante ao da Figura 26 e consiste em aplicar tensão entre os eletrodos que estão dentro de uma cuba com a amostra de óleo, elevando a tensão aplicada segundo a rampa de subida desejada. A tensão é aplicada através de um autotransformador de ajuste contínuo, controlado por um motor de passo. A tensão é interrompida ao primeiro surgimento de descarga entre os eletrodos e então o equipamento informa em qual tensão ocorreu a ruptura do óleo. De posse do valor é possível tomar ações quanta à troca ou tratamento do óleo ou somente pela sua permanência até a próxima intervenção.

A substituição do óleo exige transporte de tambores ou dependendo do volume exigido, até mesmo carreta. O cuidado com o meio ambiente é fundamental e exige especial atenção das equipes de manutenção durante toda a manipulação, evitando o desperdício para o ambiente de qualquer porção de óleo. No caso de acidentes com o óleo que entre em contato com o solo, todo um processo de tratamento do solo é necessário para mitigar os efeitos nocivos.

O guia IEEE C57-106:2006 recomenda que o óleo isolante do disjuntor em operação atenda a valores de rigidez dielétrica superiores aos constantes na Tabela 4 [46].

Figura 26: Medidor de rigidez dielétrica do óleo



Fonte: [48]

Tabela 4: Valores mínimos de rigidez dielétrica de óleo em operação

Norma	Limite
ASTM D 877	25 kV
ASTM D 1816	20 kV com 1 mm de espaçamento
ASTM D 1816	27 kV com 2 mm de espaçamento

Fonte: Baseado em [46]

### 3.1.5 Avaliação do $SF_6$

Disjuntores a  $SF_6$  possuem resistência de isolamento normalmente muito elevada e o ensaio com o megôhmetro tende a não fornecer dados conclusivos quanto à qualidade do meio extintor, nesse caso o  $SF_6$ . Antes do gás se degradar a ponto de comprometer o isolamento ou a capacidade de interrupção do disjuntor, o gás e seus subprodutos atacam quimicamente as partes internas do disjuntor, levando a problemas de corrosão em flanges e problemas de vedações.

O isolamento dos disjuntores que utilizam essa tecnologia vem equipado com um densímetro que possui normalmente dois estágios

de atuação, um para alarme e outro para bloqueio ou abertura. O densímetro compensa a atuação dos alarmes conforme a pressão interna do gás no equipamento levando em consideração a temperatura de operação como já explanado na Seção 2.3.2.2.

Somente esse acompanhamento já é suficiente segundo o manual da maioria dos fabricantes, contudo avaliar a qualidade do gás é um ensaio que tem ganho atenção dos usuários principalmente para mitigar a emissão de  $SF_6$  que é o gás com maior potencial de danos dentre os citados no protocolo de Kyoto.

A molécula de  $SF_6$  quando dissociada pode se recombinar com outras moléculas, principalmente com a água, formando compostos como o  $HF$ ,  $SO_2$ ,  $SOF_2$ ,  $SOF_4$  e  $SO_2F_2$ . Esses subprodutos podem danificar as vedações do disjuntor e provocar os preocupantes vazamentos. Os valores limites de contaminantes para gás novo estão referidos na IEC 60376-05 e resumidos na Tabela 5.

O ensaio no gás pode ser realizado acoplado o disjuntor ao instrumento portátil, como o da Figura 27, que drenará uma pequena porção do gás, realizará a medição dos principais contaminantes ( $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $HF$ ), e os mais novos modelos podem recolocar a porção retirada para análise evitando a emissão até mesmo da amostra para análise.

A existência de  $SO_2$  no gás possui uma relação muito próxima com a existência de subprodutos. Uma porção de  $SO_2$  equivale a quatro porções de subprodutos. Com base nessa aproximação é possível avaliar a qualidade do gás, quanto à presença de subprodutos, com a avaliação da quantidade de  $SO_2$  presente no  $SF_6$ . Essa é uma alternativa para avaliar a qualidade do gás sem a necessidade da aquisição de instrumentos de custo elevado [49].

Avaliações mais criteriosas podem ser realizadas coletando amostras e submetendo a análise cromatográfica em laboratório, fornecendo resultados sobre maiores variedades de contaminantes que não estão ao alcance dos instrumentos portáteis.

A falta de padronização nas conexões dos disjuntores dificulta esse tipo de ensaio, dada a variedade de conexões existentes. As adaptações da mangueira do instrumento para compatibilizar com as conexões dos disjuntores muitas vezes devem ser feitas através da confecção de peças usinadas e seu acoplamento à mangueira são susceptíveis a vazamentos [50].

Tabela 5: Níveis máximo de impureza para  $SF_6$  novo

Conteúdo	Especificação	Método Analítico (somente para indicação)	Incerteza
Ar ( $O_2 + N_2$ )	2 g/kg [nota 1]	Absorção infravermelho	35 mg/kg
		Cromatografia gasosa	3 – 10 mg/kg
		Densidade	10 mg/kg
$CF_4$	2.400 mg/kg [nota 2]	Cromatografia gasosa	9 mg/kg
$H_2O$	25 mg/kg [nota 3]	Gravimétrico	9 mg/kg
		Eletrolítico	2 – 15 mg/kg
		Ponto de Orvalho	1° C
Óleo Mineral	10 mg/kg	Fotométrico	< 2 mg/kg
		Gravimétrico	0,5 mg/kg [nota 5]
Acidez Total (expressa em $HF$ )	1 mg/kg [nota 4]	Titulação	0,2 mg/kg
<p>Nota 1: 2 g/kg é equivalente a 1% vol sob condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 2: 2.400 mg/kg é equivalente a 4.000 <math>\mu</math>l/l sob condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 3: 25 mg/kg é equivalente a 200 <math>\mu</math>l/l e para um ponto de orvalho de -36°C, medido em condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 4: 1 mg/kg é equivalente a 7,3 <math>\mu</math>l/l sob condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 5: Dependendo da quantidade da amostra.</p>			

Fonte: [40]

### 3.2 AVALIAÇÃO DOS CONTATOS

Os contatos dos disjuntores são responsáveis pela condução da corrente do circuito e fazem uma ponte entre a parte energizada e a

**Figura 27: Instrumento portátil para avaliação de  $SF_6$** 

Fonte: [51]

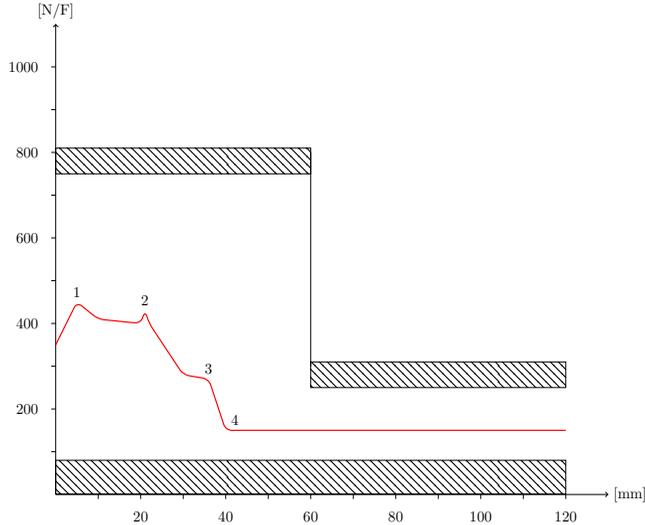
desenergizada. Por estarem susceptíveis aos desgastes inerentes das interrupções de correntes seu desgaste é normal, mas deve ser monitorado. Em baixas correntes, onde o efeito térmico não é predominante, o atrito entre as partes é o principal agente de desgaste. Com maior efeito, a interrupção de correntes de curto eleva o desgaste do contato por meio do efeito térmico decorrente da separação dos contatos e a ação do meio extintor.

O acentuado desgaste dos contatos pode levar o disjuntor a falhas irreparáveis e risco à segurança dos colaboradores e do sistema. Alguns ensaios podem ser realizados para evitar essas falhas e também a intervenção intrusiva desnecessária nas câmaras que podem inserir defeitos. Deve-se encontrar um equilíbrio de forma que a abertura da câmara de extinção só seja realizada quando se tem fortes indícios de que o contato está com desgaste acentuado, evitando-se ao máximo a abertura da câmara desnecessariamente.

Uma forma de avaliar o desgaste dos contatos sem a intervenção na câmara é através da medição resistência existente entre os terminais do disjuntor. Durante a fabricação das câmaras de extinção é possível realizar outro ensaio buscando identificar a força de atrito entre o contato móvel e o fixo identificando desvios de alinhamento entre eles.

A resistência varia com a área da superfície de contato e a força aplicada sob os contatos sendo os dois fatores que influenciam fortemente. Por mais perfeitas que sejam as superfícies, sempre haverá imperfeições que diminuirão a resistência ôhmica dos contatos. A própria força aplicada aos contatos é suficiente para criar pequenas imperfeições [17].

A força é influenciada ainda pela dureza, área de contato e uma constante que leva em consideração o acabamento do contato e também

**Figura 28: Ensaio de força de atrito**

Fonte: Ensaio realizado pelo autor

porque a dureza não é constante ao longo de toda a superfície. A força exercida por um par de contatos pode ser aproximada por (1) [17].

$$F = kHA_r \quad (1)$$

onde:

$H$  = Dureza do material

$A_r$  = Área de contato

$k$  = Constante entre 0,1 e 0,3

A avaliação da força de atrito em uma câmara de extinção consiste em deslocar o contato móvel no sentido de abrir e fechar, observando a força ao longo do deslocamento. Como pode ser observado na Figura 28, a força não é constante durante todo o percurso, pois durante o trajeto podem ser observados algumas alterações no gráfico:

1. início do movimento de abertura;
2. separação dos contatos de arco;

3. separação dos contatos principais;
4. deslocamento para manter o isolamento entre os contatos.

No ensaio de força de atrito a faixa hachurada representa os valores limítrofes, porém aceitáveis, para que a câmara do disjuntor passe pelo teste de qualidade. No caso da faixa ser excedida, ajustes de alinhamento entre contato fixo e móvel e a pressão dos contatos são revistas de forma a atender aos limites.

### **3.2.1 Ensaio para Medição da Resistência de Contato**

Quanto maior forem os pontos de contato, menor será a resistência ôhmica. Baixos valores de resistência de contato do disjuntor são ideais para que não haja deterioração nem superaquecimento, e devem ser observados para que se mantenham as condições nominais do equipamento.

Uma avaliação da resistência de contato, de tempos em tempos, se faz necessária para observar a evolução dos desgastes dos contatos do disjuntor. O ensaio consiste em circular um valor conhecido de corrente através dos contatos do disjuntor fechado, e medir a queda de tensão sobre os pontos. De posse dos valores de queda de tensão e corrente, e utilizando a lei de ohm, não há dificuldade em obter a resistência.

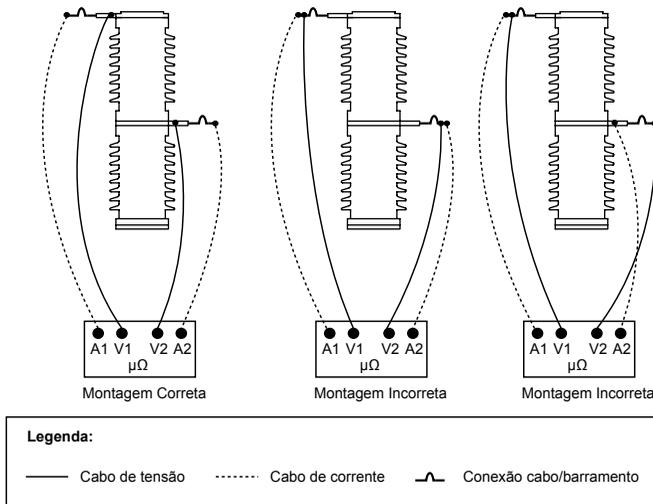
Em disjuntores, os valores de resistência de contato devem ser os menores possíveis e são da ordem de alguns microohms, portanto para se obter valores confiáveis e precisos é necessário utilizar altos valores de corrente, normalmente na ordem de centenas de ampères.

A metodologia de Kelvin (4 terminais) é a mais empregada nesses instrumentos, para que sejam evitados erros na medição provocados pela resistência dos próprios cabos. Nessa metodologia 2 cabos são utilizados para circular a corrente, esses cabos tendem a ser pesados devido à bitola necessária para circular os altos valores de corrente. Outros dois cabos são necessários para medir a queda de tensão entre os pontos desejados, e sempre internos ao circuito de corrente. Dessa forma mede-se a queda de tensão somente entre os pontos especificados e são retirados da medição os cabos que circulam corrente e outras conexões que possam influenciar nas medições [27].

Nas subestações os disjuntores estão conectados a cabos ou barramentos e essas conexões podem comprometer as medições se não fo-

rem tomados alguns cuidados e utilizado o correto método de medição. O circuito de corrente do instrumento pode ser instalado em qualquer ponto, desde que o disjuntor esteja inserido nesse circuito. O mesmo não ocorre com os cabos do instrumento que medem a queda de tensão, esses devem ser colocados nos terminais de alta tensão do disjuntor ou o mais próximo possível, e sempre dentro do circuito de corrente. A Figura 29 exemplifica algumas maneiras corretas e incorretas de se fazer o ensaio de resistência de contatos.

**Figura 29: Formas de conexão no ensaio de resistência de contato**



Fonte: Elaborado pelo autor

As conexões dos disjuntores podem influenciar na medição e devem ser retiradas e/ou limpas para que a oxidação e impurezas não afetem os resultados. Por ser um ensaio sensível, muitas vezes ele é repetido em pontos diferentes do contato do disjuntor, buscando um melhor ponto de contato.

Em disjuntores a óleo, os valores de resistência de contato são da ordem de centenas de ohms e quando o disjuntor fica longos tempos sem operar o óleo também age criando uma película de óxido sobre os contatos. Essa película diminui quando se faz alguns comandos de abertura e fechamento, dessa forma o atrito do contato age sobre a película diminuindo seu efeito no ensaio.

A NBR IEC 60694 estabelece o limite de 20% de variação de

resistência de contato em disjuntores entre a medição antes e após o ensaio de elevação de temperatura, contudo não limita a magnitude desses valores. No ensaio realizado em campo não é realizado o ensaio de elevação de temperatura, perdendo assim um dos pontos de referência que a norma estabelece para o ensaio de resistência de contato. Em alguns manuais constam os valores bem como nos ensaios de tipo. Dependendo do fabricante, nível de tensão, número de câmaras, modelo, técnica de extinção e outros aspectos podem se encontrar valores bem diferentes, a Tabela 6 é uma média dos valores com relação à tecnologia de extinção empregada baseada na tabela elaborada no GCOI-SCM [26]. A avaliação ainda pode levar em conta a evolução

**Tabela 6: Valores típicos de resistência de contato**

Extinção	Resistência por Fase ( $\mu\Omega$ )
GVO	$\approx 719$
PVO	$\approx 145$
$SF_6$	$\approx 122$

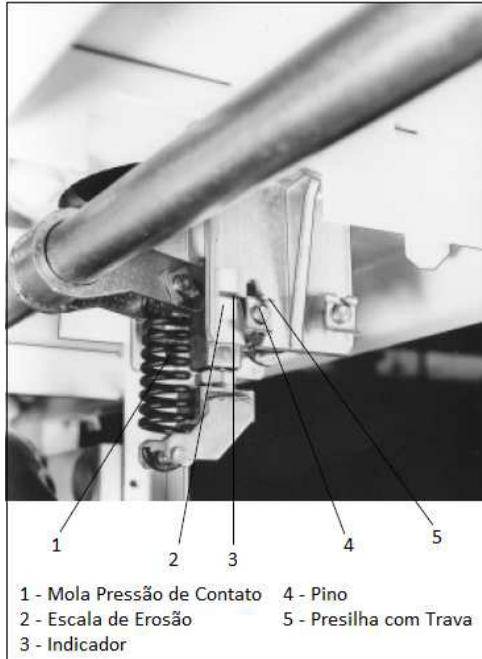
Fonte: Baseado em [26]

dos valores ao longo do tempo. Não devem ser encontrados, no intervalo de uma manutenção, valores muito discrepantes dos anteriores, principalmente em disjuntores a  $SF_6$  e vácuo que não estão susceptíveis a forte influência da película de óxido.

### 3.2.2 Influência do Meio de Extinção

O meio de extinção está fortemente ligado ao desgaste dos contatos e a forma como podem ser avaliados. Bons meios extintores minimizam o período durante o qual os contatos ficam submetidos ao arco elétrico, reduzindo o desgaste e prolongando sua vida útil.

Modernos sistemas de extinção permitem hoje que as correntes sejam extintas em ampolas hermeticamente seladas que providenciam o ambiente de vácuo tornando impossível a avaliação direta dos contatos. Nessa tecnologia uma das alternativas para avaliação é o acompanhamento do desgaste através de uma marca na haste que conecta o contato móvel ao mecanismo, conforme o contato sofre erosão sua

**Figura 30: Acompanhamento do desgaste da ampola a vácuo**

Fonte: [52]

espessura diminui e a marca de acompanhamento se desloca como indicativo de desgaste [52]. O contato não se desgasta com facilidade, e o meio extintor faz com que a corrente seja interrompida em menor tempo, elevando a vida útil do contato, no entanto a verificação só pode ser realizada inspecionando fisicamente cada disjuntor, o que dificulta o acompanhamento de muitos equipamentos quando são solicitadas muitas operações nesses circuitos.

Diferente do vácuo, no  $SF_6$  já é possível a intervenção na câmara e a verificação direta dos contatos, porém cada vez mais evita-se intervir nesses equipamentos principalmente pelos riscos ambientais de uma montagem mal feita que ocasione futuros problemas de vedações. As câmaras são testadas e alinhadas eletronicamente para que os contatos não exerçam demasiado atrito entre as partes e normalmente somente os fabricantes possuem a capacidade de avaliar e corrigir alguma anormalidade. Problemas alérgicos oriundos dos subprodutos do gás po-

dem irritar os mantenedores, além do tempo de indisponibilidade do equipamento durante uma manutenção dessa natureza. Cuidados com limpeza, umidade, qualidade das vedações e montagem sempre devem ser levados em consideração durante essas intervenções.

No  $SF_6$  não existe a marca de acompanhamento como a vista no vácuo, e a avaliação de forma não intrusiva é possibilitada através do monitoramento dos níveis de corrente interrompidos e o número de manobras realizadas como a curva  $I^2t$  que será abordada na Seção 3.2.3.

Disjuntores a óleo podem apresentar elevação da resistência de contato provocada por uma película de óxido originada da decomposição do óleo isolante durante as interrupções das correntes que se fixam na superfície do contato. A variação da resistência de contato pode ser acompanhada com base em um ensaio que foi abordado na Seção 3.2.1.

Assim como nos disjuntores  $SF_6$  os disjuntores a óleo permitem a intervenção na câmara e a avaliação direta dos contatos. Nesses disjuntores a substituição do contato é mais frequente, ocasionada principalmente pela qualidade do meio extintor. Dificilmente encontram-se curvas ou valores que permitam o monitoramento pelos níveis de corrente interrompidos nessa família de disjuntores, além disso disjuntores dessa época possuem normalmente proteções contemporâneas que não possuem essa funcionalidade. A abertura da câmara para inspeção visual por tempo determinado torna-se a melhor forma de avaliar o contato quando existem indícios de significantes alterações nos valores de ensaio de resistência de contato. Apesar de existir a necessidade de cuidado com as partes isolantes na abertura da câmara, principalmente no que se refere à umidade e limpeza, o disjuntor a óleo não é tão sensível a vazamentos e intervenções como os disjuntores a  $SF_6$ . A abertura de câmaras torna-se mais comum nos disjuntores a óleo para substituição do óleo isolante antigo, que é feita com maior frequência.

Cada tecnologia tem sua particularidade para avaliação do contato e deve ser observado o tipo de meio isolante, para então interpretar se o valor obtido do ensaio de medição de resistência de contato é um indicativo de anomalia. Em disjuntores a vácuo esse valor deve ser levado com maior rigor uma vez que não existem tantas interferências do meio extintor como existem nos disjuntores a  $SF_6$  e a óleo, porém no caso de se possuir o monitoramento pelo relé das correntes interrompidas pode-se comparar os valores e se obter melhores conclusões. Outra forma pode ser verificar localmente o desgaste por meio do desloca-

mento da marca de referência. Esses disjuntores a vácuo não permitem a melhora da resistência de contato, portanto uma má avaliação pode levar a troca desnecessária de uma câmara de disjuntor. Já nos disjuntores a  $SF_6$  na falta do monitoramento como medida de comparação, os valores de resistência de contato não podem evoluir demasiadamente entre uma manutenção e outra, mas alterações significativas nos ensaios podem ter influências externas que devem ser avaliadas antes de uma intervenção na câmara. Os ensaios de resistência de contato nos disjuntores a óleo possuem, por sua natureza, valores de resistência mais elevados dentre as tecnologias apresentadas e não podem ser comparados com outras tecnologias, além disso a evolução da resistência é maior nessa tecnologia.

O ambiente, técnica de ensaio, facilidade de intervenção na câmara, tipo de tecnologia de extinção, histórico de evolução influenciam na tomada de decisão de cada um dos mantenedores que avaliam segundo seu conhecimento tácito.

### 3.2.3 Curva $I^2t$

Muitos dos modernos relés permitem a disponibilização do desgaste do contato com base nas correntes interrompidas. Nos manuais dos disjuntores os fabricantes normalmente fornecem um gráfico de nível de curto pela quantidade de interrupções permitidas sob aquele nível de curto, dessa maneira é possível avaliar quanto se desgastou o contato. Quanto maior a magnitude do curto interrompido pelo disjuntor, menor a quantidade de operações que o disjuntor ainda poderá executar.

Inserindo a característica de corrente acumulada, que é um fator de projeto de cada disjuntor, o próprio relé poderá estimar o desgaste dos contatos com base nas correntes interrompidas pelo disjuntor, disponibilizando esse dado para que a automação possa extraí-lo ou acessando diretamente o relé. Esse acompanhamento pode ser utilizado em qualquer tipo de tecnologia desde que o fabricante forneça os dados de entrada para o relé.

### 3.3 AVALIAÇÃO DA PARTE MECÂNICA

#### 3.3.1 Avaliação do tempo de operação

Um dos ensaios fundamentais para avaliar a condição mecânica do disjuntor é a análise da velocidade de operação do disjuntor. Nesse ensaio também é possível avaliar outra variável importante de monitoramento, a sincronia entre os polos.

O ensaio consiste da operação do disjuntor e o tempo efetivo que os contatos do disjuntor levam para realizar o trajeto, seja de fechamento ou abertura. Todos os disjuntores passam por esses testes em fábrica, e ao longo de sua vida são monitorados com intuito de observar se o comportamento mecânico ainda está dentro de limites pré-estabelecidos [27].

##### 3.3.1.1 Tempo de Abertura, Fechamento, Interrupção

Ao se ensaiar um disjuntor deve-se ter conhecimentos sólidos sobre a diferença que existe em cada medição e as informações anotadas nos manuais dos fabricantes. A interpretação errada dos valores de tempo podem levar a emprego de mão de obra e possibilidade de inserção de erros durante a tentativa de manutenção do suposto defeito.

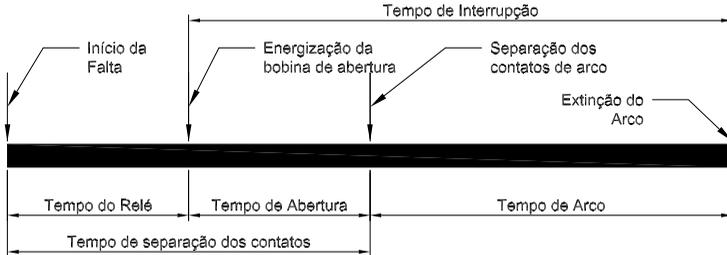
O tempo de abertura, indicado na Figura 31, é o tempo que o disjuntor leva desde o acionamento da bobina de abertura até a separação galvânica do último polo. Normalmente está relacionado ao contato de arco pois esse é o último a perder o contato, justamente pela sua função de suportar a interrupção das correntes de curto, preservando a qualidade dos contatos principais.

Diferentemente do anterior, o tempo de interrupção ou de extinção, leva em consideração também o tempo que o meio isolante leva para interromper a corrente. Portanto, é o intervalo de tempo entre o instante em que se inicia o pulso na bobina de abertura e a extinção total do arco do último polo, como elucidada a Figura 31. O tempo de extinção depende da carga que está sendo interrompida, sua característica de impedância, amplitude, ponto na senoide em que está sendo interrompida, o meio isolante, dentre outros fatores [17].

Análogo ao de abertura, o tempo de fechamento é contabilizado

desde o instante que a bobina de fechamento é acionada até o fechamento galvânico do último polo.

**Figura 31: Relação entre os principais tempos durante o processo de abertura**



Fonte: Baseado em [17]

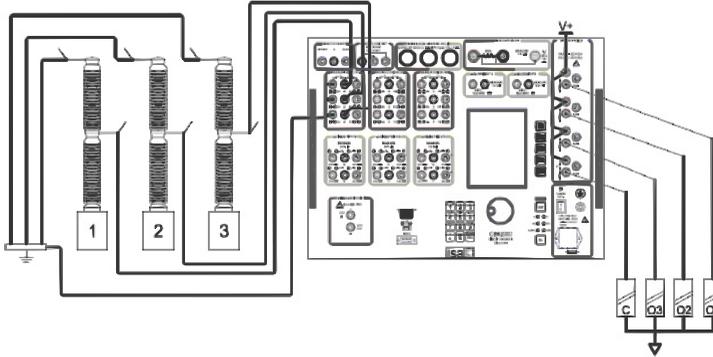
### 3.3.1.2 Analisador de disjuntor

Apesar de existirem inúmeras formas de realizar a medição do tempo, atualmente um método muito difundido utiliza um instrumento que tem uma parte dele conectada em série com o circuito da bobina do disjuntor, que servirá para dar início à operação do disjuntor. Outra parte do instrumento é conectada a cada um dos polos do disjuntor, monitorando a alteração de estado de cada polo individualmente. Na Figura 32 é apresentado um exemplo da montagem de um instrumento para realizar as medições dos tempos em um disjuntor unipolar, com uma bobina de fechamento e 3 de abertura. Dessa forma é possível observar o tempo que os contatos do disjuntor levam para fechar galvanicamente quando sua bobina de fechamento é acionada, ou o tempo de abertura dos contatos do disjuntor a partir do momento que a bobina de abertura é energizada.

Quando acionado, o instrumento emite um pulso na bobina e contabiliza o tempo até que o último polo obtenha uma posição estável. No caso do ensaio de fechamento, o contato pode sofrer pequenos repiques devido à vibração originada do movimento e da desaceleração.

Dependendo do modelo do instrumento é possível obter as curvas impressas ao longo do tempo, da corrente aplicada à bobina assim

Figura 32: Analisador de disjuntor



Fonte: [53]

como o estado de cada polo. Ensaio para avaliar a resistência do contato, monitoramento dos contatos auxiliares do disjuntor, transdutores mecânicos para avaliar a aceleração das partes, dentre outras tantas opções são algumas das possibilidades de se aproveitar o mesmo instrumento para fazer uma melhor avaliação sem ter que dispor de diversos instrumentos.

São levados em consideração na avaliação da velocidade, o tempo total que o disjuntor levou para efetuar a manobra. Normalmente esse valor é informado no manual do fabricante e a partir do valor medido constata-se o estado do mecanismo como um todo. A lubrificação de alguns pontos do mecanismos, bobinas danificadas, sincronismo da chave auxiliar, amortecedores e molas podem, dependendo dos valores encontrados, chamar a atenção [27].

O sincronismo do disjuntor é avaliado observando a discordância entre polos, ou seja, a diferença de tempo entre o polo que finalizou primeiro sua operação e o que realizou por último. Esse tempo não deve ser elevado pois estaria permitindo que correntes circulassem por apenas uma das fases e, no caso de transformadores, esforços físicos poderiam danificar suas bobinas. Indicações de desgaste mais acentuado em um polo podem ser concluídos a partir dessa informação, assim como quebra ou desacoplamento de hastes isolantes ou de transmissão. De uma forma geral, observa-se o comportamento individual de cada polo podendo comparar os resultados obtidos com os polos adjacentes, desde estejam sob as mesmas condições.

Algumas vezes deve-se observar o histórico de manutenção antes de concluir acerca dos valores, pois em casos de substituição de polos não se pode dar tanta importância à comparação entre polos e sim entre os resultados de manutenções anteriores. É também necessário observar o manual de cada disjuntor, pois podem existir projetos especiais de disjuntores em que a discordância é proposital, como no caso de disjuntores projetados para bancos de capacitores que possuem um sistema de sincronismo aliado a uma defasagem mecânica nas hastes que fazem com que a interrupção da corrente ocorra no ponto próximo do  $0^\circ$ , evitando assim o desgaste prematuro do contato durante as manobras diárias dos bancos de capacitores [54].

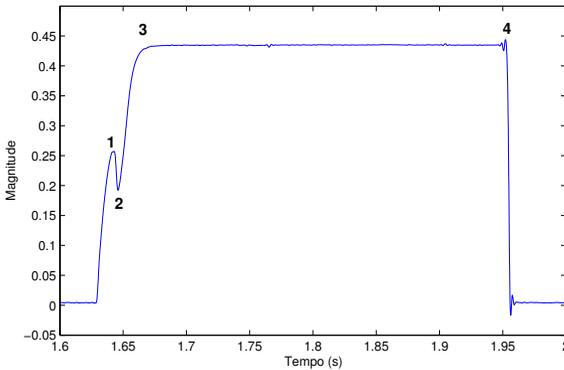
### 3.3.2 Assinatura do mecanismo

Estudos focados nas formas de corrente da bobina podem contribuir com informações relevantes sobre a condição do mecanismo. Esse ensaio consiste em monitorar ao longo do tempo a corrente passante pela bobina. A forma de onda é característica de cada modelo e pode ser dividida em partes para melhor análise.

Com base na Figura 33, ao aplicar a corrente sobre a bobina a corrente se eleva para retirar a armadura da inércia e inciar o movimento até que encontre o gatilho que disparará a energia armazenada no mecanismo (ponto 1). Liberando o gatilho a corrente diminui indicando que o mecanismo está em movimento (ponto 2). A armadura ainda percorre um percurso chegando em sua posição final e novamente observa-se a elevação de corrente (ponto 3). A corrente chega ao seu máximo, estabilizando (pontos 3 a 4) até que o haja a desenergização da bobina quando novamente volta a cair (ponto 4).

Verificando a evolução da inclinação e da magnitude em cada trecho é possível analisar: lubrificação no mecanismo, defeito na bobina, velocidade do mecanismo, atrito no gatilho, desajuste do gatilho, velocidade dos contatos auxiliares e ainda outros parâmetros e combinações deles [5].

O mecanismo pode ter atrasos de operação originados por longos tempos sem operar, fato que aliado à idade do disjuntor e ao ambiente sujeito a intempéries ou a muito pó (área rural) podem ser agravantes. Por isso é recomendável que esse ensaio seja feito na primeira abertura do disjuntor antes de cada manutenção, dessa forma é possível melhor

**Figura 33: Corrente na bobina de abertura**

Fonte: Resultado de ensaio realizado pelo autor

avaliar o estado de lubrificação do mecanismo.

O monitoramento *online* dessa variável é o ideal, pois torna possível avaliar o estado do mecanismo sempre que o disjuntor é solicitado, porém existe certa dificuldade em obter esses dados uma vez que é necessário que a taxa de amostragem de corrente seja maior do que a maioria dos relés de proteção possuem. Dessa forma, esse monitoramento normalmente exige que um novo sistema de monitoramento seja acoplado ao disjuntor, e alguns protótipos também utilizam as informações dos TCs para verificar o tempo de interrupção das correntes. A vantagem de se ter o monitoramento *online* é o aumento significativo de ensaios para comparação com os anteriores ou outros equipamentos de modelo semelhante. O aumento da quantidade de ensaios traz informações significativas para o refinamento das análises que não possuem um padrão definido, cabendo a cada especialista analisar o ensaio individualmente, comparar com os anteriores quando possível, e verificar mudanças significativas que possam ser interpretadas como algum defeito ou possibilidade de defeito no disjuntor. A assinatura do mecanismo é uma característica intrínseca de cada disjuntor podendo muitas vezes se estender para os disjuntores de um mesmo modelo, mas sempre existe a dúvida sobre o limite aceitável de variações e o que essas variações de corrente da bobina significam na avaliação mecânica do mecanismo.

Existem instrumentos portáteis, como o da Figura 34, que per-

**Figura 34: Analisador de assinatura de mecanismo**

Fonte: [55]

mitem a realização desse ensaio com o disjuntor ainda em operação, possibilitando dessa forma a obtenção da característica da corrente do primeiro *trip*. Um só instrumento permite realizar o ensaio em diversos disjuntores sendo uma alternativa para o custo de desenvolvimento de um monitoramento *online*, que exige além do desenvolvimento de um protótipo, um banco de dados e um sistema de comunicação automático entre equipamento e banco de dados. O instrumento portátil pode sanar dúvidas, quando se suspeita de algum valor anormal proveniente do protótipo ou pode ser utilizado como forma de uma empresa iniciar seus estudos nessa linha de assinatura do mecanismo sem o investimento no desenvolvimento de um protótipo.



## 4 PROPOSTA DO SISTEMA

O sistema proposto visa preencher uma lacuna na análise de ensaios dos disjuntores da COPEL Distribuição, automatizando o processo de análise segundo critérios definidos por normas, recomendações de fabricantes descrito nos manuais de instruções e aproveitando também o conhecimento tácito adquirido ao longo dos anos.

O sistema de análise utiliza lógica *fuzzy* para a avaliação dos ensaios, buscando assemelhar-se à análise dos especialistas. A existência de um ensaio com valores abaixo das normas deve ser levado em consideração pelas equipes de manutenção, contudo alguns fatores podem desviar o valor do ensaio.

A adoção de regras para programação da manutenção que não levam em consideração: os ensaios realizados, comparação com outros disjuntores do mesmo modelo ou a evolução dos valores ao longo da sua utilização, despreza o histórico de manutenção que acaba se resumindo à análise imediata do ensaio.

Os ensaios permitem, além de identificar defeitos, monitorar o desgaste dos componentes do disjuntor e sua análise tem ficado a cargo dos técnicos que cada vez possuem menos tempo disponível não destinando a atenção devida a esta tarefa.

O sistema desenvolvido sugere uma data para a próxima manutenção baseado nos ensaios que integram o banco de dados e nas características de cada modelo de disjuntor, agrupando disjuntores do mesmo modelo, fomentando a base de dados de comparação. Além da data para próxima manutenção, os ensaios com valores fora da faixa considerada normal são mostrados para que haja acompanhamento. A análise pelo sistema constitui-se de quatro etapas:

- aquisição de dados;
- dados complementares;
- sistema *fuzzy*;
- saídas do sistema.

## 4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados que servem para subsidiar o sistema proposto originam do *software* de gerência de manutenção utilizado pela COPEL, GMT - Gerenciador da Manutenção da Transmissão e GDMaSE - Gerenciador da Manutenção da Distribuição. Constam no GMT e GDMaSE diversos dados sobre os equipamentos da concessionária dentre eles, dados históricos de ordens de serviço, manutenções realizadas, características técnicas dos equipamentos e da sua instalação.

Para realizar a análise dos ensaios dos disjuntores são necessários alguns bancos de dados para formar a base de conhecimento do sistema.

- banco de dados de ensaios;
- banco de dados de característica técnicas dos disjuntores;
- banco de dados de ordem de serviço;
- banco de dados de valores de referência.

O primeiro é constituído dos valores dos ensaios sob análise. O segundo fornece as características do disjuntor abordando os aspectos técnicos como tensão, modelo, tipo de mecanismo, etc. O banco de dados de ordem de serviço fornece dados de falhas ou defeitos nos disjuntores e por fim, no último banco de dados e único cuja origem é externa ao GMT e GDMaSE, fornecem-se dados de referência para cada modelo de disjuntor separados por tipo de ensaio.

### 4.1.1 Banco de dados de ensaios

Para validação do sistema proposto são analisados os ensaios de disjuntores instalados na COPEL Distribuição, com histórico adquirido entre 1983 e 2012. Os ensaios sob análise do sistema são:

- avaliação do isolamento
  - resistência de isolamento aberto por polo;
  - resistência de isolamento fechado por polo;
  - rigidez dielétrica do óleo.

- avaliação dos contatos  
resistência de contato por polo.
- avaliação da parte mecânica  
tempo de abertura por polo;  
tempo de fechamento por polo;  
discordância na abertura;  
discordância no fechamento.

O banco de dados possui 76.147 resultados de ensaios cadastrados e é constituído dos campos:

- nome do ensaio;
- número do disjuntor;
- data do ensaio;
- valores do ensaio.

No sistema atual de gerenciamento da manutenção, esse banco de dados é alimentado mediante ensaios realizados em campo segundo os critérios da MBC, que leva em consideração o tipo do circuito no qual o disjuntor está instalado. Por exemplo, um disjuntor instalado no circuito geral de um transformador tende a sofrer menos curtos-circuitos que um disjuntor de uma linha de transmissão. Outros critérios como: tipo de isolamento, extinção e tipo de mecanismo também são analisados e para cada combinação existe um grupo de manutenção diferente podendo ter diferença no tempo de intervenção entre manutenções. No sistema atual os ensaios não são analisados e servem normalmente para consultas futuras e não como forma de acompanhamento do estado dos disjuntores.

Esse banco de dados subsidia o sistema com informações relevantes dos ensaios, sendo possível a comparação entre disjuntores do mesmo modelo mas instalados e/ou mantidos por outras equipes de manutenção. A comparação entre disjuntores do mesmo modelo é fundamental e muitas vezes a única forma de avaliar o estado do disjuntor.

Como no sistema não constam dados sobre exatidão ou precisão do ensaio, cuidados adicionais na análise desse banco de dados devem ser tomados buscando a padronização dos métodos de ensaios que podem diferenciar nos ajustes dos instrumentos. Como exemplo, em um

ensaio de resistência de contato o valor de corrente que será aplicado para realizar as medições é fundamental para a precisão dos resultados. A escolha por 10 A prejudica a precisão quando o recomendado é 100 A, podendo afetar os resultados, e conseqüentemente, as conclusões.

Outro aspecto importante é o fundo de escala de cada instrumento. Um exemplo deste item é o ensaio de resistência de isolamento em que mesmo que se aplique semelhante magnitude de tensão entre os polos, o fundo de escala depende do modelo do instrumento e é fundamental para a informação. A comparação simples desses valores pode influenciar a análise do ensaio, levando a crer que 250.000 M $\Omega$  é baixo quando comparado com 500.000 M $\Omega$ , no entanto no primeiro ensaio pode ter sido alcançado o fundo de escala do instrumento não impedindo que valores maiores pudessem ser obtidos com um instrumento dotado de fundo de escala superior. Para contornar essa adversidade o sistema proposto lidará através do uso da média dos maiores valores, maiores detalhes são abordados na Seção 4.3.1.

O banco de dados deve facilitar e evitar erros na inserção de dados pelos usuários. A definição de campos numéricos ou alfa numéricos, quantidade de algarismos, unidades, etc. são importantes para a análise computacional dos ensaios. A Figura 35 exemplifica a tela de consulta de um ensaio no *software* GMT. Na tela de cadastro ou consulta de ensaio do GMT nem todos os campos de resultados de ensaios são preenchidos, isso justifica-se porque com diferentes tecnologias de disjuntor, diferentes ensaios são necessários. Em um disjuntor com extinção a  $SF_6$  não existe sentido em se ter resultados de rigidez dielétrica do óleo. No aproveitamento de manutenções, em que a finalidade não é o ensaio no disjuntor, pode-se aproveitar um desligamento e realizar um ensaio no disjuntor como forma de acompanhamento. Nesses e em outros casos também não existem todos os campos de resultados preenchidos.

É fundamental que as equipes de manutenção registrem os ensaios corretamente no gerenciador, subsidiando o sistema com informações atuais e corretas, servindo de referências para análise das demais equipes.

### 4.1.2 Banco de dados de características técnicas dos disjuntores

Esse banco de dados reúne as informações técnicas do disjuntor. Além de um número sequencial único cadastrado no momento de sua instalação, esse banco de dados deve fornecer as principais informações do equipamento tais como: modelo, fabricante, tipo de mecanismo, tipo de extinção, tensão de isolamento, tensão de operação, nível básico de

**Figura 35: Cadastro de ensaio no sistema de gerenciamento da manutenção**

 Equipamentos Eletronecânicos \_ □ ×

Família: 052D Disjuntor

Localização: TRA-DDI/SEs/CEL/PTO/DVI/FOC

Equipamento: 052D-02086 Novo Equipamento

N° Equipamento  N° do Patrimônio

Dados Gerais | Características | Ensaios | Históricos | Anexos | Filhos da Família | Relaç. ◀ ▶

Lista de Ensaios | Detalhes do Ensaio

Tipo: Parcial Anexos...

Data: 18/08/2005 N° OS: 67808

Ensaio: Disjuntores

Observ.:

Parâmetro	Valor	Unidade
Resistência do Isolamento - P3 Fechado	250000	MΩhm
▶ Resistência ôhmica - P1	113	uΩhm
Resistência ôhmica - P2	123	uΩhm
Resistência ôhmica - P3	121	uΩhm
Tempos de Operação - P1 Fechamento	131,3	ms
Tempos de Operação - P2 Fechamento	131,4	ms
Tempos de Operação - P3 Fechamento	131,5	ms
Tempos de Operação - P1 Abertura	24,8	ms
Tempos de Operação - P2 Abertura	24,7	ms
Tempos de Operação - P3 Abertura	24,5	ms

Fonte: Imagem da tela de consulta de ensaio do *software* GMT

impulso, corrente nominal, corrente de curto, número de série, dentre outros.

Com uma grande gama de modelos e fabricantes cadastrados ao longo dos anos, o sistema fornece ao usuário informações básicas que estão na placa do equipamento sem a necessidade de consultar manuais, projetos ou se deslocar para verificar o disjuntor.

Desse banco de dados são utilizados no sistema proposto somente alguns campos, são eles:

- número do disjuntor;
- modelo;
- data de fabricação.

A Figura 36 ilustra a tela de cadastro do *software* utilizado. Constam no cadastro 1.700 disjuntores, e a padronização de alguns campos facilita as consultas computacionais. O campo modelo é um caso no qual um simples espaço entre os caracteres pode alterar o entendimento computacional desse campo, portanto a adoção de padrões e treinamento dos usuários para a correta interpretação da placa são essenciais para a consistência dos dados.

### 4.1.3 Banco de dados de ordens de serviço

Toda intervenção no disjuntor é registrada através de uma OS - Ordem de serviço, na qual são anotadas além da descrição do serviço, custos e os resultados dos ensaios realizados. A Figura 37 ilustra como essa tarefa é cadastrada no sistema. As OS são classificadas de acordo com o tipo de serviço realizado, seja ela uma melhoria, ajuste, preventiva, corretiva por falha, corretiva por defeito, etc.

No sistema desenvolvido esse banco de dados serve como subsídio de dados dos defeitos e falhas ocorridos em disjuntores entre 2002 e 2012, totalizando 1.122 OS.

Não existe, no sistema atual, a possibilidade de consulta de OS aplicando filtros de pesquisa, como por exemplo restringindo a um modelo de disjuntor ou o índice de falha ou defeito em determinado modelo. Os relatos das OS, ou até mesmo a quantidade de OS de defeito ou falha nos disjuntores são atualmente muito pouco aproveitados.

**Figura 36: Cadastro de equipamento no sistema de gerenciamento da manutenção**

Equipamentos Eletromecânicos	
Família:	Disjuntor
Localização:	TRA-DDI/SEs/CEL/PTO/DVI/FOC
Equipamento:	052D-02086 <span style="float: right;">Novo Equipamento</span>
<input type="button" value="Buscar"/> <input checked="" type="radio"/> N° Equipamento <input type="radio"/> N° do Patrimônio	
Dados Gerais   Características   Ensaios   Históricos   Anexos   Filhos da Família   Relaç.	
Localização:	TRA-DDI/SEs/CEL/PTO/DVI/FOC
Núm. do Patrimônio:	3510300705
N° Enrolamentos:	
N° Fases:	3
Núm. de Série:	2129685-23
Ano de Fabricação:	1988
Equipamento Pai:	
Grupo de Manutenção:	D03
Tensão Oper.:	138
Corrente Máxima Instantânea (kA):	25
Chv. Comut.:	
Fabricante:	Sprecher Energie do Brasil S/A
Código Material:	
Eq. Móvel:	
Grupo de Ensaio:	
Tipo de Equipam.:	HGF 112/1
N° Empreend.:	
N° Operac.:	3
Número MBI:	
Núm. de Série Chave SAP:	212968523
Núm. Imobilizado:	310056002642
Datas Entrada na Copel: 16/12/1990	
Data de entrada no Local: 04/09/1998	
Término da Garantia:	
Vencimento do Seguro:	
Inclusão no Cadastro:	18/12/1990 00:0
Pagamento N. Fiscal:	
Término calibração:	
Última Alteração Data:	05/11/2012 12:53
Responsável:	47954

Fonte: Imagem da tela do *software* GMT

Nesse banco de dados a padronização de campos pode desviar o pesquisador da causa raiz do problema. Entende-se como causa raiz o defeito que de fato origina um defeito maior ou uma falha. Nem sempre é possível identificar a causa raiz do defeito em uma avaliação preliminar do equipamento. Com frequência a equipe de manutenção soluciona o defeito, mas a causa raiz somente evidencia-se após repetidos acontecimentos. Por exemplo, se um disjuntor está com o tempo de abertura elevado, a ação tomada pela equipe é a lubrificação do mecanismo devido à degradação da graxa, contudo após a repetição do

mesmo defeito em um curto espaço de tempo, leva a equipe a identificar que existe degradação da graxa devido à penetração de impurezas na caixa do mecanismo, remetendo à causa raiz. Impedindo que as impurezas adentrem ao mecanismo deve interromper a degradação da vedação e portanto redução da velocidade do mecanismo.

Independente da causa raiz, o apontamento de um defeito ou falha em disjuntores se torna relevante permitindo identificar de forma comparativa a qualidade de um modelo, bem como a taxa de falha.

É intrínseco da finalidade dos disjuntores que sua disponibilidade seja extremamente alta, contribuindo para confiabilidade do sistema, entretanto uma vez que quase não existe abundância de registros, sua aplicabilidade é melhor empregada em modelos de disjuntores que possuam grandes históricos de falhas, estando fortemente correlacionado à quantidade de exemplares e idade.

**Figura 37: Ordem de serviço**

**Consulta Ordem de Serviço**

Número da OS: [ ] Situação: Fechada Área: SMLS LD Responsável: Walmir Francisco da Silva CANCELADA: Não

Previsão Início: 25/04/2005 Término: 26/04/2005 Realizado Início: 25/04/2005 Término: 25/04/2005 Área: SMLS LD Data: 25/04/2005

Localização: TRA-DDI/SEs/LNA/APA/IVP Equipe: LNA Especialidade: Eletromec Reprogramada: Não

Empresa: COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA Hxh: 16 Tempo Deslocamento: 5

Descrição da OS | Linhas de Transmissão | Material Previsto OS | Material Realizado OS | Participantes OS | Custos

Posição	Equipamento	Descrição	Equipe	Especialidade	Clas.	Comentário
DJ68	052D-10572	Verif. sinalização monitorament...	LNA	Eletromec	CF	Verificar Sina

Fonte: Imagem da tela do *software* GMT

#### 4.1.4 Banco de dados de valores de referência

Após a realização dos ensaios é indispensável a avaliação dos resultados, buscando identificar valores discordantes dos indicados em

manual, norma ou realizando a comparação entre polos ou manutenções anteriores. A existência de uma grande variedade de modelos impossibilita a memorização de todos os valores de referência dos ensaios, e no sistema atual essas referências não são apresentadas aos usuários, que inúmeras vezes não dispõem do manual para consulta, sobretudo em vetustos disjuntores.

Esse banco de dados visa sintetizar as informações de manuais, normas e em casos omissos, o conhecimento tácito para definir valores limites para os ensaios. A comparação entre polos ou manutenções de disjuntores do mesmo modelo não se torna atrativa porque mesmo valores significativamente dissonantes podem representar vida útil normal. Influências eletromagnéticas provenientes da subestação, diferença entre instrumentos, forma de montagem do ensaio também podem influenciar os resultados levando a interpretação incorreta.

São definidos então, para cada ensaio e modelo de disjuntor um valor limite superior ou inferior para cada ensaio.

#### 4.1.5 Seleção dos ensaios

A comparação simples dos ensaios do espécime pode não identificar defeitos de fabricação. Mesmo em disjuntores que compartilham das mesmas características: tensão, corrente, mecanismo e meio de extinção, as referências de valores limítrofes podem ser diferenciados para cada modelo de disjuntor. Cada fabricante possui um processo fabril diferenciado gerando características específicas para cada um de seus modelos, sendo perceptíveis até mesmo diferentes características dentre equipamentos do mesmo fabricante, por exemplo, um disjuntor instalado ao tempo e outro abrigado em cubículo.

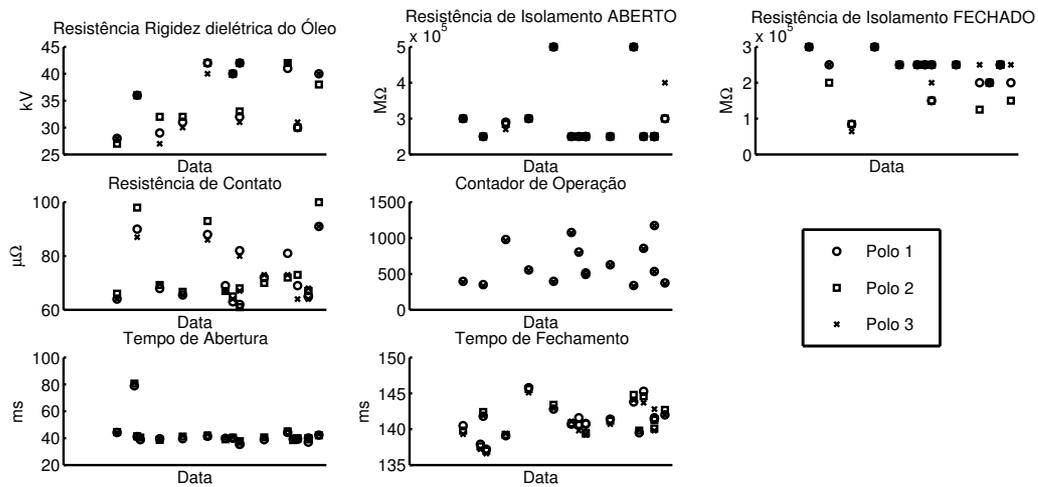
A diferença de tecnologias de mecanismos e meios isolantes são significantes, não sendo coerente a comparação de ensaios entre disjuntores isolado a óleo e mecanismo hidráulico e um disjuntor com isolamento a vácuo e mecanismo a mola. A maneira encontrada para melhorar a base de comparação foi agrupar os disjuntores por igualdade de modelo. Dessa forma são comparados somente disjuntores semelhantes, dotados das mesmas características e que devem possuir resultados de ensaios muito próximos. Da mesma forma, as falhas/defeitos tendem a ser similares, já que gozam do mesmo projeto, mecanismo, polos e processo fabril, estando expostos a condições de envelhecimentos equi-

valentes.

Os resultados de ensaios de um espécime são comparados com os valores de referência e também com os demais disjuntores do mesmo modelo, denominados de irmãos. A utilização dos ensaios dos irmãos para comparação permite avaliar se a velocidade de desgaste do espécime é normal ou característica intrínseca do modelo. Quanto maior a quantidade de irmãos, melhor é a análise dos dados e os efeitos das interferências nos ensaios são diluídos.

Na Figura 38 são ilustrados todos os resultados de ensaios de um determinado modelo de disjuntor (disjuntores irmãos) ao longo dos anos. Para cada data normalmente três resultados são obtidos, referindo-se aos valores individuais de cada polo. Na maioria dos ensaios existe a tendência dos valores estarem próximos, essa característica é recorrente sempre que se comparam disjuntores do mesmo modelo e não devia ser diferente uma vez que seguem as mesmas orientações de normas e manuais. Valores excessivamente discordantes provavelmente indicam defeitos no espécime.

Figura 38: Ensaios dos irmãos



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2 DADOS COMPLEMENTARES

### 4.2.1 Taxa de falha

Normalmente os fabricantes não fornecem os dados de taxa de falha dos seus modelos de disjuntores, além disso a taxa de falha é somente um indicador não devendo ser utilizado para comparação da qualidade dos diferentes modelos de disjuntores, pois a forma como é definida a taxa de falha possui forte relação com a quantidade de exemplares, podendo trazer equívocos de avaliação. A taxa de falha de um modelo de disjuntor pode ser calculada contabilizando as falhas ocorridas em um determinado período, sendo possível então reaplicar aos disjuntores mais novos.

A taxa de falha é calculada para que o sistema estabeleça o prazo máximo para a próxima manutenção. Dessa forma a intervenção no disjuntor é sugerida quando a probabilidade dele falhar ultrapassa um determinado valor.

Para o cálculo da taxa de falha o sistema verifica para cada falha ou defeito que ocorreu em um espécime ou irmão, quantos irmãos mais velhos existiam na data da ocorrência. Com base nisso, aplica-se (1) considerando que houve somente 1 falha por ano. Como o processo é realizado para todas as ocorrências dos irmãos, após a finalização da análise somam-se as taxas que ocorreram no mesmo ano, formando uma tabela com valores de taxa de falha por idade. Abaixo segue exemplo da metodologia de cálculo.

$$\text{Taxa De Falha} = \frac{\text{Número De Falhas Por Ano}}{\text{Universo De Disjuntores}} \quad (1)$$

**Tabela 7: Taxa de falha**

Idade	Ano		Universo	Taxa de Falha	
	Fabricação	OS		Unitário	Soma
5	1998	2003	50	0,02000	0,06000
	1998	2003	50	0,02000	
	1998	2003	50	0,02000	
6	1998	2004	50	0,02000	0,02000

*Continua na próxima página*

**Tabela 7: Taxa de falha**

Idade	Ano		Universo	Taxa de Falha	
	Fabricação	OS		Unitário	Soma
7	1998	2005	50	0,02000	0,02000
8	1998	2006	50	0,02000	0,02000
9	1995	2004	41	0,02439	0,15756
	1995	2004	41	0,02439	
	1995	2004	41	0,02439	
	1995	2004	41	0,02439	
	1998	2007	50	0,02000	
	1998	2007	50	0,02000	
10	1998	2007	50	0,02000	0,06349
	1995	2005	41	0,02439	
	1998	2008	50	0,02000	
11	1998	2008	50	0,02000	0,06349
	1995	2006	41	0,02439	
	1998	2009	50	0,02000	
12	1995	2007	41	0,02439	0,12439
	1998	2010	50	0,02000	
	1998	2010	50	0,02000	
	1998	2010	50	0,02000	
	1998	2010	50	0,02000	
	1998	2010	50	0,02000	
13	1995	2008	41	0,02439	0,22634
	1995	2008	41	0,02439	
	1995	2008	41	0,02439	
	1995	2008	41	0,02439	
	1995	2008	41	0,02439	
	1995	2008	41	0,02439	
	1998	2011	50	0,02000	
	1998	2011	50	0,02000	
	1998	2011	50	0,02000	
	1998	2011	50	0,02000	
	1993	2007	1	1,00000	
	1993	2007	1	1,00000	
	1995	2009	41	0,02439	

*Continua na próxima página*

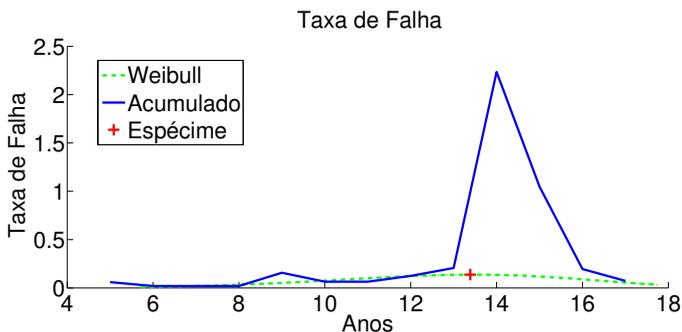
Tabela 7: Taxa de falha

Idade	Ano		Universo	Taxa de Falha	
	Fabricação	OS		Unitário	Soma
14	1995	2009	41	0,02439	2,23512
	1995	2009	41	0,02439	
	1995	2009	41	0,02439	
	1995	2009	41	0,02439	
	1995	2009	41	0,02439	
	1995	2009	41	0,02439	
	1995	2009	41	0,02439	
	1995	2009	41	0,02439	
15	1993	2008	1	1,00000	1,04878
	1995	2010	41	0,02439	
	1995	2010	41	0,02439	
16	1995	2011	41	0,02439	0,19512
	1995	2011	41	0,02439	
	1995	2011	41	0,02439	
	1995	2011	41	0,02439	
	1995	2011	41	0,02439	
	1995	2011	41	0,02439	
	1995	2011	41	0,02439	
17	1995	2012	41	0,02439	0,07317
	1995	2012	41	0,02439	
	1995	2012	41	0,02439	

Na coluna Universo da Tabela 7 é possível verificar que a quantidade de disjuntores não é constante e influencia na taxa de falha, principalmente quando ocorreram falhas no único disjuntor instalado com uma determinada idade, como na primeira linha do 14º ano.

A adoção somente dos irmãos mais velhos para definição do universo é necessária para não se comparar disjuntores antigos com recém instalados. Assim, participam do universo somente os disjuntores que já possuíam idade para ter falhado naquela ocasião. Uma alternativa testada foi comparar somente com os irmãos gêmeos, contudo quando o lote de disjuntores que entrava em um determinado ano era pequeno e um deles falhava, às vezes por defeitos de fabricação específicos da-

Figura 39: Taxa de falha por idade



Fonte: Elaborado pelo autor

quela unidade, que não estão presentes nos demais irmãos, a taxa de falha se elevava demasiadamente. O universo era insuficiente para se estender a taxa de falha para os demais irmãos. Não é confiável avaliar um pequeno lote e estender o entendimento a grandes lotes.

Agrupando as taxas de falha por idade da Tabela 7 é possível traçar um gráfico, como o da Figura 39, com a evolução da taxa de falha conforme a idade do disjuntor, semelhante ao que ocorre na curva da banheira. Entretanto, por serem analisados somente disjuntores instalados não se observa a curva da banheira completa, somente se tem dados de no máximo o irmão mais velho. Apesar de se possuir o histórico de falhas, não existe muita diferença de idade entre os irmãos; isso ocorre porque a evolução tecnológica faz com que os fabricantes lancem novos modelos acompanhando o mercado. Os modelos antigos então saem de linha e uma nova família de modelos começa a ser fabricada. Se existem disjuntores com 35 anos de idade e sua fabricação foi ao longo de 10 anos, não existirão irmãos mais velhos do que isso, fazendo com que muito do histórico de falha não contribua para estimação do futuro dos disjuntores. Considerando um novo modelo de disjuntor entrando em operação hoje, não se terá nenhuma projeção de taxa de falha para esse equipamento, mas eles serão fundamentais para subsidiar dados para os próximos irmãos mais novos.

A limitação dessa metodologia é a dificuldade em se estimar a taxa de falha para os disjuntores mais velhos, já que não existem histórico de falhas disponíveis dada a reduzida quantidade desses espécimes, melhor ilustrado pela baixa taxa de falha a partir do ano 16

na Figura 39. Por esse motivo e para retirar picos e vales, é necessário ajustar os dados segundo uma curva.

#### 4.2.1.1 Ajuste dos dados da Taxa de Falha

Os dados de taxa de falha obtidos através da metodologia descrita na Seção 4.2.1 servem de referência para a criação de uma distribuição de Weibull. A adoção da distribuição de Weibull foi pela sua intrínseca característica de flexibilidade podendo trabalhar com taxas de falhas crescentes, decrescentes ou constantes possibilitando sua aproximação também das demais distribuições. A função exponencial foi testada, mas como possui taxa de falha constante não houveram resultados de aderência satisfatórios.

A função densidade de probabilidade ou mais comumente conhecida pelo seu acrônimo da língua inglesa PDF - *Probability Density Function* de Weibull possui dois parâmetros sendo  $a$  o parâmetro de escala e  $b$  o de forma, sendo então defina por:

$$f(t|a, b) = \frac{b}{a} \left( \frac{t}{a} \right)^{(b-1)} e^{-(t/a)^b} \quad (2)$$

A taxa de falha é função da PDF  $f(t)$  e sua CDF - *Cumulative Distribution Function*;  $F(t)$ , sendo a CDF de Weibull definida por:

$$F(t) = \int f(t)dt = 1 - e^{-(t/a)^b} \quad (3)$$

Considerando a função  $h(t)$  para representar a taxa de falha, tem-se:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (4)$$

Substituindo 2 e 3 em 4 tem-se:

$$h(t) = \frac{b}{a} \left( \frac{t}{a} \right)^{(b-1)} \quad (5)$$

A taxa de falha para a função exponencial em função de sua PDF definida por:  $f(t) = (\lambda e^{-\lambda t})$  e a CDF definida por:  $F(t) = (1 - e^{-\lambda t})$

é uma constante, como melhor observado abaixo:

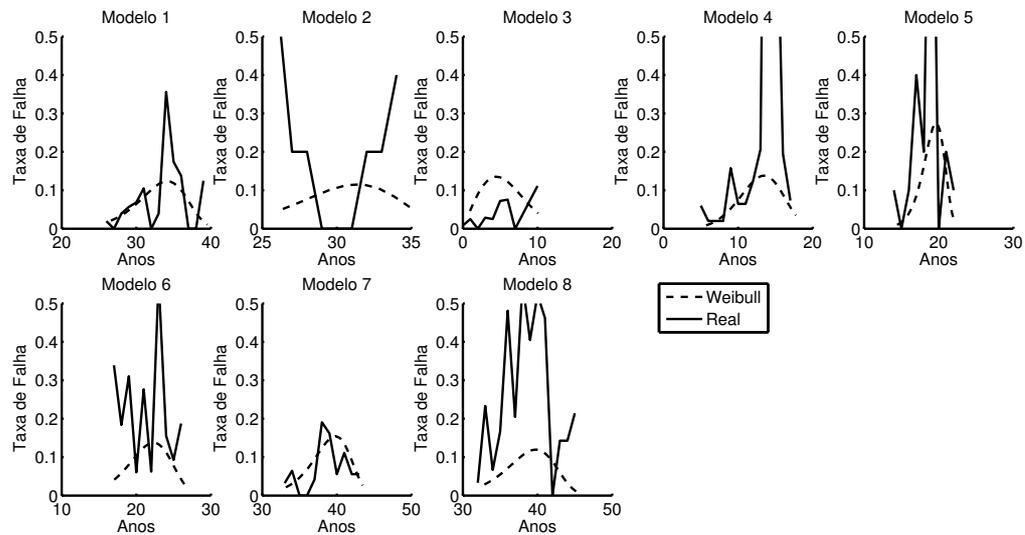
$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda(t)}}{e^{-\lambda(t)}} = \lambda \quad (6)$$

Para descrição das equações 2 a 6 foi utilizado como referência [56].

Percebe-se a existência de dependência do tempo  $t$  na taxa de falha  $h(t)$  referente a distribuição Weibull demonstrada em 5, diferentemente do que ocorre em 6 que possui apenas uma constante independente do tempo.

Alterando adequadamente os parâmetros  $a$  e  $b$  da PDF de Weibull é possível conter os dados da taxa de falha da Tabela 7 em um intervalo de confiança de 95%, como ilustrado na Figura 39.

Figura 40: Taxas de falhas de diferentes modelos de disjuntores



Fonte: Elaborado pelo autor

Estendendo tal entendimento, na Figura 40 são apresentados os dados de taxa de falha e a aproximação pela densidade de Weibull de diferentes modelos de disjuntores, variando tecnologias, idades e níveis de tensão. O uso da aproximação por uma curva impede que seja interpretado que um disjuntor com 31 anos não falhe enquanto que um com 32 apresente taxa de falha equivalente a 0,20 falhas por ano como é o caso no gráfico do disjuntor modelo 2.

A taxa de falha adotada no sistema como aceitável foi de 0,1 falhas por ano. Esse valor foi encontrado heurísticamente após diversas simulações e a análise de resultados, que consistiu em verificar o tempo sugerido para próxima manutenção pelo sistema proposto, comparando-o com o sistema atual. Essa metodologia foi aplicada pelo fato de que o sistema atual atende, na sua maioria, a exigência da concessionária quanto aos índices de taxa de falha em disjuntores.

### **4.2.2 Definição dos limites**

Para definir a data para próxima manutenção o sistema utiliza a taxa de falha como referência para prazo máximo para intervenção, buscando reduzir a probabilidade do espécime falhar.

Intervenções frequentes nos disjuntores podem trazer a inserção de falhas no equipamento, principalmente quando é identificada a necessidade de ajustes no mecanismo ou polos. A frequência de intervenção também reduz a confiabilidade do sistema que ficará com um equipamento indisponível durante a manutenção, além de acarretar em custos elevados de manutenção. A taxa de falha de irmãos novos tende a ser elevada quando comparada com irmãos que estão na sua fase adulta, a curva da banheira ilustra isso. A falha no início da operação se dá por defeitos de fabricação e não por desgastes, não havendo formas eficazes de se identificar essas possíveis falhas através de ensaios ou intervenções. Essas razões levam a necessidade de não utilizar somente a taxa de falha como referência e definir limites mínimos entre intervenções.

A evolução da tecnologia dos disjuntores reduz a necessidade de manutenção, mas existe instalada grande quantidade de disjuntores com tecnologias obsoletas que devem ser mantidos com maior frequência. Existe a necessidade de se levar em consideração a tecnologia na definição do tempo mínimo entre intervenções. A frequência de

manutenções está fortemente relacionada a deterioração do meio isolante. Os mecanismos, apesar de terem evoluído também, têm seus índices de qualidade fortemente relacionados à deterioração dos lubrificantes ou vedações, que tendem a ter vida útil superior a do meio isolante. Apesar de existirem significantes diferenças entre as formas de extinção, para as necessidades de definição de tempo máximo entre manutenções, podem ser agrupados os disjuntores em dois grandes grupos, os que utilizam óleo como meio extintor e as demais tecnologias. Se for adotada para seleção dessas duas categorias a idade do disjuntor, além de se estar acertando na maioria da seleção por tecnologia, leva-se em consideração também modelos que empregam tecnologias novas e não consolidadas na época, por exemplo, os primeiros disjuntores a  $SF_6$  ficariam na mesma categoria que os disjuntores a óleo. Embasado no descrito foi adotada a seguinte definição para tempo mínimo entre intervenções.

$$Tempo_{\min}(\text{idade}) = \begin{cases} 10 \text{ anos,} & \text{se idade} > 20 \text{ anos;} \\ 15 \text{ anos,} & \text{se idade} \leq 20 \text{ anos;} \end{cases} \quad (7)$$

Na mesma linha de pensamento anterior, é necessário definir o tempo máximo entre intervenções. Por mais que evolua a tecnologia é necessário, pelo menos, intervir no disjuntor para realizar ensaios de acompanhamento. Esse fato ocorre quando o disjuntor está em sua fase adulta e estável da curva da banheira, dado que essa fase tende a ser mais extensa fase da vida do disjuntor, e não se pode negligenciar o fato de alguns disjuntores possuírem vida menor do que outros. Isso ocorre porque nem todos possuem a mesma característica de uso, alguns são acionados com menor frequência ou com níveis de curto-circuito de menores magnitudes. A duração, quantidade de operações e intensidade das correntes de curto circuito interrompidas são os maiores contribuidores para a redução da vida útil do disjuntor, por isso é necessário acompanhar esses desgastes através de ensaios definindo tempos máximos entre intervenções.

$$Tempo_{\max}(\text{idade}) = \begin{cases} 20 \text{ anos,} & \text{se idade} > 20 \text{ anos;} \\ 40 \text{ anos,} & \text{se idade} \leq 20 \text{ anos;} \end{cases} \quad (8)$$

Em ambos os casos a chance de se alcançar os limites definidos entre manutenções é extremamente raro pois a data para manutenção somente será definida após o sistema avaliar os ensaios e somente se todos os ensaios estiverem com resultados excelentes, não se sobrepondo a análise dos ensaios.

### 4.2.3 Intervalo máximo entre manutenções

Para a definição do intervalo máximo entre manutenções primeiro é verificado quando a taxa de falha excede 0,1 falhas/ano na região de idades superiores ao do espécime. Após, são aplicados os critério de intervalos máximo e mínimo definidos por (7) e (8) respectivamente, como demonstrado em (11).

$$afr = \lim_{t \rightarrow idade} [f(t|a,b)_k > 0,1; \quad t > idade] \quad (9)$$

$$\Delta idade = afr - idade \quad (10)$$

$$Int_{\text{máx}} = \begin{cases} \min\{\max[\Delta idade; 10]; 20\} \text{ anos,} & \text{se } idade > 20 \text{ anos;} \\ \min\{\max[\Delta idade; 15]; 40\} \text{ anos,} & \text{se } idade \leq 20 \text{ anos;} \end{cases} \quad (11)$$

onde:

$afr = idade$ , em anos, na qual ocorre a primeira taxa de falha acima de 0,1 superior a idade ( $i$ ) do espécime

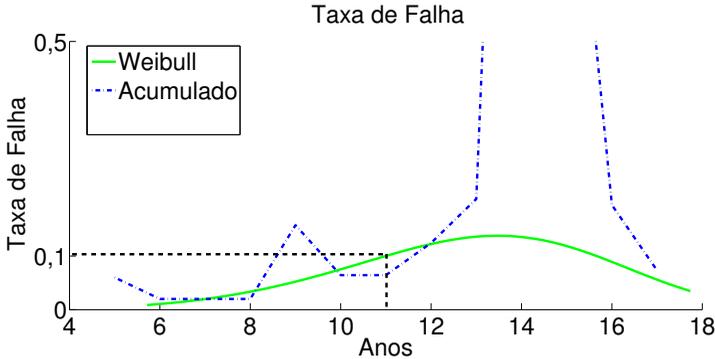
$f(t|a,b)_k = \text{PDF de Weibull para o modelo de disjuntor } (k)$ , definido em (2)

$idade = idade$ , em anos, do espécime

$Int_{\text{máx}} = \text{Intervalo máximo entre manutenções, em anos}$

Considerando, na Figura 41 um disjuntor com 10 anos de idade, o espécime possui sua próxima taxa de falha acima de 0,1 falhas/ano próximo a 11 anos, representado pelas linhas tracejadas. O intervalo máximo entre manutenções seria então 1 ano. É necessário portanto aplicar o critério de tempo mínimo, que para disjuntores com idades inferiores a 20 anos resulta em 15 anos. Para o caso exemplificado,

Figura 41: Definição do intervalo máximo entre manutenções



Fonte: Elaborado pelo autor

todas os ensaios deverão ter datas de próxima manutenção entre 0 e 15 anos.

#### 4.2.4 Cálculo da discordância entre polos

No ensaio de tempo de disjuntores é fundamental que seja verificada a simultaneidade dos polos durante operações, tanto no fechamento quanto na abertura. Essa análise é realizada pelo mantenedor com base no resultado do ensaio, contudo não existe hoje um campo para se anotar esses dados no sistema de gerenciamento de manutenção da COPEL, sendo necessário que o sistema apresentado efetue os devidos cálculos.

O cálculo consiste da subtração do tempo do polo que levou mais tempo para realizar a operação, pelo tempo do polo que levou o menor tempo. O resultado deve estar dentro do valor indicado no manual ou na ausência desse, pode-se adotar o item 5.101 da norma IEC 62271-100:2006, ou seja:

“Quando nenhuma exigência especial é estabelecida com relação à operação simultânea dos polos, a diferença máxima entre os instantes de toque dos contatos durante o fechamento não deve exceder um quarto do período da frequência nominal.”

“Quando nenhuma exigência especial é estabelecida com

relação à operação simultânea dos polos, a diferença máxima entre os instantes de separação dos contatos na abertura não deve exceder um sexto do período da frequência nominal.”

### 4.3 SISTEMA FUZZY

O sistema *fuzzy* pode ser aplicado em situações no qual deseje-se modelar e manipular matematicamente informações de forma a se assemelhar com o raciocínio humano. Na lógica clássica um evento só possui duas alternativas: ocorrer ou não, na teoria *fuzzy* o evento está sujeito a uma função de pertinência e pode ocorrer ou não com certa pertinência.

Um exemplo que esclarece a utilização da lógica *fuzzy* é na avaliação do IMC - Índice de Massa Corpóreo de uma pessoa. Supondo que IMC igual a 25 signifique acima do peso, um sujeito que possua IMC 25,1 estará acima do peso segundo a teoria clássica. Já pela teoria *fuzzy* seria enquadrado segundo uma função de pertinência modelada por um especialista, que poderia resultar em maior pertinência no grupo de pessoas acima do peso e menor pertinência no grupo de pessoas com peso ideal, permitindo que esse sujeito esteja com IMC um pouco acima do normal.

Com base em [57], um conjunto *fuzzy* pode ser descrito matematicamente como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); \quad x \in U \quad \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (12)$$

onde:

$A$  = subconjunto *fuzzy*

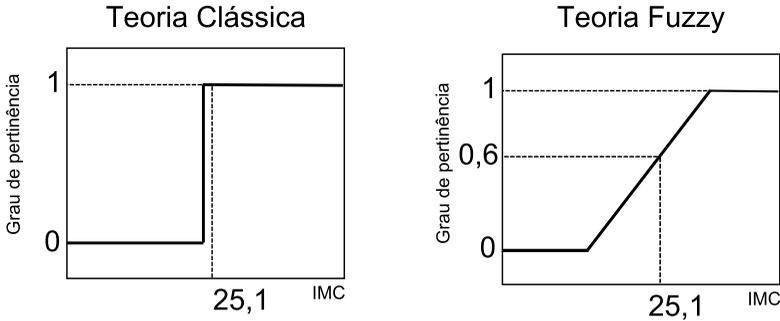
$U$  = conjunto *fuzzy*

$\mu_A(x)$  = função de pertinência de  $A$  com grau  $x$

sendo que:

$$\begin{aligned} \mu_A(x) = 1 & \quad x \text{ pertence totalmente ao conjunto } A \\ 0 < \mu_A(x) < 1 & \quad x \text{ pertence parcialmente ao conjunto } A \\ \mu_A(x) = 0 & \quad x \text{ não pertence ao conjunto } A \end{aligned}$$

Figura 42: Função de Pertinência



Fonte: Elaborado pelo autor

No exemplo citado, a Figura 42 ilustra o funcionamento da função com 0,6 pertinência no conjunto de pessoas acima do peso. Essa função pode ser modelada diferentemente, através de diversos tipos de curvas, mas comumente três são utilizadas: triangular, gaussiana e trapezoidal.

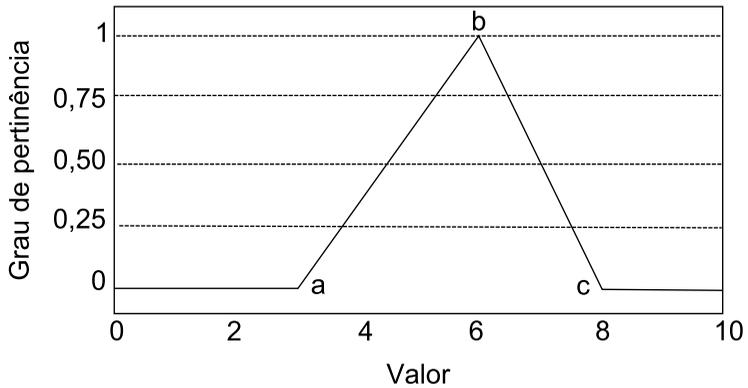
A função de pertinência triangular é composta de 3 pontos, sendo  $a$  e  $c$  com pertinência igual a 0 e  $b$  com pertinência igual a 1, as arestas  $(a, b)$  e  $(b, c)$  possuem os valores intermediários. A função de pertinência é então modelada segundo [57] através de (13) e ilustrada pela Figura 43.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (13)$$

Para a definição da função de pertinência gaussiana são necessários dois valores,  $\mu$  e  $\sigma$  que representam a média e o desvio padrão respectivamente, sendo a função de pertinência representada por (14) e ilustrada pela Figura 44 [57].

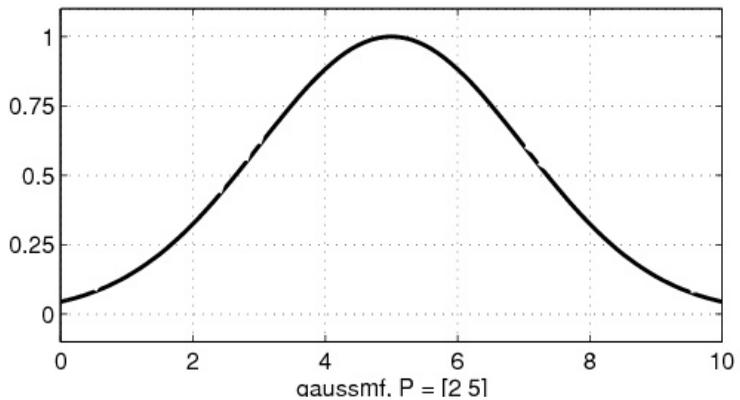
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ está fora do domínio} \\ e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} & \end{cases} \quad (14)$$

Figura 43: Função de pertinência triangular



Fonte: Elaborado pelo autor

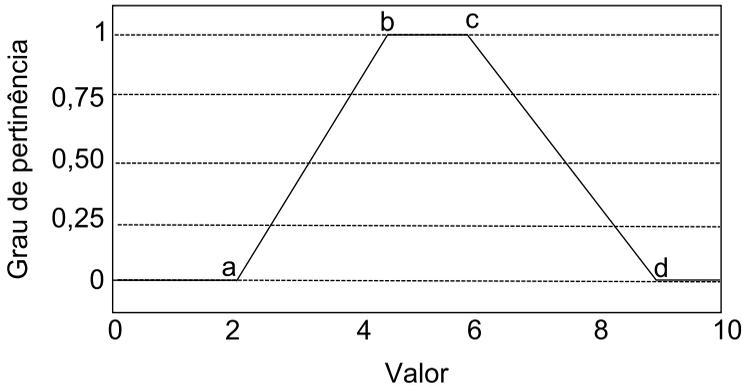
Figura 44: Função de pertinência gaussiana



Fonte: [58]

A função de pertinência trapezoidal necessita de 4 pontos, sendo  $a$  e  $d$  com pertinência igual a 0;  $b$ ,  $d$  e a aresta  $(b,c)$  com pertinência igual 1. As arestas  $(a,b)$ ,  $(c,d)$  possuem valores de pertinência entre 0

Figura 45: Função de pertinência trapezoidal



Fonte: Elaborado pelo autor

e 1, sendo definida por (15) e ilustrada pela Figura 45 [57].

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (15)$$

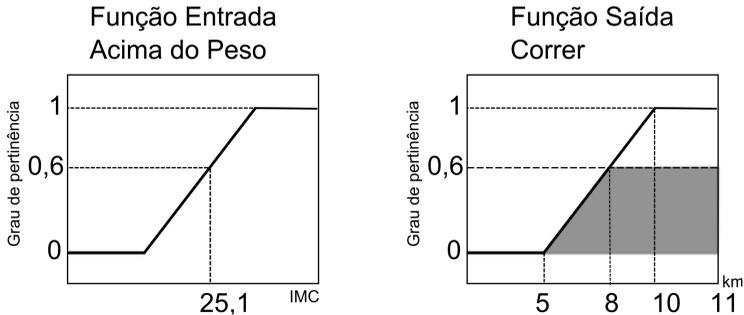
O sistema *fuzzy* possui algumas etapas. A primeira consiste da fuzzificação dos valores, ou seja, determinar os graus de pertinência das entradas com relação aos conjuntos *fuzzy*. No exemplo, a fuzzificação relacionaria o valor do IMC 25,1 em 0,6 de pertinência, como ilustrado pela Figura 46

Tendo os valores das pertinências, a etapa seguinte consiste do estabelecimento das regras, normalmente no formato SE, ENTÃO. São as regras que fazem as entradas se relacionarem com as funções de pertinência de saídas. No exemplo poderia existir a regra SE acima do peso ENTÃO correr.

Por último, a defuzzificação realiza a transformação da variável de saída *fuzzy* para um valor numérico. Isso pode ocorrer de diversas formas, mas a mais empregada, e utilizada no sistema proposto é do centroide. O valor numérico da defuzzificação estará no centroide da soma das áreas das funções de pertinência de saída. No exemplo, existe

apenas uma função de pertinência para entrada e outra para saída. Como o grau de pertinência de entrada foi 0,6 a Figura 46 ilustra a área para cálculo do centroide que representa a distância que o sujeito deve correr, ou seja, 8,7 km.

**Figura 46: Exemplo Sistema fuzzy**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3.1 Funções de Pertinência de Entrada

A modelagem das funções de pertinência de entrada para cada ensaio leva em consideração o tipo de ensaio que está sendo tratado.

Alguns ensaios resultam em valores que quanto menores melhores são os indicativos de conformidade, denominados de Grupo 1. Os ensaios que se enquadram nessa condição são:

- resistência de contato;
- tempo de abertura;
- tempo de fechamento;
- discordância na abertura;
- discordância no fechamento.

O Grupo 2 abrange os demais ensaios. Valores elevados resultam em melhores indicativos de conformidade.

- resistência de isolamento com disjuntor aberto;

- resistência de isolamento com disjuntor fechado;
- rigidez dielétrica do óleo.

Cada ensaio fornece um resultado de ensaio que será enquadrado dentro de pelo menos uma das 3 funções de pertinência:

- baixo;
- médio;
- alto.

A escolha da modelagem através de 3 funções de pertinência de entrada resultou da observação dos resultados dos ensaios. Nos grupos de disjuntores que possuem modelos semelhantes, constata-se que os resultados, em sua maioria, são muito próximos. Dessa forma, a utilização de maior número de funções de pertinências poderia não ser útil dada a baixa quantidade de desvios além da média. A adoção de menos funções não evidenciaria quando um ensaio possui um valor muito superior ou muito inferior à média.

As denominações das funções adotadas se referem à grandeza da medida e não quanto à qualidade, por isso pode haver valores de grandezas baixas, por exemplo resistência de contato, que signifiquem bons resultados.

Um disjuntor pode possuir mais de um ensaio cadastrado ao longo da sua vida, mas a análise é para verificar o estado atual, que não necessariamente está relacionado ao resultado do ensaio anterior, uma vez que podem ter sido realizadas melhorias como por exemplo a substituição do óleo isolante. O ensaio sob análise será sempre o mais recente do espécime, sendo necessário selecioná-lo no banco de dados de ensaios.

A criação das 3 funções de pertinência leva em consideração ainda:

- valores de referência para o ensaio;
- média dos valores dos ensaios dos disjuntores dos irmãos;
- variância e desvio padrão dos valores dos ensaios dos irmãos;
- média dos 10 % melhores valores.

Os valores de referência são importantes para definir um limite a partir do qual o ensaio seja considerado não conforme e são oriundos do banco de dados de valores de referências abordadas na Seção 4.1.4 agrupadas na matriz definida em (16).

$$R = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,l} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{k,1} & r_{k,2} & \cdots & r_{k,l} \end{pmatrix} \quad (16)$$

onde:

$R$  = Matriz de valores de referência

$k$  = refere-se ao modelo do disjuntor

$l$  = refere-se ao ensaio

$r_{k,l}$  = valor de referência para o modelo  $k$  e ensaio  $l$

Um vetor  $a_{k,l}$  que armazene os  $n$  valores de resultados de ensaio de um modelo específico de disjuntor ( $k$ ) e tipo de ensaio ( $l$ ), é definido como:

$$a_{k,l} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (17)$$

A média dos valores dos ensaios dos disjuntores irmãos forma a base de comparação para a análise, muitas vezes o ensaio pode ser considerado conforme segundo a norma, contudo existe a possibilidade do valor medido ser um ponto fora da curva quando comparado com os irmãos, devendo ser observado com mais atenção. A expectativa é que se o disjuntor estiver normal seu resultado se encontre nas proximidades do valor médio. A média aritmética é calculada através de (18).

$$\mu_{k,l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (18)$$

onde:

$\mu_{k,l}$  = valor da média para o modelo ( $k$ ) e ensaio ( $l$ )

$n$  = quantidade de resultados para o modelo ( $k$ ) e ensaio ( $l$ )

$a_i$  = valor de ensaio proveniente do vetor  $a_{k,l}$

A variância e desvio padrão foram adotados para definir as proximidades da média no qual os ensaios podem variar, mas ainda serem considerados próximos da média. Em alguns ensaios observam-se algumas interferências, como o caso de resistência de contato que em alguns casos de disjuntores os conectores possuem grande influência sob o ensaio, contudo não apresentam necessariamente não conformidades. Para cálculo da variância é utilizado (19).

$$\sigma_{k,l}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - \mu_{k,l})^2 \quad (19)$$

onde:

$\sigma_{k,l}^2$  = valor variância para o modelo ( $k$ ) e ensaio ( $l$ )

$n$  = quantidade de resultados para o modelo ( $k$ ) e ensaio ( $l$ )

$a_i$  = valor de ensaio proveniente do vetor  $a_{k,l}$

$\mu_{k,l}$  = valor da média para o modelo ( $k$ ) e ensaio ( $l$ )

A média dos 10% melhores valores servem de base para a definição de quando um ensaio é considerado plenamente conforme. Tomar o melhor ensaio dos irmãos como referência não leva em consideração o fundo de escala dos diferentes instrumentos, a adoção da média dilui essas diferenças para valores aceitáveis. Nessa modelagem deve-se levar em consideração o grupo de ensaio. (20) atende ao grupo 1 de ensaios e (21) ao grupo 2.

$$\mu_{k,l_{min}} = \frac{1}{\frac{n}{10}} \sum_{i=1}^{\frac{n}{10}} a_{cresc_i} \quad (20)$$

$$\mu_{k,l_{max}} = \frac{1}{\frac{n}{10}} \sum_{i=n-\frac{n}{10}}^n a_{cresc_i} \quad (21)$$

onde  $\frac{n}{10}$  é aproximado pelo número natural mais próximo e:

$\mu_{k,l_{min}}$  = média dos 10% menores

$\mu_{k,l_{max}}$  = média dos 10% maiores

$n$  = quantidade de resultados do ensaio sob análise

$a_{cresc_i}$  = vetor de resultados  $a_{k,l}$  ordenado em ordem crescente dos valores de ensaio índice  $i$

Para exemplificação será considerado o ensaio de rigidez dielétrica do óleo, que se enquadra no Grupo 2 (valores elevados resultam em indicadores de conformidade), como ilustra a Figura 47.

A função da pertinência Baixo é modelada com base em um trapézio retângulo, sendo que um dos seus dois vértices não ortogonais está alinhado com o valor do limite inferior proveniente do banco de dados de referência e o outro com o valor correspondente a 90% do valor da média. Com base em (15) os valores dos pontos para a função de pertinência seriam:  $a = 0$ ,  $b = 0$ ,  $c = r_{k,l}$ ,  $d = 0,9\mu_{k,l}$ .

Na modelagem da função Médio é utilizado uma gaussiana definida em (14) cujos valores de média ( $\mu$ ) e variância ( $\sigma^2$ ), originam de (18) e (19), respectivamente.

A última função de entrada modelada para análise dos ensaios é a Alto. Uma trapezoidal com os vértices alinhados com 110% da média, média dos 10% maiores valores e um limite superior definido como duas vezes a média dos 10% maiores valores. Com base em (15) os pontos para definição da função de pertinência seriam:  $a = 1,1\mu_{k,l}$ ,  $b = \mu_{k,l_{max}}$ ,  $c = 2\mu_{k,l_{max}}$  e  $d = 2\mu_{k,l_{max}}$ .



**Tabela 8: Resumo dos parâmetros para as funções de pertinência de entrada**

Função de Pertinência	Parâmetros	
	Grupo 1	Grupo 2
Baixo	$a = 0$ $b = 0$ $c = \mu_{k,l_{min}}$ $d = \max(\mu_{k,l_{min}}, 0,9\mu_{k,l})$	$a = 0$ $b = 0$ $c = r_{k,l}$ $d = \max(r_{k,l}, 0,9\mu_{k,l})$
Médio	$\mu = \mu_{k,l}$ $\sigma^2 = \sigma_{k,l}^2$	$\mu = \mu_{k,l}$ $\sigma^2 = \sigma_{k,l}^2$
Alto	$a = \min(1, 1\mu_{k,l}, r_{k,l})$ $b = r_{k,l}$ $c = 2r_{k,l}$ $d = 2r_{k,l}$	$a = \min(1, 1\mu_{k,l}, \mu_{k,l_{max}})$ $b = \mu_{k,l_{max}}$ $c = 2\mu_{k,l_{max}}$ $d = 2\mu_{k,l_{max}}$

Fonte: Elaborado pelo autor

No caso de um ensaio enquadrado no Grupo 1, existe a necessidade de se substituir  $\mu_{k,l_{max}}$  por  $r_{k,l}$  na função Alto e  $\mu_{k,l_{min}}$  por  $r_{k,l}$  na função Baixo. A Tabela 8 apresenta um resumo dos valores necessários para elaboração das funções de pertinência de entrada de forma atender aos dois diferentes grupos de ensaios. As funções min e max presentes nos parâmetros  $d$  das funções Alto e Baixo respectivamente garantem a monotonicidade do trapézio.

O valor do ensaio do espécime sendo fuzzificado é representado na Figura 47 por uma reta, nesse caso o valor do ensaio estaria enquadrado nas funções de pertinência Alto e Médio. Na primeira com pertinência próxima de 20% enquanto que na segunda próxima de 80%.

A modelagem das funções de pertinência normalmente segue o critério do especialista, que possui o entendimento sobre como o resultado encontrado em valor numérico pode ser enquadrado adequadamente nos conjuntos. Nesse caso, a tendência dos ensaios dos disjuntores irmãos apresentarem valores semelhantes, por partilharem das mesmas características, foi representada na função Médio através da modelagem da gaussiana. As funções trapezoidais (Alto e Baixo) abrangem todos os demais valores que se desviam  $\pm 10\%$  do valor da média, garantindo que o valor do ensaio esteja contido em pelo menos uma função de pertinência. As trapezoidais, quando pertinentes, salientam esses valores devido sua elevada área, principalmente quando excedem o valor de referência ( $r_{k,l}$ ) ou a média dos 10% melhores valores ( $\mu_{k,l_{min}}$ ,

$\mu_{k,l_{max}})$ .

### 4.3.2 Funções de Pertinência de Saída

O resultado da análise de um ensaio requer o enquadramento em pelo menos uma das funções de pertinência de entrada e após a aplicação das regras, deve-se obter uma data estimada para a próxima manutenção referente a esse ensaio.

A função de pertinência de saída atuará diretamente na defuzzificação, possibilitando que o valor do ensaio seja relacionado como uma data para a próxima manutenção. Isso ocorre de forma análoga a análise realizada na entrada, através de outras 3 funções de pertinência.

- urgente;
- normal;
- prolongado.

Na Seção 4.2.3 foram definidos os limites de tempo para a próxima manutenção do espécime, esse valor será utilizado como referência na modelagem das funções de pertinência da saída. A importância do intervalo máximo ( $Int_{m\acute{a}x}$ ), definida por (11), como referência para as funções de pertinência de saída, é a sua composição de fatores correlacionados a probabilidade do disjuntor falhar. É levado em consideração taxas de falha distintas por modelo, a idade do espécime e também o mínimo de intervenção, como orienta a MBC.

Todas as funções de pertinência de saída são trapezoidais, cuja definição é proveniente de (15).

O regime Urgente é modelado com base em um trapézio retângulo no qual o seu primeiro vértice não ortogonal é alinhado com  $\frac{2}{9}Int_{m\acute{a}x}$ . Seu segundo vértice está alinhado com  $\frac{1}{3}Int_{m\acute{a}x}$ .

O regime Normal é modelado com base em um trapézio retângulo no qual os vértices estão alinhados com:  $\frac{2}{9}Int_{m\acute{a}x}$ ,  $\frac{1}{3}Int_{m\acute{a}x}$ ,  $\frac{4}{9}Int_{m\acute{a}x}$  e  $\frac{2}{3}Int_{m\acute{a}x}$ .

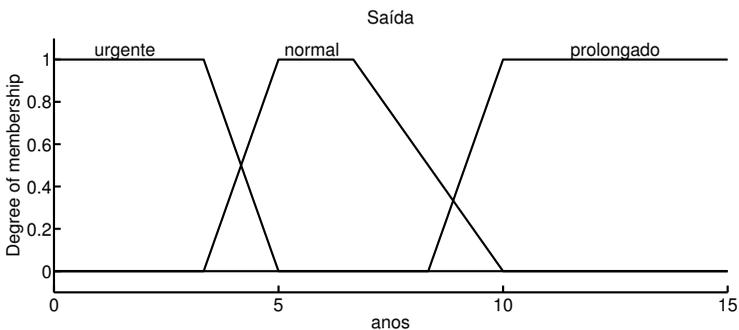
O regime Prolongado é modelado com base em um trapézio retângulo no qual o seu primeiro vértice não ortogonal é alinhado com  $\frac{5}{9}Int_{m\acute{a}x}$ . Seu segundo vértice está alinhado com  $\frac{2}{3}Int_{m\acute{a}x}$ .

As ponderações em função do intervalo máximo e os formatos das funções de pertinência de saída foram heurísticamente adotados

**Tabela 9: Resumo dos parâmetros para as funções de pertinência de saída**

Função de Pertinência	Parâmetros
Urgente	$a = 0$ $b = 0$ $c = \frac{2}{9}Int_{máx}$ $d = \frac{1}{3}Int_{máx}$
Normal	$a = \frac{2}{9}Int_{máx}$ $b = \frac{1}{3}Int_{máx}$ $c = \frac{4}{9}Int_{máx}$ $d = \frac{2}{3}Int_{máx}$
Prolongado	$a = \frac{5}{9}Int_{máx}$ $b = \frac{2}{3}Int_{máx}$ $c = 2Int_{máx}$ $d = 2Int_{máx}$

Fonte: Elaborado pelo autor

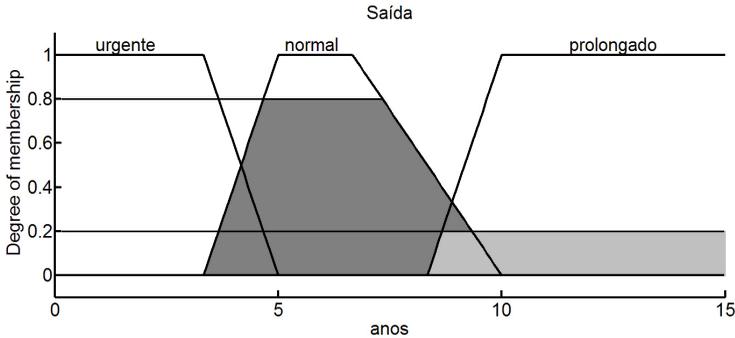
**Figura 48: Função de pertinência de saída**

Fonte: Elaborado pelo autor

baseando-se na premissa de que atualmente os intervalos entre manutenções são adequados. A Tabela 9 resume os parâmetros.

As três funções de pertinência de saída são ilustradas na Figura 48.

**Figura 49: Exemplo de aplicação das funções de pertinência de saída**



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Seção 4.3.1 foi explicado como o valor do ensaio é enquadrado nas funções de pertinência de entrada, resultando em valores de pertinência para cada função (Alto, Médio e Baixo), no exemplo abordado naquele item tinha-se: 0% Baixo, 20% Alto e 80% Médio. Esses valores se relacionarão diretamente com as funções de pertinência de saída, através da aplicação das regras que são descritas na Seção 4.3.3. A pertinência da função Alto define a área da função de pertinência Prolongado. Analogamente, a pertinência da função Médio define a área da função de pertinência Normal, como ilustra a Figura 49. A defuzzificação é feita através do cálculo do centroide das áreas definidas pelas pertinências das funções de entrada, resultando em um valor de intervalo para próxima manutenção.

### 4.3.3 Regras

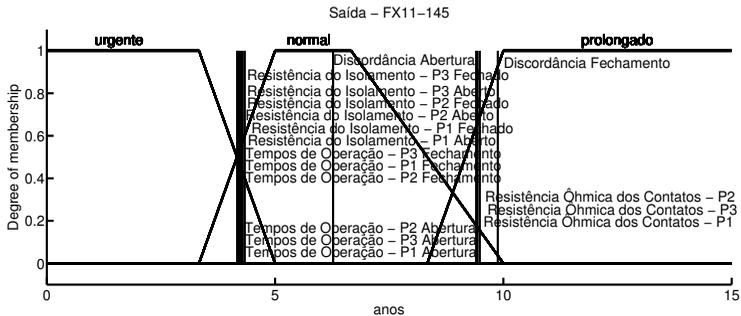
As regras influenciam no processo de defuzzificação, sendo a forma como o sistema *fuzzy* realiza o relacionamento entre as funções de pertinência de entradas e saídas. No sistema proposto, as regras são modeladas observando o grupo no qual o ensaio se enquadra. No caso dos ensaios atendido pelo Grupo 1, definidos no Seção 4.3.1 as regras são:

- Se Baixo então Prolongado;
- Se Médio então Normal;

- Se Alto então Urgente.  
Já para os ensaios do Grupo 2.
- Se Baixo então Urgente;
- Se Médio então Normal;
- Se Alto então Prolongado.

Para cada valor de ensaio de entrada existe uma data de próxima manutenção obtida através das funções de pertinência de saída, contudo essa possui a mesma forma, já que sua modelagem leva em conta somente o intervalo máximo ( $Int_{máx}$ ) entre manutenções que é único para cada espécime. A Figura 50 ilustra a saída fornecida após análise das regras e dos valores das entradas de diversos ensaios de um espécime. Os resultados de cada ensaio foram agrupados em um gráfico para melhor percepção e comparação entre os diferentes ensaios.

Figura 50: Exemplo de saída do sistema fuzzy para um espécime



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse caso, ilustrado pela Figura 50, cada segmento de reta vertical representa o valor do centroide encontrado no processo de defuzzificação aplicada a cada ensaio do espécime. A área para cálculo do centroide é delimitada pelas pertinências das entradas aplicadas, através das regras, às funções de pertinência de saídas, como já exemplificado na Figura 49. O agrupamento de ensaios próximo a 4 anos remete aos ensaios que limitam a extensão do tempo para próxima intervenção. No exemplo abordado, a equipe de posse desses dados deve agir com mais afinco nesses ensaios, uma vez que estão próximos de adentrarem ao período de regime Urgente. Os ensaios de resistência ôhmica dos

contatos não são preocupação da equipe que pode deixá-los, caso não haja tempo hábil, para uma próxima oportunidade.

#### 4.4 TIPOS DE EXECUÇÃO DO SISTEMA

A resposta do sistema às análises dos ensaios é a sua parte mais importante e a apresentação das conclusões aos usuários deve ser resumida para melhor interpretação. A análise mais criteriosa pode ser realizada nos casos necessários onde são analisados cada ensaio, sendo possível avaliar a forma das funções de pertinência de entrada e saída criadas pelo sistema.

O sistema foi concebido com dois objetivos principais:

- análise individual;
- análise geral.

##### 4.4.1 Análise Individual

Utilizando o sistema dessa forma, é possível fazer análises mais detalhadas do espécime sendo especialmente útil para análise logo após ou mesmo durante a realização dos ensaios.

O usuário terá a resposta da avaliação do espécime em comparação com a média dos seus irmãos e com as referências para aquele modelo de disjuntor, apresentando ainda a data da última manutenção e a proposição de data para próxima manutenção obtida pelo sistema para cada ensaio. Na Figura 51 é mostrada a forma de apresentação dos resultados para o usuário.

A análise baseada nessa tabela traz as informações necessárias para a avaliação do ensaio no local, identificando possíveis discordâncias dos valores de referência e também possíveis pontos para melhoria dos ensaios. As medidas errôneas pode ser corrigidas, por exemplo, melhorando a conexão dos terminais para reduzir a resistência de contato, melhorar a limpeza dos isoladores, realizar a substituição do óleo isolante, ajustar o mecanismo, e demais pontos que a equipe achar necessário. A tabela subsidia a equipe com informações antes intangíveis, esclarecendo dúvidas quanto aos resultados obtidos e direcionando os esforços para melhorar o espécime nos aspectos realmente necessários.

Figura 51: Tabela de saída

Ensaio 052D-02385	Data			Valores dos Ensaios		
	Última	Previsão	Anos	Último	Média	Referência
Tempos de Operação - F1 Abertura	02/08/07	05/10/11	4.18	27.50	30.48	27.00
Tempos de Operação - F3 Abertura	02/08/07	05/10/11	4.18	27.50	30.52	27.00
Tempos de Operação - F2 Abertura	02/08/07	06/10/11	4.18	28.10	30.52	27.00
Resistência Ôhmica dos Contatos - F1	02/08/07	24/12/16	9.40	35.20	48.71	50.00
Resistência Ôhmica dos Contatos - F3	02/08/07	22/01/17	9.48	36.20	48.84	50.00
Resistência Ôhmica dos Contatos - F2	02/08/07	04/01/17	9.43	36.50	49.17	50.00
Tempos de Operação - F2 Fechamento	02/08/07	07/10/11	4.18	145.90	144.18	140.00
Tempos de Operação - F1 Fechamento	02/08/07	07/10/11	4.18	146.00	144.05	140.00
Tempos de Operação - F3 Fechamento	02/08/07	07/10/11	4.18	146.00	144.19	140.00
Resistência do Isolamento - F1 Aberto	02/08/07	31/10/11	4.25	250000.00	2005082.48	150000.00
Resistência do Isolamento - F1 Fechado	02/08/07	29/11/11	4.33	250000.00	1045845.09	150000.00
Resistência do Isolamento - F2 Aberto	02/08/07	12/11/11	4.28	250000.00	1446400.56	150000.00
Resistência do Isolamento - F2 Fechado	02/08/07	25/10/11	4.23	250000.00	2616442.29	150000.00
Resistência do Isolamento - F3 Aberto	02/08/07	25/10/11	4.23	250000.00	2633339.49	150000.00
Resistência do Isolamento - F3 Fechado	02/08/07	29/11/11	4.33	250000.00	1045134.02	150000.00
Discordância Fechamento	02/08/07	15/06/17	9.88	0.10	0.97	4.00
Discordância Abertura	02/08/07	06/11/13	6.27	0.60	0.50	3.00

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 52 complementa a anterior e apresenta a lista em ordem crescente de datas previstas para próxima intervenção para cada ensaio, possibilitando a identificação clara de quais são os ensaios que estão acarretando na intervenção prematura do espécime. Existe a possibilidade de um só ensaio estar fora dos padrões sendo determinante para a intervenção prematura, e com ações simples podem ser estendidos os tempos entre manutenções.

Será adotada como data da próxima intervenção para o espécime, a data definida pela análise do ensaio com piores resultados.

#### 4.4.2 Análise Geral

Na análise geral são verificados todos os disjuntores do mesmo modelo. Essa análise não visa a análise individual de cada disjuntor, mas atualiza as datas de manutenção de um modelo específico. O cadastro de um novo ensaio em um dos irmãos, afeta todos os irmãos, uma vez que a análise é feita comparativamente.

Deve-se levar em consideração que as datas definidas pelo sistema podem ser alteradas a cada análise geral, uma vez que novos ensaios alimentam os banco de dados com novos valores que alteram as médias dos irmãos, que influenciam nas análises individuais de cada disjuntor através do novo ajuste das funções de pertinência.

As datas são variáveis, o que poderia ser considerado prejudicial à programação da manutenção, contudo os valores não devem se alterar

**Figura 52: Lista de piores ensaios do espécime**

```
Os piores ensaios são relacionados abaixo:  
08/02/07 -- Data da última manutenção|  
05/10/11 -- Tempos de Operação - P3 Abertura  
05/10/11 -- Tempos de Operação - P1 Abertura  
06/10/11 -- Tempos de Operação - P2 Abertura  
07/10/11 -- Tempos de Operação - P1 Fechamento  
07/10/11 -- Tempos de Operação - P3 Fechamento  
07/10/11 -- Tempos de Operação - P2 Fechamento  
25/10/11 -- Resistência do Isolamento - P3 Aberto  
25/10/11 -- Resistência do Isolamento - P2 Fechado  
31/10/11 -- Resistência do Isolamento - P1 Aberto  
12/11/11 -- Resistência do Isolamento - P2 Aberto  
29/11/11 -- Resistência do Isolamento - P1 Fechado  
29/11/11 -- Resistência do Isolamento - P3 Fechado  
06/11/13 -- Discordância Abertura  
24/12/16 -- Resistência Ôhmica dos Contatos - P1  
04/01/17 -- Resistência Ôhmica dos Contatos - P2  
22/01/17 -- Resistência Ôhmica dos Contatos - P3  
15/06/17 -- Discordância Fechamento
```

Fonte: Elaborado pelo autor

numa amplitude elevada. É possível que a análise geral seja realizada com menos frequência e somente por usuários com privilégios para tal, evitando os problemas na reprogramação das datas das intervenções.

A análise geral é uma forma de atualizar as datas após alguma nova implementação no sistema ou identificação de um defeito em um modelo específico que foi resolvido com a adoção de medidas padronizadas sendo que os ensaios anteriores podem contribuir negativamente para as definições de datas.

Os ensaios que por ocasião resultarem em manutenções puramente Urgentes, ou seja, na qual a função de pertinência Urgente esteja em seu máximo, são apresentados em uma nova tabela e a equipe necessita intervir para melhoria no espécime. A Figura 53 ilustra como essa listagem facilita a identificação dos espécimes e dos ensaios anormais, direcionando os esforços da equipe na melhoria do disjuntor sem a necessidade de verificar individualmente no sistema cada espécime.

A Figura 54 apresenta o tempo para próxima manutenção de cada espécime do mesmo modelo baseando-se no resultado do pior ensaio. Verifica-se nesta figura que a grande maioria dos equipamentos

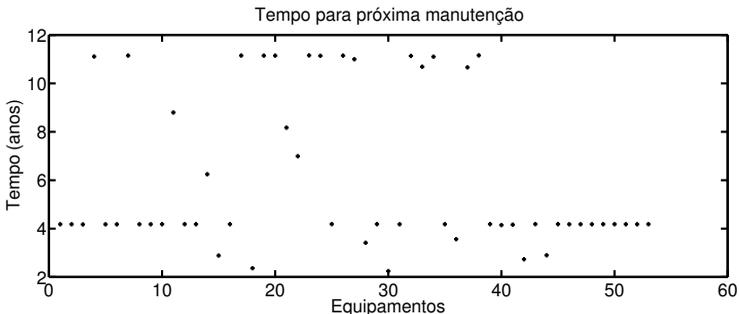
Figura 53: Lista de ensaios que necessitam de intervenção urgente

Modelo	Equipamento	Ensaio Problematicos	Anos	Valor	Média	Referência
FX11-145	052D-02868	Resistência Ôhmica dos Contatos - P1	6.31	83.00	49.71	50.00
FX11-145	052D-02871	Resistência Ôhmica dos Contatos - P2	6.31	96.00	49.17	50.00
FX11-145	052D-02871	Resistência Ôhmica dos Contatos - P1	6.5	100.00	49.71	50.00
FX11-145	052D-02871	Resistência Ôhmica dos Contatos - P3	6.2	100.00	49.84	50.00
FX11-145	052D-02878	Resistência Ôhmica dos Contatos - P3	3.31	81.00	49.84	50.00
FX11-145	052D-02878	Resistência Ôhmica dos Contatos - P1	2.9	90.00	49.71	50.00
FX11-145	052D-02881	Tempos de Operação - P1 Fechamento	2.4	199.80	144.05	140.00
FX11-145	052D-02881	Tempos de Operação - P2 Fechamento	2.4	200.70	144.18	140.00
FX11-145	052D-02881	Tempos de Operação - P3 Fechamento	2.4	200.70	144.19	140.00
FX11-145	052D-02890	Tempos de Operação - P2 Fechamento	8.4	183.60	144.18	140.00
FX11-145	052D-02890	Tempos de Operação - P1 Fechamento	8.2	184.70	144.05	140.00
FX11-145	052D-02890	Tempos de Operação - P3 Fechamento	8.2	185.00	144.19	140.00
FX11-145	052D-02901	Resistência Ôhmica dos Contatos - P3	7.0	93.00	49.84	50.00
FX11-145	052D-02952	Resistência Ôhmica dos Contatos - P3	2.9	88.00	49.84	50.00
FX11-145	052D-02952	Resistência Ôhmica dos Contatos - P2	2.2	100.00	49.17	50.00
FX11-145	052D-03998	Resistência Ôhmica dos Contatos - P2	2.7	88.00	49.17	50.00
FX11-145	052D-10202	Resistência Ôhmica dos Contatos - P3	2.9	88.00	49.84	50.00

Fonte: Elaborado pelo autor

tende a estar dentro de uma mesma periodicidade, contudo existem alguns espécimes que podem ter suas manutenções postergadas e o mais importante dado, existem disjuntores que necessitam de intervenção com frequência menor.

Figura 54: Gráfico de tempo para próxima manutenção



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.5 IMPLEMENTAÇÃO

O sistema proposto foi implementado no *software* Matlab<sup>®</sup> R2012a, desenvolvido pela MathWorks<sup>®</sup>. O *Fuzzy Logic Toolbox* foi aplicado para modelagem do sistema *fuzzy*, seguindo as orientações descritas no Ajuda.

A algoritmo principal é descrito abaixo.

## 1. Importação dos Banco de Dados;

- (a) Importa-se o Banco de Dados de Ensaio - Seção 4.1.1;
- (b) Importa-se o Banco de Dados de Características - Seção 4.1.2;
- (c) Importa-se o Banco de Dados de Referências - Seção 4.1.4;
- (d) Importa-se o Banco de Dados de Ordens de Serviço - Seção 4.1.3.

## 2. Através do número individual do equipamento o usuário define

um vetor com os espécimes, definindo  $disjuntor = \begin{pmatrix} dj_i \\ dj_{i+1} \\ \vdots \\ dj_n \end{pmatrix}$ ;

## 3. Definem-se os irmãos;

- (a) Consulta-se  $dj_i$  no BD Características, identificando o modelo ( $k$ );
- (b) Buscam-se no BD Características todos os disjuntores de modelo iguais a  $k$ , definindo  $irmaos = \begin{pmatrix} im_j \\ im_{j+1} \\ \vdots \\ im_m \end{pmatrix}$ ;
- (c) Buscam-se os ensaios ( $l$ ) de  $irmaos$  no BD Ensaio;
- (d) Define-se BD Ensaio Irmãos.

## 4. Cálcula-se Taxa de Falha;

- (a) Busca-se no BD Ordem de Serviço as OS do  $im_j$ ;
- (b) Seleccionam-se as OS de Falha/Defeito do  $im_j$ , definindo

$$os = \begin{pmatrix} os_k \\ os_{k+1} \\ \vdots \\ os_l \end{pmatrix};$$

- (c) Para  $os_k$  armazenam-se:  
 $ano_{fab}$  - Ano de fabricação;  
 $data_{os}$  - Data da OS;  
 $idade = data_{os} - ano_{fab}$ ;  
 $universo$  - Irmãos com  $ano_{fab} \leq ano_{fab}$  do  $im_j$ ;  
 $taxa_{falha} = 1/universo$ .
- (d) Se  $k < l$  então  $k = k + 1$  e retorna para (b) senão segue para (e);
- (e) Se  $j < m$  então  $j = j + 1$  e retorna para (a) senão segue para (f);
- (f) Soma-se  $taxa_{falha}$  por  $idade$ , definindo  $afr$  semelhante a Tabela 7;
- (g) Aproxima-se  $afr$  pela PDF de Weibull, ajustando os parâmetros  $a$  e  $b$  em (2) de forma a manter os dados em um intervalo de 95% de confiança.

5. Calcula-se a Discordância entre polos;

- (a) Selecionam-se os ensaios mais recentes do BD Ensaio Irmãos de  $dj_i$ ;
- (b) Possui valor de tempo de fechamento? Se Sim segue para (c), senão segue para (f);
- (c) Seleciona valores de tempo de fechamento  $a_{tc} = \begin{pmatrix} a_{tc_1} \\ a_{tc_2} \\ a_{tc_3} \end{pmatrix}$ ;
- (d) Calcula-se Discordância:  
 $tc_{>} = \max(a_{tc})$ ;  
 $tc_{<} = \min(a_{tc})$ ;  
 $td_c = tc_{>} - tc_{<}$ .
- (e) Insere ensaio de Discordância Fechamento com valor  $td_c$  no BD Ensaio Irmãos;
- (f) Possui valor de tempo de abertura? Se Sim segue para (g), senão segue para (6);
- (g) Seleciona valores de tempo de abertura  $a_{to} = \begin{pmatrix} a_{to_1} \\ a_{to_2} \\ a_{to_3} \end{pmatrix}$ ;

- (h) Calcula-se Discordância:

$$to_{>} = \max a_{to};$$

$$to_{<} = \min a_{to};$$

$$td_o = to_{>} - to_{<}.$$

- (i) Insere ensaio de Discordância Abertura com valor
- $td_o$
- no BD Ensaio Irmãos.

6. Sistema *fuzzy*;

- (a) Selecionam-se os ensaios mais recentes de
- $dj_i$
- definindo

$$BDEnsaioEsp = \begin{pmatrix} a_j & data_j \\ a_{j+1} & data_{j+1} \\ \vdots & \vdots \\ a_n & data_n \end{pmatrix};$$

- (b) Ensaio pertence ao Grupo 1? Se Sim adota-se Coluna “Grupo 1” da Tabela 8, senão adota-se Coluna “Grupo 2” da Tabela 8, após segue para (c);

- (c) Selecionam-se os dados:

$$a_j;$$

$$data_j;$$

$$a_{k,l} - (17);$$

$$ano_{fab} - \text{Ano de fabricação.}$$

- (d) Calculam-se:

$$r_{k,l} - (16);$$

$$\mu_{k,l} - (18);$$

$$\sigma_{k,l}^2 - (19);$$

$$\mu_{k,l}^{min} - (20);$$

$$\mu_{k,l}^{max} - (21);$$

$$idade = data_j - ano_{fab};$$

$$Int_{m\acute{a}x} - (11).$$

- (e) Criam-se as Funções de Pertinência de Entrada - Tabela 8;

- (f) Criam-se as Regras - Seção 4.3.3;

- (g) Criam-se as Funções de Pertinência de Saída - Tabela 9;

- (h) Fuzzifica o valor
- $a_j$
- ;

- (i) Defuzzifica, definindo
- saida*
- .

7. Verifica-se se *saida* possui valor puramente Urgente;

- 
- (a) Define BD Ensaio Excepcional;
  - (b) Se  $saida < \frac{2}{9}$  então insere ensaio no BD Ensaio Excepcional, senão segue para (7);
8. Impressão de relatórios;
  9. Se  $i < n$  então  $i = i + 1$  e segue para (3), senão finaliza rotina.



## 5 RESULTADOS OBTIDOS

Com o intuito de verificar a viabilidade de utilização de metodologia proposta em um sistema real, uma série de comparações com o sistema atual utilizando banco de dados com dados reais são necessárias. O sistema atual não apresenta qualquer valor de referência para o usuário dificultando a interpretação quanto à qualidade do disjuntor, ficando a cargo da equipe executora a avaliação dos ensaios lançados. Para comparação com normas, manuais ou outros disjuntores do mesmo modelo é necessário que o usuário realize tudo manualmente pesquisando e, quando necessário, solicitando à engenharia os valores de referências.

O sistema proposto possui diversas parametrizações já apresentadas no capítulo 4 que afetam diretamente os resultados. Devido à complexidade e interferência mútua entre muitos parâmetros, serão exploradas as comparações sem as suas alterações, avaliando dessa forma o sistema proposto como um todo. A parametrização atual foi fundamentada em não se modificar profundamente as datas de manutenções, evitando grandes disparidades entre as manutenções. Por se tratar de uma ferramenta de programação de manutenções sem consolidação de utilização, parametrizar o sistema proposto de forma semelhante ao que é utilizado atualmente traz a vantagem de se adotar técnicas conservadoras, sólidas e que se assemelhem ao raciocínio atual de intervenções, priorizando o sistema proposto na identificação de disjuntores com defeitos através dos valores de ensaios. Futuras alterações podem ser implementadas conforme forem surgindo as necessidades, adequando o sistema ao que melhor for o entendimento da empresa quanto a critérios para manutenção e confiabilidade.

A resposta do sistema aos seguintes itens serão observados:

- comparação de datas de previsão para manutenção entre sistema proposto e sistema atual;
- comparação de datas de previsão para manutenção em espécimes de mesmo meio extintor;
- comparação de datas de previsão para manutenção em espécimes de mesmo mecanismo;
- comparação de datas de previsão para manutenção em espécimes do mesmo modelo.

## 5.1 MODELOS DE DISJUNTORES ADOTADOS

A Tabela 10 apresenta os modelos de disjuntores sob estudo e suas principais características técnicas.

**Tabela 10: Espécimes**

Extinção	Modelo	Mecanismo	Tensão (kV)	Década	Periodicidade Atual
PVO	1	Mola	72,5	1970	24 meses
	2	Mola	145	1970	36 meses
$SF_6$	3	Mola	145	1990	60 meses
	4	Mola	145	1990	60 meses
	5	Pneumático	145	1990	36 meses
	6	Hidráulico	145	1980	60 meses
GVO	7	Solenóide	72,5	1960	36 meses
	8	Pneumático	145	1960	36 meses
VAC	9	Mola	15	2000	120 meses
	10	Mola	15	2010	120 meses

Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.1.1 Modelo 1

Esse modelo de disjuntor tripolar data da década de 70 e possui extinção a óleo com câmara de pequeno volume tendo acionamento por mola espiral e sua característica principal é a forma de instalação, que se dá de forma extraível ao barramento de 72,5 kV. Enquadra-se atualmente em uma manutenção de verificação a cada 24 meses e uma detalhada a cada 144 meses.

Existem alguns relatos de vazamento de óleo nesse disjuntores tanto através do visor como pelos retentores da alavanca dos polos que fazem a vedação durante o movimento de abertura e fechamento do disjuntor. A lubrificação do mecanismo também é um ponto de atenção tendo em vista que existem relatos de deterioração e consequente perda de ajuste de posição do mecanismo. Esses e outros relatos contribuem para a elevação da taxa de falha, pois necessitam de intervenção para correção.

### 5.1.2 Modelo 2

Também da década de 70 e com características semelhantes ao Modelo 1 no que se refere a meio de extinção, seu fabricante difere daquele bem como o acionamento que ocorre por mola helicoidal e sua tensão de operação que é de 145 kV. Atualmente a periodicidade de manutenção deste grupo é, em média, uma manutenção de verificação a cada 36 meses e uma detalhada a cada 180 meses, diferenciando-se do Modelo 1.

Os principais defeitos que contribuem para taxa de falha são alguns vazamentos de óleo, semelhantes ao que ocorrem no Modelo 1.

### 5.1.3 Modelo 3

O primeiro disjuntor deste modelo foi adquirido no final da década de 90 e atualmente fornecido, trata-se de um disjuntor tripolar, de 145 kV, com mecanismo de mola helicoidal e extinção a  $SF_6$ . Seu grupo de manutenção atual prevê prazos médios de manutenção de 60 meses para a do tipo verificação e de 180 meses para a detalhada.

Existem poucos relatos de defeitos, inclusive devido à faixa de idade em que se encontra e a tecnologia empregada. Seus poucos relatos são de deterioração da vedação da caixa do mecanismo e de vazamento pela vedação das tubulações que interconectam os polos com  $SF_6$ .

### 5.1.4 Modelo 4

O Modelo 4 difere do anterior basicamente pelo tipo de sua mola do acionamento que é espiral, fabricante e data de entrada em serviço (entre 1995 e 2002). Seu grupo de manutenção é semelhante ao do Modelo 3.

Os defeitos mais encontrados nesse tipo de modelo de disjuntor ocorrem no densímetro, deterioração dos lubrificantes do mecanismo e corrosão nas flanges dos contatos do disjuntor que ocasionam vazamento de  $SF_6$ .

### 5.1.5 Modelo 5

Do início da década de 90, também a  $SF_6$  e operando em 145 kV sua principal característica é o acionamento pneumático que depende de um compressor de ar para manter o reservatório de ar dentro das pressões de operação. Seu grupo de manutenção atual prevê prazos médios de manutenção de 36 meses para a do tipo verificação e de 180 meses para a detalhada.

Diversas ocorrências de falha na vedação do mecanismo pneumático são relatadas, principalmente pelas pressões envolvidas e pela movimentação dessas peças envolver também vedações dinâmicas. Os anéis do compressor também se desgastam sendo necessária intervenção no disjuntor para substituí-los.

### 5.1.6 Modelo 6

Do final da década de 80 e semelhante ao anterior esse modelo também possui um acumulador de energia, contudo uma bomba hidráulica pressiona o óleo contra um êmbolo e conseqüentemente o  $N_2$  armazenando dessa forma, energia potencial. Seu grupo de manutenção atual prevê prazos médios de manutenção de 60 meses para a do tipo verificação e de 180 meses para a detalhada.

A pressão nesse tipo de acumulador de energia alcança 31 MPa, exigindo das vedações sua perfeita integridade para que ocorra o bom funcionamento do disjuntor. A ação do tempo e o atrito nas movimentações do êmbolo causam anomalias pela fuga do  $N_2$  através do óleo, perdendo assim o mecanismo sua capacidade de operação. Outro defeito comum ocorre no bloco de comando do mecanismo em que vedação ocorre metal contra metal e após um número de operações, minúsculas marcas impedem a perfeita vedação.

### 5.1.7 Modelo 7

Esse modelo é um típico disjuntor GVO *3-tank* de 72,5 kV operado por um mecanismo que emprega um solenoide para realizar as operações do disjuntor, data da década de 60. Seu grupo de manutenção atual prevê prazos médios de manutenção de 36 meses para a

do tipo verificação e de 180 meses para a detalhada.

Apesar da idade e tecnologia empregada, o *dead tank* não permite muitos pontos para vazamento resumindo a pequenos vazamentos no registro do polo. As dificuldades nesses disjuntores estão em lubrificar o mecanismo e ajustar os contatos internos à câmara bem como manter a resistência de contato baixa. Os defeitos ocorrem com maior frequência nos componentes elétricos de acionamento e controle.

### 5.1.8 Modelo 8

Muito semelhante ao Modelo 7, mas operando em 145 kV e com mecanismo pneumático, originou-se do final da década de 60. O grupo de manutenção é semelhante ao do Modelo 7.

A peculiaridade do seu mecanismo traz também diferentes tipos de defeitos principalmente no circuito de ar. Devido à vibração da caixa do mecanismo são necessários ajustes nos pressostatos e certificação da correta fixação dos elementos de controle. O acumulador de energia também pode apresentar defeitos, normalmente relacionados a impurezas que se acumulam na purga do acumulador juntamente à umidade.

### 5.1.9 Modelo 9

Facilmente encontrado nos circuitos de média tensão atuais a tecnologia a vácuo apesar de recente teve alguns avanço significativos, principalmente relacionado à questão de qualidade do vácuo. Esse modelo é um exemplo de uma tecnologia ultrapassada de fabricação de câmaras na qual o vácuo era realizado no final do processo fabril, como melhor detalhado na Seção 2.3.3. Dimensionado para operar em 15 kV, seu mecanismo não necessita de muita energia, então é mais comum, e o caso, de se utilizar molas no mecanismo. Sua entrada no sistema ocorreu no final da década passada sendo seu modo de instalação abrigado dentro de cubículos. Seu grupo de manutenção atual prevê prazos médios de manutenção a cada 120 meses para a do tipo verificação.

Os motivos de intervenção são poucos, principalmente pela tecnologia e uso de poucas peças no mecanismo bem como a forma de instalação que elimina as ações das condições atmosféricas.

### **5.1.10 Modelo 10**

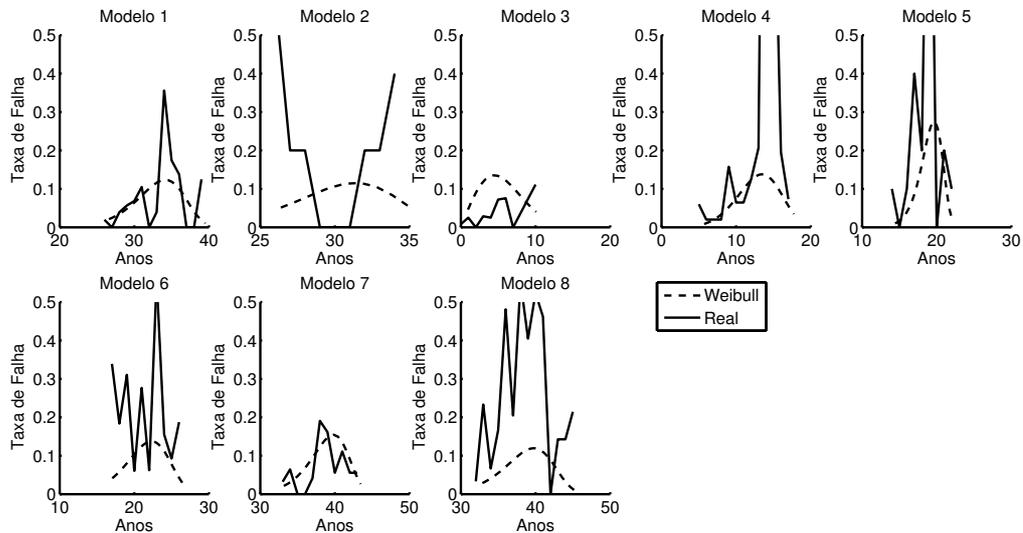
Modelo atualmente fornecido pelo fabricante, é muito semelhante ao anterior diferenciando principalmente pela confecção da câmara que ocorre agora em ambiente de vácuo, elevando a qualidade do produto e pela sua instalação que é externa. Semelhante ao Modelo 9, também possui intervenções de verificação a cada 120 meses.

Assim como o anterior os motivos de intervenção são reduzidos, contudo nesse modelo existe um defeito de projeto no sistema de disparo do mecanismo de abertura que causa intervenções prematuras.

### **5.1.11 Resultados obtidos pelo sistema proposto**

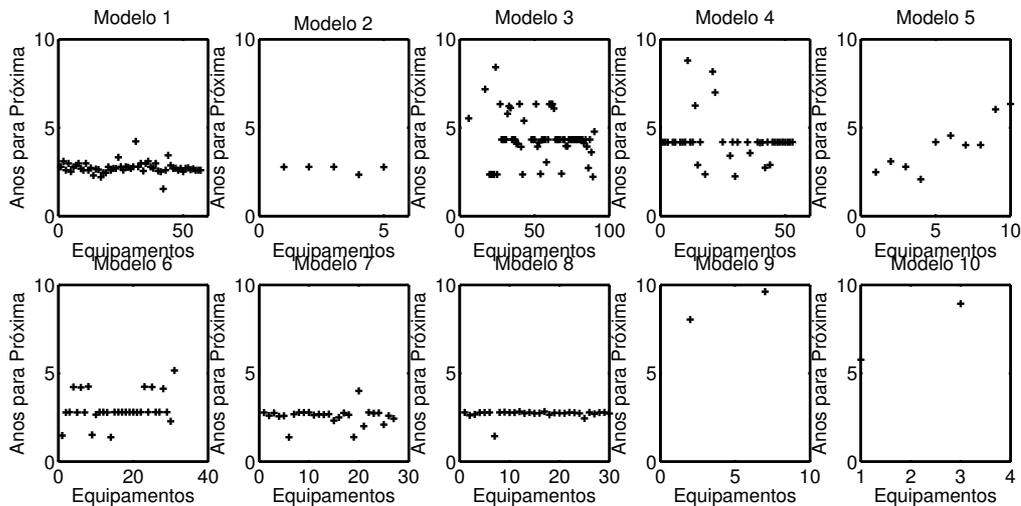
As Figuras 55 e 56 são os resultados resumidos da resposta do sistema proposto aos bancos de dados de entrada referente aos 322 disjuntores dos 10 diferentes modelos de disjuntores, servindo de base para as análises dos itens posteriores.

Figura 55: Taxa de falha por modelo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 56: Tempo para próxima manutenção por modelo



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMA PROPOSTO E SISTEMA ATUAL

Nessa comparação são avaliadas as datas previstas pelo sistema atual e proposta pelo sistema desenvolvido, verificando sua proximidade uma da outra. A metodologia adotada no sistema atual serve como referência para análise do sistema proposto pois já está consolidada e em uso em diversas concessionárias. O principal objetivo nessa comparação é identificar espécimes defeituosos através dos resultados dos ensaios que não seriam identificados pelo sistema atual, pela falta de realimentação dos dados na época da determinação dos tempos entre intervenções. Ainda no sistema atual, existe a necessidade da determinação de intervalo entre intervenções para cada modelo novo de disjuntor adotado pela concessionária. Para tanto são utilizadas as características técnicas do disjuntor e a experiência do especialista para a informação a priori. Uma vez estabelecido, a alteração do intervalo entre intervenções desse modelo depende de uma revisão do especialista podendo decorrer muitos anos até que ela ocorra. No sistema proposto são avaliados somente os dados dos ensaios ou de defeito/falhas dos disjuntores, não levando em consideração qualquer característica técnica seja ela tecnologia de extinção, tecnologia de mecanismo, nível de tensão, corrente nominal ou outro aspecto. A revisão da data para intervenção é determinada a cada ensaio ou registro de falha cadastrado no sistema, mantendo-o atualizado. Para as comparações são levados em consideração os itens:

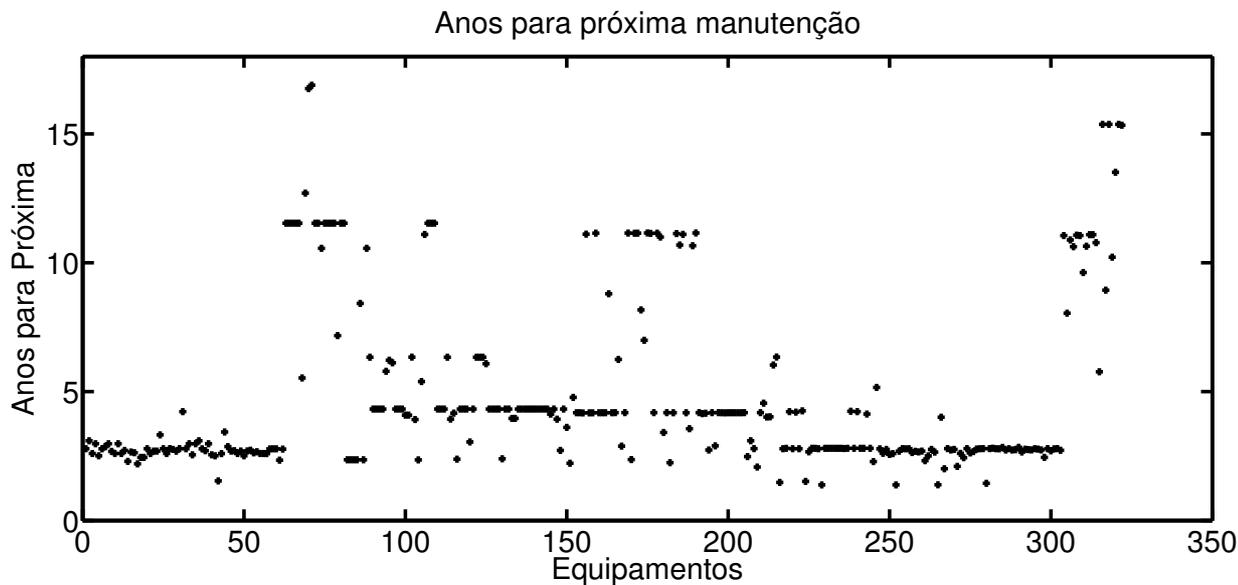
- tempo total: Soma entre a diferença do tempo previsto no sistema atual e da previsão do sistema proposto, para cada espécime. Valores positivos indicam que a proposta é a postergação da manutenção. Valores negativos, a antecipação;
- tempo unitário: Razão entre o tempo total e o número de espécimes, apresenta um valor médio por espécime.
- tempo até a próxima intervenção: Média do intervalo de tempo, em anos, previsto pelo sistema proposto para próxima intervenção contado a partir da data de cada ensaio;
- pior espécime: Se refere ao número de dias que o sistema proposto previu para o pior espécime e portanto o que necessita de menor tempo entre intervenções;

- melhor espécime: Se refere ao número de dias que o sistema proposto previu para o melhor espécime e portanto o que permite maior intervalo entre intervenções.

A descrição dos itens acima serve como referência para interpretação das Tabelas 11, 12, 13 e 14.

A avaliação do sistema proposto, levando em consideração os 10 modelos, abrangendo 322 unidades de diversos tipos de mecanismos e formas de extinção de arco resultou em previsões que estão apresentadas na Figura 57 e resumidas na Tabela 11. Cada ponto do gráfico ao longo abscissa representa um diferente disjuntor, nas ordenadas é apresentado o intervalo sugerido pelo sistema desenvolvido para próxima intervenção. Nota-se que há concentração de espécimes com intervalos de manutenção equivalentes a 3 anos; 4 anos e 11 anos, isso deve-se aos diferentes modelos e tecnologias de disjuntores envolvidos na análise. No sistema atual também observam-se essas divisões, contudo são muito mais rígidas, não havendo as oscilações em torno dos valores entre intervenções, uma vez que esse parâmetro é definido segundo a MBC. Os intervalos sugeridos que distoam dos irmãos chamam a atenção para o espécime, que possui uma intervenção prevista fora da normalidade, podendo ser demasiadamente superior ou inferior a média, salientando a atenção para os valores inferiores que indicam disjuntores com possibilidade de falha elevada.

Figura 57: Resultados obtidos do sistema proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 11: Resultados comparativos entre sistema proposto e sistema atual**

Tipo	Qtd.	Tempo			Pior (Dias)	Melhor (Dias)
		Total (Dias)	Unit. (Dias)	Próx. (Anos)		
Todos	322	-122.100	-379,19	4,82	-4.560	4.575

Fonte: Elaborado pelo autor

A proposta de datas para intervenção, em geral adiantou os serviços em relação ao sistema atual em média em 1 ano por equipamento (coluna “Tempo Unit.” da Tabela 11) sendo o intervalo médio entre manutenções próximo de 5 anos (coluna “Tempo Próx.” da Tabela 11). Apesar de 4,82 anos representar um valor aceitável, não é recomendável estender esse valor para os demais equipamentos, pois suprimem-se muitas informações, como é o caso do espécime que teve seu pior desempenho, tendo sua manutenção adiantada em 4.560 dias (coluna “Pior” da Tabela 11), ou o com melhor desempenho com postergação da manutenção em 4.575 dias (coluna “Melhor” da Tabela 11). A amplitude deve-se a particularidade de cada espécime e não de um grupo como um todo, em que todos possuem a mesma tratativa independente do histórico ou dos atuais resultados.

O sistema proposto avalia os espécimes caso a caso, comparando-o com seus semelhantes (irmãos) fornecendo dados personalizados para cada espécime. A adoção de programas de manutenção baseados somente em tempo são relativamente simples de serem implementados, porém não trazem informações nem critérios relevantes existindo grande probabilidade de se elevar as falhas e o número de intervenções elevando também o custo, tanto pelo excesso de manutenções nos casos de baixas periodicidades que podem acabar também trazendo defeitos a equipamentos considerados bons, como pela ausência de manutenção e falta de dados para acompanhamento da evolução do desempenho do equipamento.

Existem peculiaridades entre mecanismos, tipos de extinção e até mesmo modelos como será melhor abordado nas seções 5.3, 5.4 e 5.5. As diferentes equipes de manutenção com seus diferenciados critérios também influenciam os resultados. Não existe atualmente uma metodologia para avaliação padronizada de ensaios, então pode existir uma Equipe A que procura as informações nos manuais, históricos de ensaios, normas e ainda possui um colaborador muito experiente e crite-

rioso, exigindo resultados excelentes do espécime, independente do esforço, tempo e investimento necessários. Por outro lado, uma Equipe B pode simplesmente realizar os ensaios e anotá-los no sistema, utilizando em seu critério de qualidade de ensaio apenas a comparação entre os polos, ou seja, se todos os polos possuem resultados semelhantes de tempo, resistência de isolamento e resistência de contato, então espera-se que esteja dentro da normalidade optando pela não intervenção intrusiva no espécime. A falta de metodologia para avaliação de ensaio afeta diretamente os espécimes, o preciosismo da Equipe A pode inserir defeitos não existentes pela adoção de intervenção intrusiva e elevar os custos de manutenção, já a Equipe B pode estar negligenciando algum aspecto. Em ambos os casos os disjuntores voltarão a operar e os resultados serão lançados no sistema se juntando a centenas de outros ensaios sem qualquer avaliação posterior. A ausência de dados de referência de ensaios para as equipes também dificulta a avaliação até mesmo porque pode existir somente um equipamento daquele modelo em determinada equipe, dificultando a pesquisa de histórico de ensaios no sistema atual.

Com a premissa de que o sistema atual atende as necessidades de confiabilidade da concessionária, de que ganhos superiores através da elevação da frequência de manutenção acarretariam em menor retorno financeiro, tendo em vista também que o sistema proposto foi modelado de forma a atuar semelhantemente ao sistema atual, as previsões propostas foram adequadas, não se distanciando demasiadamente do sistema atual. O possível excesso de dias adiantados se refere a ensaios com valores abaixo do esperado, mas principalmente a casos em que um ou mais ensaios não foram executados. Um ensaio que foi realizado na instalação do disjuntor e depois não mais repetido nos 10 anos subsequentes normalmente prevalecerá como prioritário e exigindo a necessidade de manutenção, mesmo que os demais ensaios estejam além do esperado. A não execução de um determinado ensaio pode ocorrer por vários motivos dentre eles, falta de instrumento, mão de obra especializada para operar determinado instrumento ou condições atmosféricas, contudo não são justificativas para se ignorar os resultados e devem ser repetidos para possibilitar o acompanhamento e correta avaliação do espécime. Espera-se que com a repetição desses ensaios os resultados melhorem e o tempo proposto se eleve sem perder a confiabilidade do sistema.

Os alertas de dados dos ensaios insatisfatórios são uma ótima ferramenta para priorização de serviços bem como avaliação da qualidade da mão de obra e dos equipamentos, subsidiando os responsáveis pela gerência de manutenção com informações antes não estratificadas.

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS DE EXTINÇÃO

Essa comparação visa avaliar a existência de alguma relação entre as diferentes tecnologias de extinção de arco elétrico e seu tempo para intervenção. São avaliados três meios isolantes (óleo,  $SF_6$  e vácuo) e devido ao fato que utilizando a extinção a óleo existem duas grandes diferenças: PVO e GVO, são tratadas quatro diferentes tecnologias.

Não obstante deve-se levar em consideração que são raros os casos de contemporaneidade de tecnologias e portanto existe o fator envelhecimento diferenciado para cada tecnologia, dificultando uma melhor comparação entre elas.

A Tabela 12 apresenta os dados categorizando os 10 modelos em estudo nos 4 diferentes tipos de tecnologia de extinção.

**Tabela 12: Resultados comparativos entre tecnologias de extinção**

Tipo	Qtd.	Tempo			Pior (Dias)	Melhor (Dias)
		Total (Dias)	Unit. (Dias)	Próx. (Anos)		
GVO	57	-59.090	-1.036,67	2,64	-4.485	790
PVO	62	-35.574	-606,03	2,73	-4.365	367
$SF_6$	184	-40.551	-220,39	5,52	-4.560	4.575
Vácuo	19	15.115	795,53	11,36	-867	3.809

Fonte: Elaborado pelo autor

A proposta do sistema frente à análise dos ensaios e taxa de falhas, levando em consideração a tecnologia de extinção, de uma forma geral sugere a antecipação da manutenção em todos as tecnologias salvo a vácuo que teve, em média, sua data postergada, como demonstrado na coluna “Total” da Tabela 12.

Os resultados do sistema proposto indicam a existência de disjuntores com ensaios muito aquém do esperado, até mesmo nas tecnologias mais recentes ( $SF_6$  e vácuo) que não estão sendo observados pelo sistema atual pela inviabilidade de se analisar manualmente cada ensaio

realizado e compará-los mediante as pesquisas em manuais, normas, observar ensaios dos demais disjuntores do mesmo modelo. Esses dados podem ser observados na coluna “Pior” da Tabela 12, devendo ser necessário a ação sob o espécime focando nos ensaios que apresentaram valores insatisfatórios.

Em contrapartida, nas tecnologias  $SF_6$  e vácuo, encontram-se também equipamentos com ensaios muito satisfatórios que podem ter sua manutenção postergada em muitos anos, evitando a manutenção prematura e desperdício de mão de obra. A análise no sistema atual levaria a intervenções e custos desnecessários elevando as possíveis inserções de defeito em equipamentos.

Avaliando o tempo médio até a próxima intervenção (coluna “Tempo Próx.” da Tabela 12) previsto pelo sistema proposto fica evidente a distinção entre tecnologias que levou em conta somente a avaliação de ensaios e taxa de falha, enquanto que no sistema atual o tempo entre intervenções é fixo mediante análise das características técnicas do disjuntor não levando em consideração os resultados dos ensaios. Os disjuntores GVO e PVO quase não apresentaram diferença, podendo até mesmo serem classificados somente como disjuntores a óleo, ficando próximo do que o sistema atual previa, ou seja, entre 24 e 36 meses. Com periodicidade bem mais longa, o  $SF_6$  se enquadra como tecnologia intermediária e a proposição também se enquadrou muito bem frente ao sistema atual alcançando os 66 meses. Por último, e seguindo as análises anteriores, o tempo entre intervenções médio para tecnologia a vácuo ficou em 136 meses, bem próximo dos 120 meses do sistema atual.

As tecnologias são muito bem definidas pelo sistema proposto que aderiu ao sistema atual, mantendo o objetivo de não se distanciar demasiadamente e causar fortes impactos nas manutenções atuais, contudo não se absteve em prever em um curto espaço de tempo manutenções nos equipamentos que não apresentavam resultado de ensaios adequados.

Ressalta-se que disjuntores com tecnologias atuais estão em um nível estável de vida e possuem pouco histórico de falhas, por isso possuem maiores intervalos entre intervenções, reforçando o uso da taxa de falha na previsão de data de manutenção como um fator importante. O lançamento de intervenções corretivas no sistema de gerenciamento de manutenção, mesmo que simples, contribui para melhora da estimativa da taxa de falha.

## 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS DE MECANISMO

O sistema atual leva em consideração, entre outros aspectos, principalmente o tipo de mecanismo e meio de extinção.

Cada fabricante e modelo de disjuntor possuem diferentes formas de acumular e liberar a energia. Muito da escolha do fabricante está relacionado ao custo e energia necessária para movimentar os contatos e extinguir o arco.

Diferente do meio isolante, o tipo de mecanismo não está diretamente relacionado à evolução da tecnologia, haja vista que existem disjuntores a mola desde os primeiros até os atuais. A Tabela 13 resume os resultados obtidos do sistema proposto nos 4 mecanismos sob estudo.

**Tabela 13: Resultados comparativos entre tecnologias de mecanismo**

Tipo	Qtd.	Tempo			Pior (Dias)	Melhor (Dias)
		Total (Dias)	Unit. (Dias)	Próx. (Anos)		
M	224	-17.890	-79,87	5,66	-4.560	4.575
P	40	-47.906	-1.197,65	3,02	-4.485	790
H	31	-30.060	-969,68	3,00	-3.176	455
S	27	-26.244	-972,00	2,57	-4.393	-63

Legenda:  
M - Mola    P - Pneumático    H - Hidráulico    S - Solenoide

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de existirem diversos fatores que podem tendenciar os resultados, como por exemplo, idade, tecnologia de extinção, modelos e tipo de instalação, observa-se que o tempo proposto para próxima intervenção (coluna “Tempo Próx.” da Tabela 13) entre mecanismo a mola e os demais é elevado. Utilizando como base para comparação a Tabela 10, e a coluna “Tempo Próx.” da Tabela 13, no sistema atual os equipamentos que utilizam mola têm sua periodicidade entre 24 e 120 meses, enquanto que no sistema proposto o resultado obtido foi de 68 meses. As previsões de 31 e 36 meses referentes aos mecanismo pneumático e solenoide, respectivamente, ficaram bem próximas do sistema atual que é de 36 meses. A maior diferença é observada nos mecanismos hidráulicos em que a previsão ficou em 36 meses, longe

dos atuais 60 meses. Nesse caso específico, o ensaio de resistência de isolamento foi o determinante para data da próxima intervenção em 21 dos 31 disjuntores desse modelo. Apesar de não apresentarem valores alarmantes, estão muito distantes da média dos últimos ensaios, sendo assim, cabe a análise mais crítica quanto aos resultados lançados no sistema averiguando se os valores foram corretamente lançados ou influenciados, como já abordado na Seção 3.1.2.

Em geral o sistema desenvolvido propôs intervenções com menores periodicidades por equipamento, ficando muito próximo da previsão do sistema atual nos mecanismos a mola. Levar em consideração mais aspectos, tende a levar a melhores conclusões. Categorizar os equipamentos como no sistema atual, por tipo de mecanismo e/ou extinção não atende completamente as necessidades pois evidencia-se que a adoção desses métodos acaba suprimindo informações importantes, podendo prejudicar seja por excesso de manutenção e gastos, seja pela sua omissão e redução da confiabilidade contribuindo para elevação dos índices de falha.

## 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE ESPÉCIMES DE MESMO MODELO

Esse tipo de comparação permite avaliar cada modelo de disjuntor, examinando se o previsto pelo sistema atual está próximo com a saída do sistema proposto além de identificar os desvios que existem dentro de um grupo de espécimes semelhantes (do mesmo modelo). Um resumo com os dados para cada modelo é apresentado na Tabela 14.

A análise mais detalhada, agrupando os disjuntores por modelo, dá condições de examinar o sistema proposto de uma forma muito semelhante de como são programadas as manutenções no sistema atual, haja vista que não existem diferenças significativas na programação de manutenções entre disjuntores de mesmo modelo por compartilharem das mesmas características básicas, mesmo assim uma pequena minoria pode possuir diferentes prazos por se enquadrarem em outras características, como por exemplo o uso em banco de capacitores.

Nas colunas: “Pior” e “Melhor” da Tabela 14, observam-se dentro do mesmo modelo as variações entre datas de manutenção, casos que não são observados no sistema atual e que podem contribuir para a elevação do número de falhas. Na Figura 56 é melhor observável a distribuição dos espécimes anormais dentro do mesmo modelo de disjuntor.

**Tabela 14: Resultados comparativos entre espécimes de mesmo modelo**

Tipo	Qtd.	Tempo			Pior (Dias)	Melhor (Dias)
		Total (Dias)	Unit. (Dias)	Próx. (Anos)		
1	57	-36.975	-648,68	2,73	-4.365	367
2	5	-599	-119,80	2,69	-647	251
3	90	4.806	53,40	6,24	-2.868	4.575
4	53	-237	-4,47	6,08	-4.560	3.025
5	10	-15.060	-1.506,00	3,96	-3.544	-64
6	31	-30.060	-969,68	3,00	-3.176	455
7	27	-26.244	-972,00	2,57	-4.393	-63
8	30	-32.846	-1.094,87	2,71	-4.485	790
9	11	267	24,27	10,54	-867	447
10	8	14.848	1.856,00	12,48	305	3.809

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que existe a tendência dos disjuntores se manterem dentro do mesmo prazo entre intervenções, sendo que na minoria dos casos as intervenções são postergadas ou antecipadas. Desconsiderando qualquer comparação com o sistema atual, as antecipações (manutenções com periodicidade inferior a média dos irmãos), apesar de minoria, são de extrema utilidade para identificar possíveis espécimes defeituosos que tenham passado despercebidos pelas equipes de manutenção, com probabilidades aumentadas de apresentarem defeitos caso não sejam investigados.

A Tabela 15 apresenta resumidamente a comparação de periodicidades entre o sistema atual e o proposto. A coluna “Proposto” da Tabela 15 contém os dados da coluna “Tempo Próx.” da Tabela 14 em meses. A coluna “Atual” da Tabela 15 origina da coluna “Periodicidade Atual” da Tabela 10. Na Tabela 15, a coluna “Diferença” é a subtração das colunas “Proposto” e “Atual”, indicando em valores positivos postergação e em valores negativos a antecipação da manutenção por conta da previsão do sistema proposto.

Levando em consideração a diferença de metodologias, o tempo médio até a próxima intervenção, não se distanciou do sistema atual como apresenta-se na Tabela 15, sendo que somente no Modelo 10 o proposto pelo sistema ficou acima de 24 meses. As manutenções não necessitam ser realizadas em datas rigorosas e em muitos casos podem

**Tabela 15: Comparação entre periodicidades**

Modelo	Periodicidade do Sistema		Diferença (Meses)	$\frac{Proposto}{Atual}$ (%)
	Proposto (Meses)	Atual (Meses)		
1	33	24	9	137
2	32	36	-4	90
3	75	60	15	125
4	73	60	13	122
5	48	36	12	132
6	36	60	-24	60
7	31	36	-5	86
8	32	36	-4	90
9	126	120	6	105
10	150	120	30	125

Fonte: Elaborado pelo autor

aguardar ou antecipar para aproveitamento em conjunto com outras manutenções como em relés, linhas de transmissão ou transformadores. Apesar de não necessitarem obrigatoriamente de interrupções de energia, a manutenção aliada à indisponibilidade de um disjuntor implica em perda de confiabilidade.

A coluna “Diferença” da Tabela 15 pode parecer discordante da coluna “Tempo Unit.” da Tabela 14, mas existe uma diferença no método como são calculadas pois a data da última manutenção pode diferir da data do último ensaio. Existe a possibilidade de ser realizado um ensaio sem a necessidade de manutenção no disjuntor. O exemplo

abaixo demonstra essa diferença. Considerando:

Ensaio de resistência de contato	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ano do último ensaio:} \\ \text{Periodicidade:} \\ \text{Ano da próxima:} \end{array} \right.$	2010
		1 ano
		2011
Ensaio de tempo de abertura	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ano do último ensaio:} \\ \text{Periodicidade:} \\ \text{Ano da próxima:} \end{array} \right.$	2012
		2 anos
		2014

Data da última manutenção: 2012

Data da próxima manutenção (sistema atual): 2014

O valor referente a coluna “Diferença” seria:

Periodicidade do Sistema Atual:  $2014 - 2012 = 2$  anos = 24 meses

Periodicidade do Sistema Proposto:  $\min(1, 2) = 1$  ano = 12 meses

Diferença:  $12 - 24 = -12$  meses

O valor referente a coluna “Tempo Unit.” seria:

Tempo Total:  $\min(2011, 2014) - 2014 = -3$  anos = -36 meses

Tempo Unit:  $\frac{\text{Tempo Total}}{\text{Número de Espécimes}} = \frac{-36}{1} = -36$  meses

A “Diferença” reflete o tempo entre intervenções que o sistema proposto está fornecendo e o “Tempo Unit.” compara a data prevista pelo sistema atual com o sistema proposto. No exemplo citado, um ensaio não foi realizado na última manutenção do disjuntor. Embasado no o acima apresentado é possível concluir através da Tabela 15 que o sistema proposto pode postergar as manutenções na maioria dos casos, desde que não exista ausência de ensaios.

A postergação ou antecipação da manutenção em um período elevado deve sempre ser investigada, como no caso do Modelo 6 já abordado na Seção 5.4.

## 5.6 LISTA DE ENSAIOS EXCEPCIONAIS

Adicionalmente, o sistema proposto fornece de forma sucinta todos os ensaios cuja análise sugerem valores puramente Urgentes na última manutenção, como definido na Seção 4.4.2. Na avaliação dos 322 disjuntores de 10 diferentes modelos foram encontrado 75 ensaios anormais de um total de 12.768.

A Tabela 16 apresenta os índices de ensaios com valores excepcionais.

**Tabela 16: Lista de ensaios anormais**

Ensaio	Quantidade		%
	Total	Anormais	
Resistência de Contato	2.694	22	29,33 %
Tempo de Operação - Fechamento	1.521	17	22,67 %
Tempo de Operação - Aberto	1.518	12	16,00 %
Resistência Isolamento - Fechado	2.546	8	10,67 %
Discordância Abertura	506	6	8,00 %
Discordância Fechamento	507	5	6,67 %
Rigidez Dielétrica do Óleo	931	5	6,67 %
Resistência Isolamento - Aberto	2.545	0	0,00 %
Totais:	12.768	75	

Fonte: Elaborado pelo autor

Por se tratarem de ensaios que possuem valores fora da expectativa, deve-se verificar se os resultados não foram influenciados pelo banco de dados de referência, abordado na Seção 4.1.4, que em casos não atendidos por normas ou recomendações do fabricante a estimativa é determinada pelo especialista e talvez rígida demais.

Os ensaios que apresentaram maiores índices de anomalias estão relacionados à parte mecânica do disjuntor, totalizando 53 % do total de anomalias, 29 % aos contatos do disjuntor e os 17 % restantes ao isolamento do disjuntor.

A Tabela 16 pode apresentar os ensaios que sofrem influências da qualidade de serviço das equipes. Em uma manutenção de disjuntor, alguns serviços são realizados antes dos ensaios, como por exemplo, o de limpeza dos polos e dos contatos, que refletem diretamente nos ensaios de resistência de isolamento e de resistência ôhmica dos contatos respectivamente. Outros serviços podem ser requeridos após os

ensaios e condicionados aos seus resultados, como por exemplo, o de rigidez dielétrica do óleo, em que não existe razão em substituí-lo antes de analisá-lo. Existem também ensaios influenciáveis pelas condições atmosféricas ou pela indução do próprio barramento que ocorre principalmente no ensaio de resistência de isolamento ou de rigidez dielétrica do óleo em que a temperatura e umidade ambiente afetam o teor de água dissolvido no óleo.

Avaliar se o ensaio possui resultados confiáveis é uma tarefa complicada; o ideal é agregar ensaios de topologias diferentes para agregar maiores subsídios quanto ao estado do disjuntor, como por exemplo, relacionando medidas de resistência de isolamento e rigidez dielétrica do óleo uma vez que apesar de avaliarem isolantes diferentes, as duas grandezas se referem ao isolamento do disjuntor.

## 6 CONCLUSÕES

Com a responsabilidade de interromper corrente, em condições nominais e sob falta, tendo que extinguir o arco e contribuir também para a estabilidade do sistema, bem como evitar danos aos demais componentes das subestações, os disjuntores devem estar sempre aptos para executar sua função mesmo após décadas de uso. Tanto a elevada como a pouca operação de disjuntores podem acarretar em defeitos e redução das características nominais estabelecidas em projeto.

A manutenção e principalmente a execução de ensaios trazem informações quanto ao estado dos principais componentes do disjuntor e indicam desvios, podendo antecipar a identificação de falhas, elevando a confiabilidade do sistema. A manutenção excessiva é prejudicial e dispendiosa, por outro lado sua ausência traz riscos para o sistema elétrico, deve-se encontrar o equilíbrio através da adoção de periodicidade correta. Cada equipamento está sujeito a diferentes exigências e regimes de operação bem como possuem características construtivas diferentes, não sendo prudente a escolha de periodicidades fixas.

Esse trabalho apresentou uma forma de avaliação de ensaios e dados históricos de manutenção para programação de datas de manutenção, avaliando individualmente cada disjuntor e seus ensaios. Os resultados obtidos com a parametrização adotada foram satisfatórios, prevendo manutenções em periodicidades semelhantes ao sistema atual, mas agregando informações de parâmetros, limites e comparação com disjuntores semelhantes hoje não existentes. Uma das principais vantagens do sistema proposto é a identificação de desvios nos ensaios que não foram percebidos pelas equipes na época da manutenção, prevendo nesses casos um intervalo menor para a próxima manutenção ou em casos extremos, o destaque em uma lista de ensaios com valores excepcionais.

Apesar do sistema proposto fornecer uma data para próxima manutenção, seu uso é indicado apenas como ferramenta de apoio às equipes e especialistas. Isso porque seu desempenho depende da existência de informações completas e confiáveis nos bancos de dados. A falta de ensaios ou histórico de falhas de um determinado modelo, não prevê informações necessárias para que o sistema gere resultados satisfatórios podendo postergar por muito tempo manutenções em alguns modelos de disjuntores, principalmente nos novos no qual essa ausência de informação é natural e a taxa de falha no início da vida útil tende a ser

elevada. A qualidade dos bancos de dados também é essencial para que o sistema aja corretamente, a falta do cadastro ou o lançamento incorreto ou incompleto de informações remetem à adoção de periodicidade inadequada que se estendem a todos os disjuntores do mesmo modelo.

Com a aplicação da metodologia proposta foi possível analisar diversas particularidades entre os diferentes tipos de tecnologia de extinção do arco elétrico e mecanismos de acionamento somente pela análise de dados de ensaio e do histórico de falhas. No sistema atual essa informação é primordial para o enquadramento no correto grupo de manutenção e depende da experiência dos especialistas a tarefa de determinar ou criar o grupo e periodicidade. No caso de surgimento de novas tecnologias o sistema atual depende do especialista, enquanto que no sistema proposto ele é subsidiado com informação para orientação e identificação de defeitos.

A avaliação individual de cada disjuntor e de cada ensaio, propiciadas pelo sistema proposto, eleva o grau de detalhamento e esforços necessários para que a equipe possa manter o equipamento ou sanar os defeitos. É possível focar com antecedência para a próxima manutenção se os esforços estarão em, por exemplo, agir sobre o polo em casos de baixo isolamento ou no mecanismo em casos de discordâncias de tempos muito elevadas. Informações como essas são fundamentais para dimensionamento de homens hora, ferramental, tempo e local de intervenção. Pode-se optar inclusive pela substituição e desmontagem em oficina do disjuntor defeituoso quando há tempo hábil para a programação de um serviço como esse.

O tempo para execução das avaliações pelo sistema proposto é baixo, se resumindo a segundos, mesmo para quantidades elevadas de equipamentos, ainda mais se levar em consideração a frequência com que se necessita atualizar as datas de manutenção, geralmente quando uma nova ordem de serviço ou resultados de ensaio de disjuntor são integrados ao banco de dados.

O sistema proposto utiliza informações antes conhecidas porém isoladas e de difícil pesquisa, agrupando e avaliando de forma semelhante ao raciocínio adotado pelas equipes, porém segundo um mesmo critério e com muito mais detalhes, subsidiando as equipes de manutenção e especialistas na melhora de procedimentos e maiores informações sob cada espécime.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros pode-se desenvolver um sistema especialista que identifique os possíveis pontos que necessitam de ação na próxima manutenção, ou possíveis defeitos que podem estar contribuindo para o resultado insatisfatório do ensaio. Dessa forma as equipes poderiam até prever materiais ou sobressalentes necessários para aquisição.

Desenvolver um programa incluindo os custos de manutenção do equipamento atual e simulando os custos de manutenção em um novo, com base nos dados de disjuntores de modelos com tecnologias atuais, pode ser uma alternativa para determinar a priorização de investimentos e gerência de ativos, podendo também prever o dimensionamento de equipes de manutenção já que equipamentos de tecnologias obsoletas tendem a necessitar de mais homens hora de manutenção que os atuais.

Poderiam ser incluídos no banco de dados de falhas os dados de automação como por exemplo, os alarmes gerados por baixa pressão de  $SF_6$ . Através do desenvolvimento de um programa de interface e comunicação entre diferentes fontes de informação (automação, relés de proteção e oscilopertubógrafo) o banco de dados de ensaios poderia ter a inclusão automática de dados como:

- monitoramento do disjuntor através da análise da corrente da bobina de abertura;
- desgaste dos contatos, disponíveis em muito dos relés de proteção;
- medição dos tempos de operação, através de algoritmos subsidiados de informações provenientes dos oscilopertubógrafos.



## REFERÊNCIAS

- [1] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS - SAE. *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. Agosto 2009.
- [2] DIAS, A. et al. *Metodologia para análise de risco: mitigação de perda de SF6 em disjuntores*. Florianópolis: Studio S, 2011. 304 p.
- [3] SANCHEZ, T. B. Desempenho dos disjuntores do sistema de transmissão da eletrosul visando adequações no plano de manutenção. In: *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Florianópolis: [s.n.], 2011.
- [4] WILSON, H. et al. *Failure survey on circuit-breaker controls system*. [S.l.]: CIGRÉ, 2007. (Working Group A3.12).
- [5] KEZUNOVIC, M. et al. Automated monitoring and analysis of circuit breaker operation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 1910–1918, 2005.
- [6] ILLSLEY, M.; WALDRON, M. Refurbishment and life extension of circuit breakers as an asset management tool. *Cigré Session*, v. 18, n. A3-102, p. 45–46, August 2008.
- [7] MAZZA, G.; MICHACA, R. The first international enquiry on circuit-breaker failures and defects in service. *Elektra no. 79*, p. 21–91, 1981.
- [8] JANSSEN, A. *Final Report of the Second International Enquiry on High Voltage Circuit-Breaker Failures and Defects in Service*. CIGRÉ, 1994. (CIGRÉ technical brochure 83, 176). Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=d8wwHQAACAAJ>>.
- [9] STRACHAN, S. et al. Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures. *Power Delivery, IEEE Transactions*, v. 22, n. 1, p. 178–186, 2007. ISSN 0885-8977.
- [10] MATHWORK. *Matlab - Wavelet Toolbox: User's Guide*. [S.l.], 2001.

- [11] SILVA, M. S. *Sistema de monitoramento e metodologia de estimativa dos tempos de operação do disjuntor*. Dissertação (Tese (Doutorado em Sistemas de Potência) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [12] SILVA, M. et al. Determination of the circuit breaker operation times using the wavelet transform. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 1214–1219 Vol.2.
- [13] DONG, Y.; XIAO, D. M. Combination of wavelet packet band energy analysis and ar model bi-spectrum in application on circuit breaker condition detection. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008. ICHVE 2008*. Chongqing: IEEE, 2008. p. 657–660.
- [14] HU, X. et al. The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers. In: *Power Engineering Society General Meeting*. Toronto: IEEE, 2003. v. 4, p. 2240 Vol. 4.
- [15] WANG, Z. xia et al. Adaptive type-2 fuzzy maintenance advisor for offshore power systems. In: *International Conference on Systems, Man and Cybernetics - SMC*. San Antonio: IEEE, 2009. p. 4520–4526. ISSN 1062-922X.
- [16] CHANG, C. et al. Hierarchical fuzzy logic system for implementing maintenance schedules of offshore power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 1, p. 3–11, 2012. ISSN 1949-3053.
- [17] GARZON, R. *High voltage circuit breakers: design and applications*. Marcel Dekker, 1997. (Electrical engineering and electronics). ISBN 9780824798215. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=VORSAAAAMAAJ>>.
- [18] LIMA, R. T. de. *Desenvolvimento de Software para Medição dos Tempos de Operação durante Ensaios em Disjuntores de Alta Tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- [19] AREVA. *Instrução de Operação n° 246 - Disjuntor de alta tensão GL 312 F1*. Ba 246 pt/01. Itajubá, Julho 2009.

- [20] DISJUNTOR 3AP1 FG para tensões até 145kV. [S.l.].
- [21] VATECH. *SB6 123-245 kV - SF6 circuit breaker*. [S.l.].
- [22] DUFOURNET, D. Circuit breakers go high voltage. v. 7, n. 1, p. 34–40, 2009.
- [23] SUWARNO; SALIM, F. Effects of electric arc on the dielectric properties of liquid dielectrics. In: *Proc. 8th Int Properties and applications of Dielectric Materials Conf.* [S.l.: s.n.], 2006. p. 482–485.
- [24] COOPER, W. F. Insulating oil in relation to circuit-breaker failures. *Journal of the Institution of Electrical Engineers -Part I: General*, v. 89, n. 22, p. 476–477, 1942.
- [25] PRINCE, D. C.; SKEATS, W. F. The oil-blast circuit breaker. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 506–512, 1931.
- [26] MILASCH, M. *Manutenção de disjuntores de alta tensão*. [S.l.]: Cervantes Ed., 1993. 252 p.
- [27] PORTELA, C. M. *Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência*. [S.l.]: EDUFE, 1995. 365 p.
- [28] CLARE, S.; ROWAN, W. O. Twenty years' experience with outdoor single-tank oil circuit breakers. *Part III Power Apparatus and Systems Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 78, n. 4, p. 1501–1504, 1959.
- [29] GEERAL ELECTRIC S.A. *Instruções disjuntores a óleo tipo BKSO 34,5 a 69kV*. Geep-h-1. [S.l.].
- [30] WESTINGHOUSE. *Outdoor oil breakes type GM floor mounted*. 33-253. ed. [S.l.], Maio 1960.
- [31] DELLE-ALSTHOM. *"Orthojecteur" Circuit Breakers Type HPGE 12-15E and 12-16E*. Nm429a. [S.l.].
- [32] BURET, F.; BEROUAL, A. Sf6 dielectric behaviour in a high voltage circuit breaker at low temperature under lightning impulses. v. 11, n. 1, p. 267–273, 1996.

- [33] SLADE, P. *The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application*. Taylor & Francis, 2007. ISBN 9781420008593. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=uJT4mENgMbQC>>.
- [34] JOSLYN HI-VOLTAGE. *Desconectores para hornos series VBT - VBU - T*. [S.l.], Janeiro 2007.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 60694:2006. *Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando*. 2006.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7397:2007. *Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente - Determinação da massa do revestimento por unidade de área - Método de ensaio*. 2007. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=000970>>.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7398:2009. *Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Verificação da aderência do revestimento - Método de ensaio*. 2009. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=51559>>.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7399:2009. *Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Verificação da espessura do revestimento por processo não-destrutivo - Método de ensaio*. 2009.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7400:2009. *Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido por imersão a quente - Verificação da uniformidade do revestimento - Método de ensaio*. 2009.
- [40] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 60376-05. *Specification Of Technical Grade Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) For Use In Electrical Equipment*. Maio 2006.
- [41] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 62271-100. *High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers*. 2008.

- [42] FAROOQ, K. The effect of particulate and water contamination on the dielectric strength of insulating oils. In: *Electrical Insulation, 1996., Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 2, p. 728 –732 vol.2. ISSN 1089-084X.
- [43] LI, C. et al. The effect of moisture on the breakdown of aged oil in underground load interrupter switches. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, v. 27, n. 5, p. 1054 –1057, oct. 1992. ISSN 0018-9367.
- [44] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM STANDARD D877. *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes*. 2007.
- [45] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM STANDARD D1816. *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes*. 2012.
- [46] IEEE STD C57.106-2006. *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment*. Junho 2006. 1 -36 p.
- [47] TIMOSHKIN, I. V. et al. Review of dielectric behaviour of insulating liquids. In: *Proc. 44th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4.
- [48] IIJ-II series automatic transformer oil dielectric strength tester. Acesso em: 20/06/2013. Disponível em: <<http://www.oil-purifying.com/>>.
- [49] MAUTHE, G. *SF6 Recycling Guide: Re-use of SF6 Gas in Electrical Power Equipment and Final Disposal*. CIGRÉ, 2002. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=yMJHQAACAAJ>>.
- [50] GOMES, D. et al. *Hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) em Equipamentos Elétricos - Levantamento da situação atual nas empresas*. [S.l.], 2011.

- [51] G.A.S. Gesellschaft für analytische Sensorsysteme mbH. Acesso em: 20/06/2013. Disponível em: <<http://www.gas-dortmund.de/Products-SF6/>>.
- [52] SIEMENS LTDA. *3AF 03 Disjuntor Tripolar a Vácuo ao tempo 17.5 kV*. Jundiaí.
- [53] ISA. *Application guide for the circuit breaker analyzer and microohmmeter mod. CBA 2000*. Mie11169. [S.l.], Maio 2009.
- [54] ABB SWITCHGEAR. *Interruptor SF6 tipo LTB 72.5-170D1/BGS, LTB 72.5-170D1/BUS con tres columnas soporte - 5452 106SP-18 Rev.0*. Ludvika, november 1998.
- [55] MEGGER. *TM1800 Circuit breaker analyzer system with DualGround*. Acesso em: 20/06/2013. Disponível em: <<http://www.megger.com/uk/products/>>.
- [56] WALPOLE, R. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 9780132047678. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=k6etQgAACAAJ>>.
- [57] MENDOLA, M.; SOUZA, A. L. de; BARRO, L. C. *Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5*. [S.l.]: FE-AGRI & IMECC/UNICAMP, 2005.
- [58] MATHWORK. *Matlab - Fuzzy Logic Toolbox: User's Guide*. [S.l.], 2012.