

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONSOLIDAÇÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA A  
DISCIPLINA DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS –  
DISJUNTORES**

ANDRÉ LAWSON PEDRAL SAMPAIO



Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
Fevereiro de 2012

**CONSOLIDAÇÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA A DISCIPLINA DE  
EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – DISJUNTORES**

André Lawson Pedral Sampaio

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

---

Prof. Jorge Nemésio Sousa, M. Sc.  
(Orientador)

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

---

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 2012

## Resumo

A elaboração deste trabalho visou reunir em um só documento todas as informações básicas necessárias para a especificação de disjuntores. Seu objetivo principal é fornecer aos estudantes de Engenharia Elétrica meios suficientes para compreender o funcionamento deste tipo de equipamento e determinar o disjuntor adequado para cada tipo de instalação.

Para tanto, além das principais características de disjuntores, este trabalho aborda, também, circuitos de controle, explicações sobre o arco elétrico, bem como sobre a Tensão Transitória de Restabelecimento (TTR), e apresenta as diferentes técnicas de interrupção de corrente utilizadas nas atuais tecnologias empregadas para o corte. Finalmente são fornecidos os valores normatizados e os meios de determiná-los para o equipamento em questão.

As informações aqui coletadas foram obtidas da literatura vigente sobre o assunto, publicações de fabricantes, notas de aula e da experiência obtida ao longo de um ano de trabalho no setor de pesquisa de disjuntores.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Câmara de extinção de arco.....	13
Figura 2 – Tulipa de um disjuntor de alta tensão .....	14
Figura 3 – Pino de um disjuntor de alta tensão .....	14
Figura 4 – Disjuntor a grande volume de óleo .....	18
Figura 5 – Disjuntor a pequeno volume de óleo .....	20
Figura 6 – Disjuntor a ar comprimido .....	23
Figura 7 – Número de manobras em função da corrente interrompida para disjuntor tipo PVO e disjuntor a vácuo .....	25
Figura 8 – Câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo.....	26
Figura 9 – Disjuntor a SF <sub>6</sub> tipo pressão única.....	28
Figura 10 – Modelo de disjuntor a SF <sub>6</sub> tipo selfblast.....	28
Figura 11 – Disjuntor a SF <sub>6</sub> tipo dois ciclos.....	29
Figura 12 – Câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético.....	30
Figura 13 – Abertura de um disjuntor com sistema de duplo movimento .....	32
Figura 14 – Circuito básico para o fechamento de um disjuntor.....	39
Figura 15 – Circuito de fechamento com interrupção automática da corrente.....	40
Figura 16 – Inclusão da função selo no circuito de fechamento.....	42
Figura 17 – Circuito de fechamento com a função antibaque.....	43
Figura 18 – Circuito de fechamento com todas as funções incorporadas .....	44
Figura 19 – Circuito para a abertura de um disjuntor .....	47
Figura 20 – Circuito completo para abertura e fechamento de disjuntores .....	48
Figura 21 – Circuito de controle de abertura operado a mola.....	49
Figura 22 – Variação da TTR em função de 1/RC .....	52
Figura 23 – Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento (TCRT).....	54
Figura 24 – Formação da TTR em seguida à interrupção de uma falta terminal.....	55
Figura 25 – Modelagem da TTR pelo método dos quatro parâmetros .....	57
Figura 26 – Modelagem da TTR pelo método dos dois parâmetros.....	58
Figura 27 – Circuito equivalente para um defeito quilométrico .....	59
Figura 28 – Arco entre os contatos de um disjuntor .....	63
Figura 29 – Características dos períodos de interrupção de uma corrente de curto-circuito .....	66
Figura 30 – Processo de interrupção de corrente em um disjuntor.....	67

Figura 31 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo para uma interrupção .....	68
Figura 32 – Curvas de tensão e corrente para uma reignição térmica.....	69
Figura 33 – Curvas de corrente e tensão para uma interrupção de corrente pós-arco .....	69
Figura 34 – Comparação das curvas de corrente e tensão com o dielétrico do disjuntor.....	70
Figura 35 – Câmara de extinção tipo <i>cross blast</i> .....	72
Figura 36 – Câmara de extinção tipo <i>axial blast</i> .....	73
Figura 37 – Câmara de extinção tipo <i>mono blast</i> .....	74
Figura 38 – Câmara de extinção tipo <i>duo blast</i> .....	75
Figura 39 – Contato de um disjuntor a vácuo e o arco difuso.....	76
Figura 40 – Arco contraído e seu deslocamento no interior do contato .....	77
Figura 41 – Rigidez dielétrica do SF6, do ar e do óleo mineral isolante .....	79
Figura 42 – Sequência de corte em uma câmara a pressão única .....	82
Figura 43 - Sequência de corte em uma câmara de dois ciclos.....	84
Figura 44 – Câmara de extinção de arco tipo <i>selfblast</i> .....	85
Figura 45 – Sequência de corte de um disjuntor a sopro magnético.....	87
Figura 46 – Impulso elétrico padronizado para ensaio dielétrico (1,2 x 50 $\mu$ s) impulso pleno .....	90
Figura 47 – Curva da corrente de curto-circuito em função do tempo.....	93
Figura 48 – Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ao longo do tempo..	97
Figura 49 – Tempo para inibição de curto-circuito e componente DC da corrente (% $I_{dc}$ ).....	98
Figura 50 – Tempo de abertura de curto-circuito .....	99
Figura 51 – Abertura do 1º polo de um disjuntor durante falta terminal trifásica não aterrada em um sistema isolado .....	105
Figura 52 – Gráfico para determinação da tensão e corrente de operação .....	108
Figura II.1 – Diagrama unifilar do circuito .....	118
Figura II.2 – Diagrama unifilar do circuito equivalente.....	119
Figura II.3 – Diagrama unifilar do circuito equivalente trifásico.....	120
Figura II.4 – Circuito equivalente simplificado.....	120
Figura II.6 – Circuito equivalente considerando-se as capacitâncias .....	122

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre disjuntores GVO e PVO.....	21
Tabela 2 – Propriedades do gás SF <sub>6</sub> .....	80
Tabela 3 – Grupos de impurezas e métodos de determinação .....	81
Tabela 4 – Classes de tensão (kV) – IEC.....	89
Tabela 5 – Classes de tensão (kV) – ABNT.....	89
Tabela 6 – Correntes padronizadas nominais (Ampères) – IEC/ABNT.....	91
Tabela 7 - Corrente de interrupção de curto-circuito (kA) – ABNT/IEC.....	95
Tabela 8 – Valores do fator F em função de X/R e $\tau$ a 60 Hz .....	96
Tabela 9 – tempos de interrupção, abertura e separação dos contatos recomendado .....	99
Tabela 10 – tempo de separação dos contatos.....	100
Tabela 11 - Corrente eficaz nominal de curta duração (kA) – ABNT/IEC.....	102
Tabela 12 - Corrente eficaz nominal de curta duração (kA) – ANSI .....	102
Tabela 13 – Fator de assimetria.....	109
Tabela 14 – Reatâncias subtransitórias em função do tipo de motor e da corrente empregada.....	111

## Lista de Abreviaturas e Siglas

°C	grau Celsius – Unidade de temperatura
$\Omega$	Ohm – Unidade de resistência elétrica
A	Ampère – Unidade de corrente elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC ou CA	Corrente elétrica alternada
AF	<i>Amplitude Factor</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
atm	Atmosfera – Unidade de pressão
bar	Bar – Unidade de pressão correspondente a 0,987 atm
CaF <sub>2</sub>	Fluoreto de cálcio
CuF <sub>2</sub>	Fluoreto de cobre
CF <sub>4</sub>	Tetrafluorometano
DC ou CC	Corrente contínua
FFT	Fator de Faixa de Tensão
GVO	Grande volume de óleo
HP	<i>Horse Power</i> – Unidade de medida de potência correspondente a 745,7 W
Hz	Hertz – Unidade de frequência elétrica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
K	grau Kelvin – Unidade para a grandeza temperatura termodinâmica
m	Metro – unidade de distância
MoS <sub>2</sub>	Sulfeto de molibdênio
NBR	Sigla de Norma Brasileira aprovada pela ABNT
NM	<i>Norma Mercosur</i>
PVO	Pequeno volume de óleo
SF <sub>2</sub>	Fluoreto de enxofre
SF <sub>4</sub>	Tetrafluoreto de enxofre
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de enxofre
TCRT ou RRRV	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento
TTR ou TRV	Tensão Transitória de Restabelecimento

V	Volt – Unidade de tensão elétrica
W	Watt – Unidade de medida de potência elétrica
WF <sub>6</sub>	Fluoreto de tungstênio

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Proposta .....	1
1.2. Motivação .....	1
1.3. Objetivo do estudo.....	1
1.4. Relevância do estudo.....	2
1.5. Limitações do estudo .....	2
1.6. Organização do estudo.....	2
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>3. METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	<b>7</b>
3.1. Introdução .....	7
3.2. Etapas da Pesquisa.....	7
3.3. Definição de Pesquisa .....	7
3.4. Classificação e Tipos de Pesquisa .....	8
<b>4. CONCEITOS BÁSICOS</b> .....	<b>10</b>
4.1. Definição .....	10
4.2. Normas Aplicáveis .....	11
4.3. Principais funções de um disjuntor .....	11
4.4. Principais componentes.....	12
4.5. Princípio de funcionamento.....	15
<b>5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS DISJUNTORES</b> .....	<b>17</b>
5.1. Disjuntores GVO – Grande Volume de Óleo.....	17
5.2. Disjuntores PVO – Pequeno Volume de Óleo .....	19
5.3. Disjuntores a ar comprimido .....	22
5.4. Disjuntores a vácuo .....	24
5.5. Disjuntores a SF6 .....	26
5.6. Disjuntores a sopro magnético .....	29
5.7. O sistema de duplo movimento .....	31
<b>6. CIRCUITOS DE CONTROLE</b> .....	<b>33</b>
6.1. Introdução .....	33
6.2. Características principais .....	33
6.2.1. Controle de fechamento (closing).....	34
6.2.2. Controle de abertura (tripping) .....	35
6.2.3. Abertura livre (trip free) .....	35
6.2.4. Antibombeamento (anti-pumping) .....	36
6.2.5. Confiabilidade.....	36
6.3. Circuito de controle de disjuntores com mecanismo de operação a solenóide .....	38

6.4.	Circuito de controle de disjuntores com mecanismo de operação a mola...	48
<b>7.</b>	<b>A TENSÃO TRANSITÓRIA DE RESTABELECIMENTO (TTR)</b> .....	<b>51</b>
7.1.	Introdução .....	51
7.2.	Características e fatores de influência .....	51
7.3.	Análise da TTR.....	53
7.4.	Modelagem da TTR.....	56
7.5.	Defeito quilométrico.....	58
<b>8.</b>	<b>O ARCO ELÉTRICO</b> .....	<b>60</b>
8.1.	Definição .....	60
8.2.	Formação e extinção.....	60
8.2.1.	O período pré-arco .....	61
8.2.2.	O período de arco ativo e extinção.....	62
8.2.3.	O período pós-arco .....	63
8.3.	Técnicas de interrupção.....	70
8.3.1.	Extinção do arco elétrico em disjuntores a óleo mineral isolante .....	70
8.3.2.	Extinção do arco elétrico em disjuntores a ar comprimido .....	73
8.3.3.	Extinção do arco elétrico em disjuntores a vácuo .....	75
8.3.4.	Extinção do arco elétrico em disjuntores a SF6 .....	77
8.3.4.1.	Propriedades do SF6 .....	77
8.3.4.2.	Extinção do arco em disjuntores a SF6.....	81
8.3.5.	Extinção do arco elétrico em disjuntores a sopro magnético .....	86
8.3.6.	Extinção do arco elétrico em disjuntores a semicondutores.....	87
<b>9.</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO SEGUNDO AS NORMAS IEC/ABNT</b> .....	<b>89</b>
9.1.	Tensão nominal.....	89
9.2.	Nível de isolamento .....	89
9.3.	Frequência nominal .....	90
9.4.	Corrente nominal .....	91
9.5.	Corrente nominal de interrupção de curto-circuito .....	91
9.6.	Breve estudo da corrente de curto-circuito.....	91
9.7.	Corrente de estabelecimento nominal de curto-circuito .....	101
9.8.	Corrente de curta duração admissível .....	102
9.9.	Valor de crista da corrente admissível .....	102
9.10.	Duração nominal admissível do curto-circuito .....	102
9.11.	Sequência nominal de operação.....	102
9.12.	Fator de primeiro polo .....	105
<b>10.</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO SEGUNDO A NORMA ANSI</b> .....	<b>107</b>
10.1.	Tensão máxima nominal.....	107
10.2.	Fator de faixa de tensão – FFT .....	107
10.3.	Retardo permissível no desligamento .....	108
10.4.	Valores nominais de curto-circuito.....	108
10.5.	Corrente nominal de curto-circuito.....	109
10.6.	Capacidades correlatas .....	109

10.6.1.	Capacidade de interrupção simétrica .....	109
10.6.2.	Capacidade de interrupção assimétrica.....	109
10.6.3.	Capacidades de interrupção de curtos fase-terra .....	109
10.6.4.	Capacidade de fechamento, condução e abertura .....	110
10.6.5.	Capacidade de condução de curta duração.....	110
10.7.	Tensões suportáveis à frequência industrial e a impulsos .....	110
<b>ANEXOS .....</b>		<b>114</b>
<b>ANEXO I – ENSAIOS .....</b>		<b>115</b>
1.	Ensaio de rotina .....	115
2.	Ensaio de tipo.....	115
3.	Ensaio de recebimento .....	116
<b>ANEXO II – MÉTODO DE CÁLCULO DA TTR SEGUNDO IEEE.....</b>		<b>118</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Proposta**

Este trabalho visa atender a necessidade da consolidação do material didático para a disciplina de Equipamentos Elétricos, no que se refere aos disjuntores.

O trabalho busca trazer ao aluno de engenharia elétrica um material com apresentação concisa e, também, facilitar a ação do professor, já que incorpora seus apontamentos de aula.

### **1.2. Motivação**

Este trabalho foi motivado pela necessidade de atualizar o material didático vigente utilizado na disciplina de Equipamentos Elétricos, pelo interesse do professor Jorge Nemésio Sousa em transformar este assunto em um tema para TCC e pelo meu próprio interesse pelo assunto ministrado na disciplina, por já ter trabalhado em uma das empresas líderes mundiais no setor e que buscava a valorização das pessoas e a excelência na qualidade de seus produtos.

A falta de material didático específico apropriado para este assunto no mercado levou à idealização deste TCC.

### **1.3. Objetivo do estudo**

O objetivo do presente trabalho é a consolidação do material didático que auxilie na preparação de futuros engenheiros eletricitas de modo a fornecer aos estudantes meios suficientes para compreender o funcionamento deste tipo de equipamento e determinar o disjuntor adequado para cada tipo de instalação.

Para tanto, além de serem fornecidos todos os valores normatizados e os meios para calculá-los com o objetivo de especificar um disjuntor, são abordadas também as diferentes etapas para que seja realizado o corte de uma corrente alternada e as dificuldades enfrentadas pelo equipamento.

As principais técnicas de interrupção de arco para os diferentes tipos de disjuntores, bem como suas características construtivas, são tratadas nos seus pormenores, fornecendo ao estudante meios para que se compreenda a complexidade da concepção de um equipamento dessa natureza.

#### **1.4. Relevância do estudo**

A idéia básica por trás da disciplina de Equipamentos Elétricos é que os alunos compreendam bem os detalhes dos diferentes equipamentos estudados e vistos ao longo de toda a sua formação. Os futuros engenheiros devem estar preparados para o dinamismo do mercado de trabalho e compreenderem não apenas como funcionam os equipamentos, máquinas e circuitos, mas também sobre as dificuldades para a concepção de cada um desses elementos.

#### **1.5. Limitações do estudo**

O tema abordado neste trabalho é de extrema complexidade, até mesmo para os profissionais mais experientes da área. A quantidade de material disponível é imensurável e está em constante atualização, para incorporar as novas tecnologias aplicáveis e incluir novas abordagens sobre o assunto.

A documentação é tão vasta, que cada um dos capítulos apresentados neste trabalho poderia ser estendido para a elaboração de um TCC específico sobre o tema em questão. Pela impossibilidade de se abordar todos os pontos relevantes, o presente trabalho tem como principal foco a abordagem de disjuntores de alta e média tensão.

Particularmente, os anexos sobre os ensaios e sobre a TTR, apresentados ao fim deste trabalho, são temas complementares e objetos de estudo de outras disciplinas. Tal abordagem feita aqui é superficial, motivada somente pela importância dos assuntos para o caso dos disjuntores.

#### **1.6. Organização do estudo**

O trabalho está organizado em 11 capítulos e 2 anexos, compostos da seguinte maneira:

**Capítulo 1 – Introdução:** apresenta os aspectos gerais dos assuntos contemplados no estudo, introduzindo a proposta, a motivação, as considerações iniciais, o objetivo, a relevância e as limitações do estudo.

**Capítulo 2 – Referencial Teórico:** aponta as principais fontes consultadas para a revisão bibliográfica da literatura disponível, que serviu como embasamento do estudo.

**Capítulo 3 – Metodologia da Pesquisa:** descreve as etapas de elaboração do estudo, fundamenta e descreve a metodologia utilizada na pesquisa,

classificando-a segundo sua natureza, objetivos, e procedimentos técnicos, especificando o que foi realizado para a sua elaboração.

**Capítulo 4 – Conceitos Básicos:** introduz o estudante nos primeiros conceitos sobre o assunto. É apresentada uma introdução a todos os tipos de disjuntores, juntamente com uma definição, as normas aplicáveis, principais funções e principais componentes para o caso de disjuntores de alta e média tensão.

**Capítulo 5 – Características Construtivas dos Disjuntores:** são abordados os aspectos construtivos dos diversos tipos de tecnologia empregados, incluindo particularidades. São apresentadas, ainda, suas principais características com relação à operação.

**Capítulo 6 – Circuitos de Controle:** é feita uma análise das características essenciais dos circuitos de controle aplicáveis a este tipo de equipamento. As diferentes funções são apresentadas e introduzidas uma a uma para facilitar a compreensão.

**Capítulo 7 – A Tensão Transitória de Restabelecimento (TTR):** são apresentados ao estudante os diferentes aspectos deste fenômeno tão importante na concepção de disjuntores. É feita uma análise sobre ele, com seus principais fatores de influência e possíveis formas de modelagem. Por fim, uma breve explicação sobre o defeito quilométrico e seu reflexo na TTR também é exposta.

**Capítulo 8 – O Arco Elétrico:** descreve de maneira didática aspectos sobre a formação e extinção do arco elétrico no interior da câmara de extinção. Em seguida, é feita uma análise das técnicas de interrupção empregadas em cada uma das principais tecnologias de disjuntores conhecidas.

**Capítulo 9 – Especificação Segundo as Normas IEC/ABNT:** é apresentado um resumo das características definidas pelas normas IEC e ABNT para especificação de disjuntores.

**Capítulo 10 – Especificação Segundo a Norma ANSI:** idem ao capítulo anterior, mas aplicável para a norma ANSI.

**Capítulo 11 – Conclusão:** apresenta uma análise conclusiva a respeito do trabalho desenvolvido e comentários a ele relacionados.

**Anexo I – Ensaio:** embora ensaios em equipamentos não estejam no escopo da disciplina, sendo assunto complementar estudado na cadeira de Manutenção de Equipamentos Elétricos, são relacionados os principais ensaios a

serem realizados tanto para a manutenção quanto para a validação de um projeto e entrega de um disjuntor pelo fornecedor.

**Anexo II – Método de cálculo da TTR segundo IEEE:** é apresentado o método de cálculo recomendado pelo IEEE para a determinação da TTR.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente trabalho foi elaborado com o objetivo de consolidar em um só volume todas as informações contidas nos materiais pesquisados e que fossem relevantes para o assunto disjuntor da disciplina de Equipamentos Elétricos. O material didático anteriormente utilizado nesta disciplina se encontrava obsoleto e carecia de uma reformulação. O texto segue as normas de elaboração de trabalhos acadêmicos da ABNT.

O trabalho foi elaborado tomando como base a abordagem feita no material didático que vinha sendo utilizado na disciplina. A partir das fontes disponíveis na literatura sobre o assunto e outros documentos a ele referentes, o material foi enriquecido e expandido até que tomasse a forma aqui apresentada.

A sequência em que os capítulos foram organizados foi alterada de forma a facilitar a didática, sempre respeitando a ordem lógica em que o professor apresenta os diferentes pontos do tema. Para completar, novas imagens foram incorporadas ao trabalho para melhorar ilustrar certos assuntos e proporcionar diferentes meios de abordagem.

A quantidade de material disponível sobre o assunto é imensa e é constantemente atualizada. À medida que novas tecnologias passam a ser exploradas e novas técnicas de abordagem são incorporadas, faz-se necessário rever a documentação disponível no mercado. O objetivo deste trabalho foi de fornecer aos estudantes os meios necessários para a compreensão do assunto e capacitá-los no momento de analisar e especificar um disjuntor para uma instalação elétrica.

Com relação às técnicas de interrupção, o trabalho apresenta as mais importantes neste tipo de aplicação. Algumas delas já são desusadas, no entanto, julgou-se necessário sua abordagem neste trabalho para que técnicas mais avançadas fossem mais facilmente compreendidas ou pela sua importância quando do seu surgimento.

A maior dificuldade para a elaboração deste trabalho foi na delimitação do estudo. Ao mesmo tempo em que a documentação sobre o assunto é bastante ampla, não é muito fácil encontrar no mercado uma publicação voltada especificamente para este fim. Em alguns pontos procurou-se fazer uma abordagem bastante didática, incluindo exemplos para facilitar a compreensão do estudante. Por

vezes, este tipo de abordagem pode parecer repetitivo, mas julgou-se preferível favorecer a didática, mesmo comprometendo a fluidez do estudo em alguns pontos.

O trabalho, de uma maneira geral, é dividido em partes concomitantemente independentes e interdependentes, pois ao mesmo tempo em que cada uma contempla um assunto, umas servem de base para outras, e ainda, alguns tópicos se reafirmam em outras partes.

### **3. METODOLOGIA DA PESQUISA**

#### **3.1. Introdução**

No presente capítulo é apresentada a metodologia de pesquisa implementada na elaboração do estudo. Além disso, uma classificação da pesquisa quanto aos fins e aos meios de investigação será também exposta.

A divisão das etapas se deu da seguinte forma:

- 1- Escolha do tema
- 2- Definição do objetivo do estudo
- 3- Revisão bibliográfica
- 4- Metodologia
- 5- Redação e elaboração do trabalho
- 6- Conclusão

#### **3.2. Etapas da Pesquisa**

A primeira etapa do estudo consistiu na escolha do tema a ser explorado.

Em seguida, definiu-se o objetivo do estudo.

A terceira fase deste processo foi a revisão bibliográfica, em que foram reunidos os materiais utilizados como fonte para sua realização. Cada uma dessas fontes é citada ao final do presente trabalho na seção Referências Bibliográficas.

A quarta etapa, a metodologia implementada do estudo, é desenvolvida ao longo deste mesmo capítulo.

O trabalho que se estende do Capítulo 4 ao Capítulo 10 consiste na quinta fase do projeto, a redação e elaboração.

Finalmente, no Capítulo 11 é apresentada a última etapa, a conclusão do estudo desenvolvido.

#### **3.3. Definição de Pesquisa**

Antes que se dê início à explicação sobre a metodologia de pesquisa adotada, é importante esclarecer o que se entende por pesquisa, pois existem várias formas de definição.

Segundo SANTOS (apud SOARES, 2008), por exemplo, o ato de pesquisar é “o exercício intencional da pura atividade intelectual, visando melhorar as condições práticas da existência”.

No fundo, o sentido de pesquisar pode ser explicado como um processo sistemático em que se geram novos conhecimentos ou se corroboram conhecimentos pré-existentes. Nessa busca emprega-se o conhecimento próprio, bem como métodos científicos.

### 3.4. Classificação e Tipos de Pesquisa

Uma pesquisa pode, ainda, ser classificada de acordo com vários critérios. Entre as formas mais comuns de classificação, pode-se mencionar quanto à natureza, aos objetivos, à finalidade e aos meios.

Segundo SILVA E MENEZES (apud OLIVEIRA, 2008), quanto à natureza, uma pesquisa pode ser classificada como **básica** ou **aplicada**.

- **Pesquisa básica** – o conhecimento gerado é útil para o avanço da ciência, no entanto, não possui aplicação prática prevista.
- **Pesquisa aplicada**- o conhecimento gerado possui aplicações práticas e são dirigidos à solução de um problema.

Já do ponto de vista dos objetivos, GIL (apud OLIVEIRA, 2008) classifica as pesquisas como **exploratória**, **descritiva** ou **explicativa**.

- **Pesquisa exploratória** – se concentra em proporcionar maior familiaridade com o problema, visando torná-lo explícito. Além de levantamento bibliográfico, pode envolver entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimulem a compreensão. Assume, em geral, as formas de Pesquisas Bibliográficas e Estudos de Caso.
- **Pesquisa descritiva** – visa descrever as características de determinada população ou fenômeno. Pode envolver o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, ou seja, questionário e observação sistemática. Assume, em geral, a forma de Levantamento.
- **Pesquisa explicativa** – tem o propósito de identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos. Aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão das coisas. Assume, em geral, as formas de pesquisa Experimental e *Ex Post Facto*.

Finalmente, com relação aos meios de investigação, ou, segundo GIL (apud OLIVEIRA, 2008), aos procedimentos técnicos de coleta, a pesquisa pode ser do tipo **bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, ex post facto, pesquisa ação e participante.**

- **Pesquisa Bibliográfica** – quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na Internet.
- **Pesquisa Documental** – quando elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico.
- **Pesquisa Experimental** – quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.
- **Levantamento** – quando a pesquisa envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.
- **Estudo de caso** – quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.
- **Pesquisa *ex-post-facto*** – quando o “experimento” se realiza depois dos fatos.
- **Pesquisa Ação** – quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.
- **Pesquisa Participante** – quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas.

Portanto, o presente trabalho constitui uma pesquisa que pode ser classificada como **aplicada**, quanto à natureza; **descritiva**, quanto ao objetivo; **bibliográfica e documental**, quanto aos procedimentos técnicos de coleta.

## 4. CONCEITOS BÁSICOS

### 4.1. Definição

Disjuntores são equipamentos de manobra cujo objetivo é de estabelecer, conduzir, interromper e suportar correntes elétricas sob sua tensão máxima de rede nas condições normais de serviço (por exemplo, para conectar ou desligar uma linha em uma rede elétrica) e nas condições anormais especificadas (em especial para eliminar um curto-circuito ou as consequências de um raio). Esses dispositivos eletromecânicos são essenciais em qualquer sistema elétrico, seja uma simples instalação residencial ou um sistema de grande porte como subestações e redes de transmissão.

Os disjuntores devem sempre ser instalados associados aos relés específicos para o projeto em questão, que são os responsáveis pelo seu acionamento na ocorrência de correntes elétricas acima do permitido. Disjuntores não acompanhados destes relés tornam-se simples chaves de manobra, sem características de proteção.

Certas características são comuns a todos os tipos de disjuntores, independentemente das classes de corrente e tensão para as quais foram projetados, embora os detalhes variem significativamente de acordo com essas classificações.

Primeiramente, o disjuntor deve ser capaz de detectar uma condição de falha no sistema. Nos equipamentos de baixa tensão, geralmente isto é realizado no interior da própria câmara de extinção. Já os disjuntores para grandes correntes e tensões são equipados com dispositivos piloto com sensibilidade para detectar uma situação de falta e operar o mecanismo de abertura do equipamento.

Ao ser detectada a falha, os contatos devem ser abertos utilizando alguma forma de energia mecânica armazenada no equipamento (pela ação de molas, por exemplo). Em alguns casos, a energia necessária pode ser obtida a partir da própria corrente de falta. Pequenos disjuntores podem ser operados manualmente, enquanto unidades maiores são equipadas com solenóides para disparar o mecanismo.

Os contatos podem ser manufaturados em cobre ou ligas de cobre, ligas de prata ou materiais altamente condutores. Sua vida útil é limitada pela erosão do material devido ao arco elétrico que se forma ao se interromper uma corrente.

Disjuntores de pequeno porte são descartados quando seus contatos estão gastos, mas disjuntores projetados para tensões superiores podem ter seus contatos substituídos.

#### **4.2. Normas Aplicáveis**

- ABNT NBR IEC 62271-100:2006 - Equipamentos de alta tensão.
- ABNT NBR NM 60898:2004 - Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares.
- ABNT NBR IEC 60947-2:1998 Errata 1:1999 - Dispositivos de manobra e comando de baixa tensão.
- ABNT NBR IEC 60694:2002 - Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando.
- IEC 56-1 – Generalidades e definições.
- IEC 56-2 – Características nominais.
- IEC 56-3 – Projeto e construção.
- IEC 56-4 – Ensaio de tipo e rotina.
- IEC 56-5 – Regras para seleção de disjuntores.
- IEC 56-6 – Informações a serem dadas em especificações; Regras para transporte, instalação e manutenção.
- IEC 694 – Cláusulas comuns para as normas de equipamentos de manobra de alta tensão.
- ANSI Série C37

#### **4.3. Principais funções de um disjuntor**

- 1- Interromper rápida e sucessivamente a corrente na ocorrência de um curto-circuito ( $I_{cc}$ ), limitando, desta forma, os danos causados aos equipamentos que compõem o sistema;
- 2- Ser capaz de interromper, estabelecer e conduzir por longos espaços de tempo não somente as correntes nominais de carga dos circuitos, mas também as correntes de magnetização de transformadores, de reatores e as correntes capacitivas de banco de capacitores e de linhas em vazio;

- 3- Permitir o fechamento de um circuito elétrico tanto em condições normais de carga quanto em curto-circuito imediatamente após abertura para eliminar o defeito (*trip free*);
- 4- Suportar a tensão do circuito em que está instalado com os contatos abertos;
- 5- Realizar o movimento de abertura em um intervalo tão curto quanto 2 ciclos ainda que tenha permanecido por um período de vários meses na posição fechado;
- 6- Suportar tanto os efeitos do arco elétrico quanto os efeitos eletromagnéticos e mecânicos devido ao primeiro ciclo da  $I_{cc}$ , além dos efeitos térmicos da corrente estabelecida na posição fechada (corrente suportável nominal de curta duração);
- 7- Na posição fechada, apresentar impedância desprezível para ser capaz de interromper a corrente especificada em qualquer instante e sem causar sobretensões elevadas;
- 8- Na posição aberta, apresentar impedância infinita para ser capaz de fechar em qualquer instante sem causar dano aos contatos, inclusive sob curto-circuito.

#### **4.4. Principais componentes**

Muitas são as partes que integram um disjuntor, cada uma devidamente projetada e com uma função específica para o bom funcionamento do equipamento. A Figura 1 ilustra a câmara de extinção de arco de um disjuntor. A seguir, uma breve descrição de alguns dos principais componentes de qualquer tipo de disjuntor será apresentada.

- 1- Contatos permanentes
- 2- Contatos de arco
- 3- Capa de proteção dos contatos de arco
- 4- Porcelana envoltória

Existem dois tipos diferentes de contato no interior de um disjuntor. O primeiro são os contatos permanentes, também chamados de paralelos. Em condições normais, quando o disjuntor está na posição fechada, estes são os contatos por onde a corrente elétrica flui. O outro tipo de contato são os contatos de arco ou principais, constituídos por uma parte móvel (tulipa) e outra fixa (pino). O pino pode

também ser do tipo semimóvel, no caso de disjuntores com sistema de abertura a duplo movimento. Em disjuntores projetados para trabalhar com corrente e tensão mais reduzidos, os contatos paralelos muitas vezes não estão presentes, fazendo com que na posição fechado o contato elétrico seja feito também pelos contatos principais.

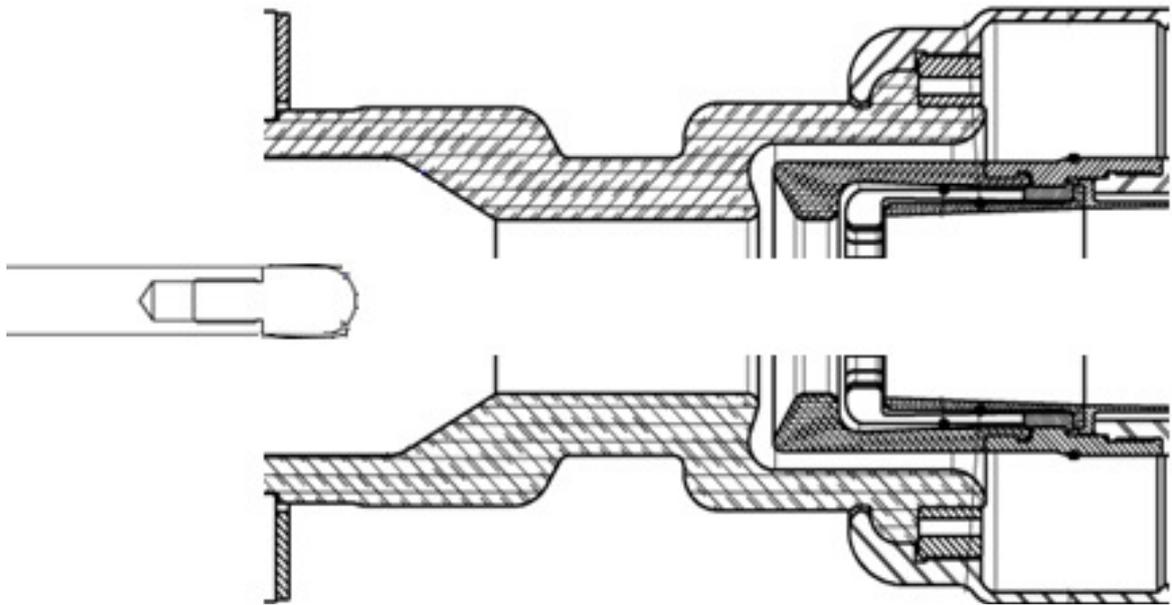


Figura 1 – Câmara de extinção de arco [8]

A tulipa é uma peça metálica, em formato cilíndrico e seccionada em diversos dedos de contato. Um dos motivos pelo qual esta peça não é fabricada de forma totalmente inteiriça é fornecer a ela uma pequena liberdade de movimento radial, o que permite que se abra levemente quando pressionada contra o pino para que se fixe de forma mais segura neste segundo componente, quando o disjuntor se encontra na posição fechado. Além disso, no caso de disjuntores a SF6, a óleo ou a ar comprimido, a abertura entre os dedos de contato constitui também um canal de escapamento para reduzir a pressão no interior da tulipa durante a ocorrência do arco elétrico.

O outro contato de arco, o pino, é uma haste metálica que, em diversos casos, contém uma pequena depressão em sua ponta para melhor fixação com a tulipa. Ambos os contatos devem ser devidamente projetados e fabricados para operar sob altíssimas temperaturas e resistir a altos níveis de erosão devido ao arco elétrico.



Figura 2 – Tulipa de um disjuntor de alta tensão [8]

A tulipa, diferentemente do pino, conta ainda com uma capa de proteção contra as elevadas temperaturas e à erosão ocasionada devido aos efeitos do arco. Esta capa de proteção, normalmente, é fabricada em material a base de teflon que permite suportar o calor na câmara de extinção. Em muitos casos, são acrescentadas ainda cargas suplementares (como  $\text{CaF}_2$  – fluoreto de cálcio, e  $\text{MoS}_2$  – sulfeto de molibdênio) para auxiliar na criação de uma vaporização, que irá gerar uma elevação da pressão no interior do equipamento para auxiliar na extinção do arco elétrico.

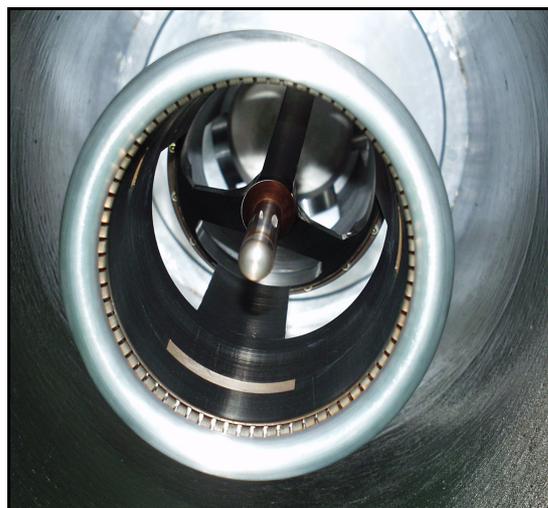


Figura 3 – Pino de um disjuntor de alta tensão [8]

Outro componente importante dos disjuntores é a porcelana que envolve o equipamento. Esta peça tem como objetivo protegê-lo no caso de uma descarga superficial e é constituída com um formato ondulado para alongar o caminho da corrente e aumentar a resistência na ocorrência desse fenômeno.

#### **4.5. Princípio de funcionamento**

Ao detectar um curto, ou qualquer outro tipo de falta no sistema, será emitido, a partir do circuito de controle do disjuntor, um comando para que sejam abertos seus contatos, seja eliminado o defeito, e protegida a integridade dos componentes do sistema. Um comando de abertura também pode ser emitido pelo operador sem que tenha ocorrido qualquer tipo de defeito, no caso de manutenção programada, por exemplo.

A partir deste comando, inicia-se o movimento de abertura do equipamento. Inicialmente, separam-se os contatos permanentes e a corrente passa a circular, então, através dos contatos principais. Com a continuação do movimento, quando estes contatos também não se tocam mais, devido à diferença de potencial entre o pino (energizado na tensão da rede) e a tulipa (não energizada), o arco elétrico se estabelece nesse mesmo local.

O princípio de corte da corrente elétrica realizado por um disjuntor é feito pela separação dos contatos elétricos imersos em um meio isolante qualquer. Enquanto o arco elétrico ainda existir, após a separação física dos contatos, a corrente continuará circulando através do equipamento. O objetivo é, portanto, alongar suficientemente o arco dentro do reduzido espaço no interior da câmara de extinção de arco do disjuntor a fim de incentivar seu resfriamento, sua extinção e, em seguida, suportar a tensão da rede.

O sucesso da interrupção da corrente devido à abertura do disjuntor depende do êxito do equipamento nas 'corridas' energética (liberação x absorção de energia) e dielétrica (tensão de restabelecimento x suportabilidade dielétrica), além da velocidade de abertura dos contatos.

Disjuntores podem ser projetados para operar em mais diferentes ambientes. Muitas vezes se encontram em condições ambientais muito severas, estando sujeitos a toda sorte de intempérie como umidade, poeira, chuva e variações bruscas de temperatura. Portanto, devem ser devidamente projetados para que suportem todos os tipos de circunstâncias previstas e, mesmo sob essas condições,

somado aos longos períodos de tempo sem serem acionados, devem se mostrar capazes de atender às cláusulas de operação no momento em que forem requisitados.

## 5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS DISJUNTORES

Antes de analisarmos as técnicas de interrupção de arco dos diversos tipos de tecnologia empregados nos disjuntores, conforme será visto no capítulo 8, trataremos nesta parte das características construtivas utilizadas em cada um desses equipamentos, incluindo particularidades de cada tecnologia, para que alcancem o nível de performance desejado. Neste capítulo serão apresentadas também as principais características dos disjuntores com relação à operação, como capacidade de interrupção e frequência de manutenção necessária.

### 5.1. Disjuntores GVO – Grande Volume de Óleo

Os disjuntores do tipo GVO, que utilizam óleo mineral isolante para extinção do arco, são dotados de um grande tanque metálico onde é armazenado o óleo mineral. Este tanque é mantido no potencial da terra e no seu interior são imersos os contatos principais, a câmara de extinção e parte do mecanismo de acionamento dos contatos móveis. Este tipo de tecnologia é utilizado em redes de média e alta tensão (até 230kV) e tem como característica principal uma grande capacidade de interrupção em curto-circuito.

No caso das aplicações em alta tensão, cada polo deste tipo de disjuntor possui uma unidade individual. Os três polos são, então, conectados mecanicamente através do mecanismo de acionamento dos contatos móveis, que é responsável pelo acionamento simultâneo dos três polos nas operações de abertura e fechamento. Além disso, cada polo é dotado de uma câmara com duas buchas condensivas de saída na sua parte superior e duas câmaras de interrupção suspensas presas na parte inferior de cada bucha de saída. Os contatos móveis são montados em um elemento igualmente móvel que faz a ligação entre as duas câmaras de interrupção. Caso necessário, o equipamento pode ser dotado ainda de transformadores de corrente, que são instalados na parte inferior das buchas.

A grande desvantagem deste tipo de disjuntor é a necessária manutenção constante. Devido à carbonização do óleo nas operações de interrupção de corrente, o equipamento requer a filtragem do óleo frequentemente.

A seguir encontram-se as principais características dos disjuntores que utilizam este tipo de tecnologia, seguido da Figura 4 com as partes que constituem um equipamento dessa natureza.

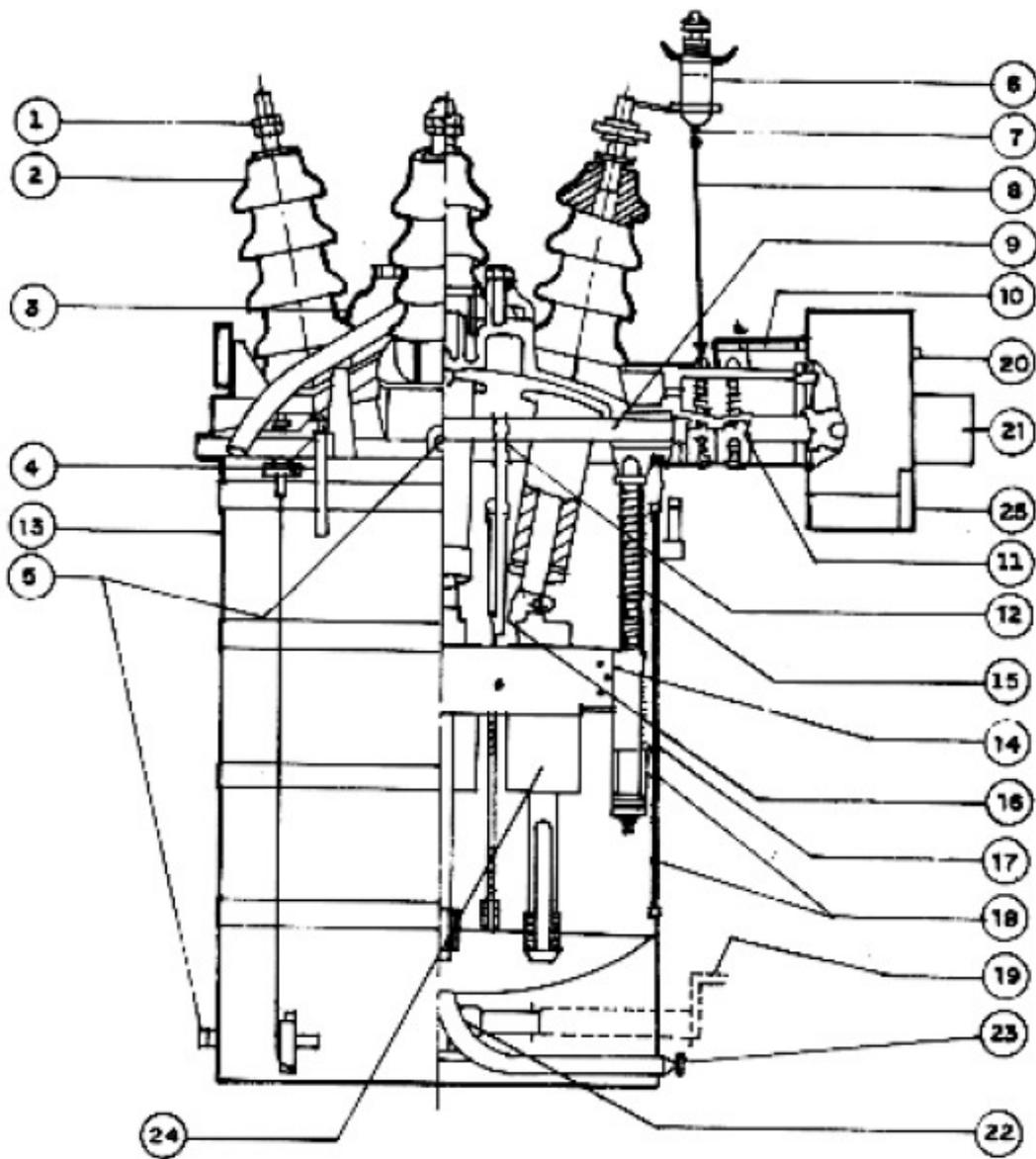


Figura 4 – Disjuntor a grande volume de óleo [10]

Da figura, temos as seguintes partes:

- |                                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1-Porcas de borne                    | 2-Isolador passante         |
| 3-Válvula de descarga de gás         | 4-Fixação do tanque         |
| 5-Parafuso de terra                  | 6-Relés de máxima corrente  |
| 7-Borne condutor                     | 8-Haste isolante            |
| 9-Tampa auxiliar                     | 10-Eixo de comando de relés |
| 11-Molas de impulso                  | 12-Alavanca de alimentação  |
| 13-Tanque de aço pintado e reforçado | 14-Travessa de equipagem    |
| 15-Amortecedores hidráulicos         | 16-Bielas de movimentação   |

17-Haste guia	18-Revestimento isolante
19-Manivela removível	20-Desarme manual
21-Ogiva da caixa de comando	22-Mecanismo de movimentação
23-Tampão de dreno	24-Câmara de ruptura
25-Caixa de comando	

Principais características:

- Alta potência de interrupção: 20.000 MVA;
- Utilização em nível de tensão de até 230 kV;
- Razoável necessidade de manutenção;
- Possibilidade de uso de transformadores de corrente de bucha;
- Tempo de interrupção: 3 a 5 ciclos;
- Volume: 2.000 litros;
- Função do óleo: isolamento, extinção do arco e resfriamento.

## **5.2. Disjuntores PVO – Pequeno Volume de Óleo**

Os disjuntores a pequeno volume de óleo isolante representam uma evolução direta dos GVO. O avanço da tecnologia, no que diz respeito à utilização do fluxo forçado de óleo sobre o arco, permitiu o aumento da eficiência no processo de extinção e a diminuição considerável do volume de óleo empregado.

Neste tipo de disjuntor, o óleo é armazenado em volumes reduzidos e mantidos sob um nível de pressão que pode variar de 4 a 5 bar, por meio de injeção de ar ou nitrogênio. Essa característica reduz na mesma proporção o volume de gases produzidos no processo de interrupção, o que confere um aumento da resistência dielétrica após a extinção do arco elétrico.

Com relação ao disjuntor tipo GVO, a principal vantagem que o PVO apresenta, obviamente, é com relação à quantidade de óleo necessária para operar. Em uma mesma classe de tensão, o disjuntor tipo PVO requer cerca de 10% a 20% do volume de óleo de um disjuntor tipo GVO. Outra importante vantagem deste disjuntor é o fato de o isolamento para a terra não ser feito pelo óleo contido na câmara de interrupção. Neste caso, é realizado por isoladores de porcelana, que podem estar cheios ou não de óleo isolante.

Disjuntores PVO podem operar em todas as classes de tensão. Em média tensão, eles cobrem praticamente todo o conjunto de capacidades de ruptura a 63

kA. Já a níveis superiores, a capacidade de interrupção pode estar limitada a certo nível de corrente. Faz-se, então, necessário o emprego de várias câmaras em série para atingir a capacidade de interrupção desejada. Nestes casos, é obrigatório o uso de capacitores de equalização e acionamento mais potente, o que aumenta tanto o uso quanto a complexidade do equipamento.

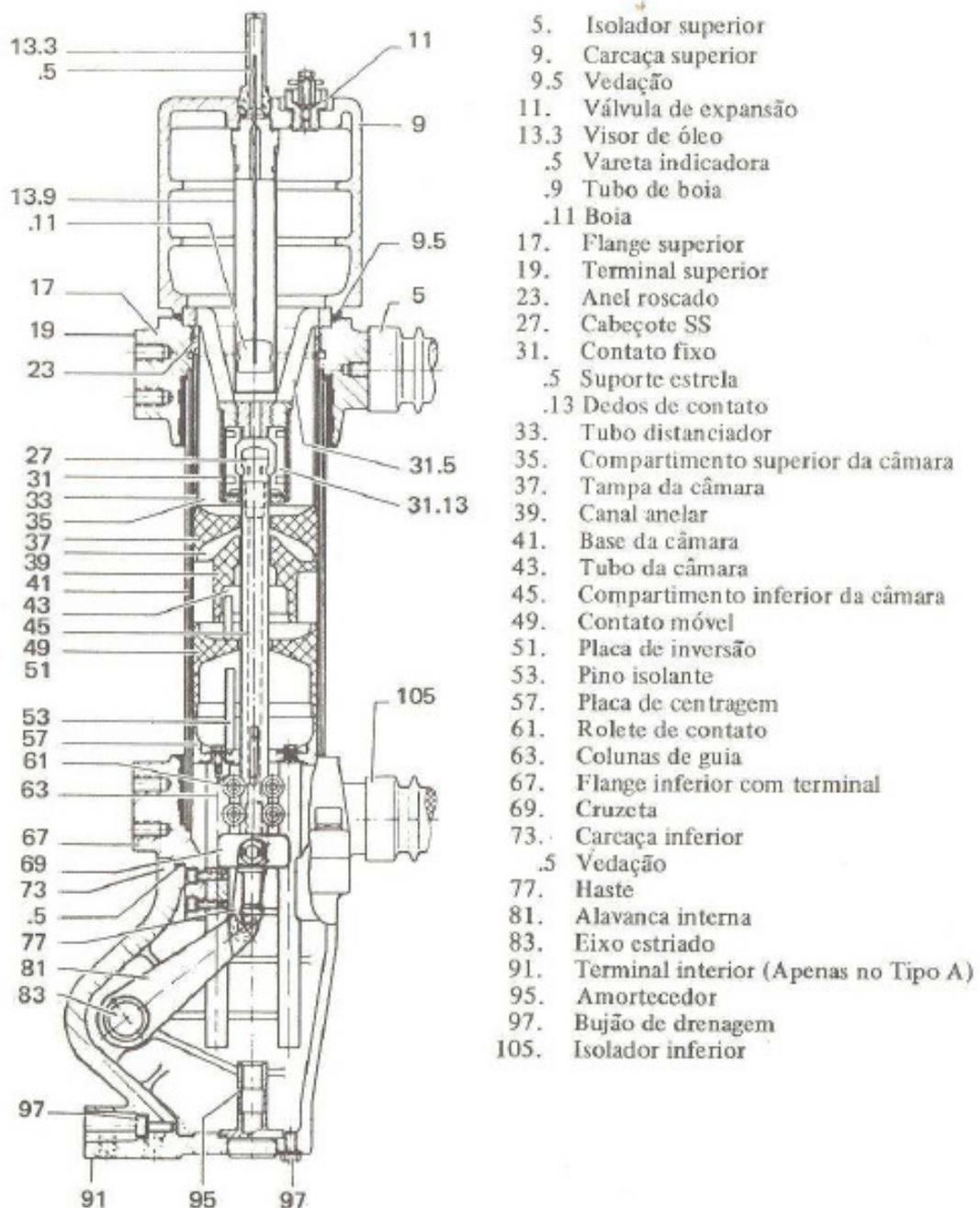


Figura 5 – Disjuntor a pequeno volume de óleo [11]

Por exemplo, a um nível de tensão de 138 kV, a capacidade de interrupção é limitada a 20 kA. Portanto, deve-se utilizar a técnica descrita anteriormente caso se

deseje instalar o disjuntor em redes cuja corrente de curto-circuito seja superior a este valor (31,5; 40 e 50 kA), que são comuns neste nível de tensão.

A desvantagem do disjuntor tipo PVO se dá por conta da limitação por câmara a uma tensão máxima de 60 a 65 kV em operações de manobra de banco de capacitores e linhas a vazio. Portanto, para que se assegure o não reacendimento em operações de abertura desta natureza pode ser necessário o emprego de várias câmaras em série, dependendo das características do disjuntor.

A seguir encontram-se as principais características dos equipamentos que utilizam este tipo de tecnologia, e na Figura 5 observam-se as partes que constituem um equipamento deste tipo projetado para operação em média tensão.

- Potência de interrupção: 22.000 MVA com 20.000 A em 120 kV;
- Utilização em nível de tensão de até 420 kV;
- Necessidade de manutenção frequente;
- Volume: de 40 a 200 litros;
- Função do óleo: extinção do arco e resfriamento.

Para efeito de comparação entre os disjuntores dos tipos GVO e PVO, Tabela 1 mostra suas vantagens e desvantagens comparativas.

Tabela 1 – Comparação entre disjuntores GVO e PVO [10]

Disjuntor a grande volume de óleo		Disjuntor a pequeno volume de óleo	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Grande capacidade de interrupção em curto-circuito	Grande volume de óleo	Manutenção simples e prática	Não recomendável para uso em sistemas de extra-alta tensão
	Risco de incêndio	Experiência em serviços muito grande	Aumento do número de pontos de corte de polo em função do aumento da tensão
	Manutenção muito dispendiosa	Confiabilidade	

### 5.3. Disjuntores a ar comprimido

Existem dois tipos diferentes de tecnologia utilizados em disjuntores a ar comprimido. O princípio empregado para a extinção, como explicado no capítulo 8, é o mesmo, existindo apenas algumas diferenças em seus aspectos construtivos.

A principal diferença entre as duas técnicas diz respeito somente à forma como são concebidos os contatos, sendo as outras peças empregadas bastante similares. No caso da técnica *mono blast*, apenas um dos contatos é oco. Isso faz com que a saída de ar seja possível somente em uma direção. Já no caso da *duo blast*, ambos os contatos são ocos, o que permite a expansão do arco nas duas direções.

Um fator de extrema importância para o bom funcionamento deste tipo de disjuntor é o suprimento de ar, o meio isolante utilizado. Para que o equipamento possa assegurar uma operação satisfatória e segura, é necessário garantir não somente a pressão em seu interior dentro dos níveis requeridos em projeto, mas também que o ar apresente alto grau de pureza e baixíssima umidade. Para tanto, são instaladas unidades centrais de ar comprimido dotadas de compressores, filtros e desumidificadores.

Para a garantia de todas essas características, o disjuntor deve contar com um sistema de controle capaz de monitorar todos esses fatores, além de requisitar manutenção constante. Caso seja constatado que algum desses requisitos não esteja sendo atendido, o sistema de supervisão pode acionar os bloqueios e alarmes para informar o operador sobre a não conformidade das condições de operação.

Com relação às aplicações, os disjuntores a ar comprimido podem operar em todas as faixas de tensão previstas em normas. No entanto, normalmente são instalados em redes que operam em alta ou extra-alta tensão. Isso se deve ao fato de que apesar da complexidade de concepção e de operação deste tipo de equipamento, a segurança apresentada por utilizar um meio de extinção não inflamável aliada às suas boas propriedades extintoras lhe conferem grandes vantagens para operar nos níveis de tensão mais elevados.

Outra característica de grande relevância com relação à sua concepção diz respeito à construção modular e individual de seus polos. Essa forma de conceber os polos permite alcançar diferentes classes de tensão, com diferentes capacidades de interrupção de corrente a partir da combinação de módulos idênticos. Essa aplicação baseia-se no princípio de interrupção com controle da distribuição de

tensão nas várias câmaras de extinção do polo. O arranjo depende, portanto, da quantidade de cabeças de interrupção suportada por uma coluna isolante.

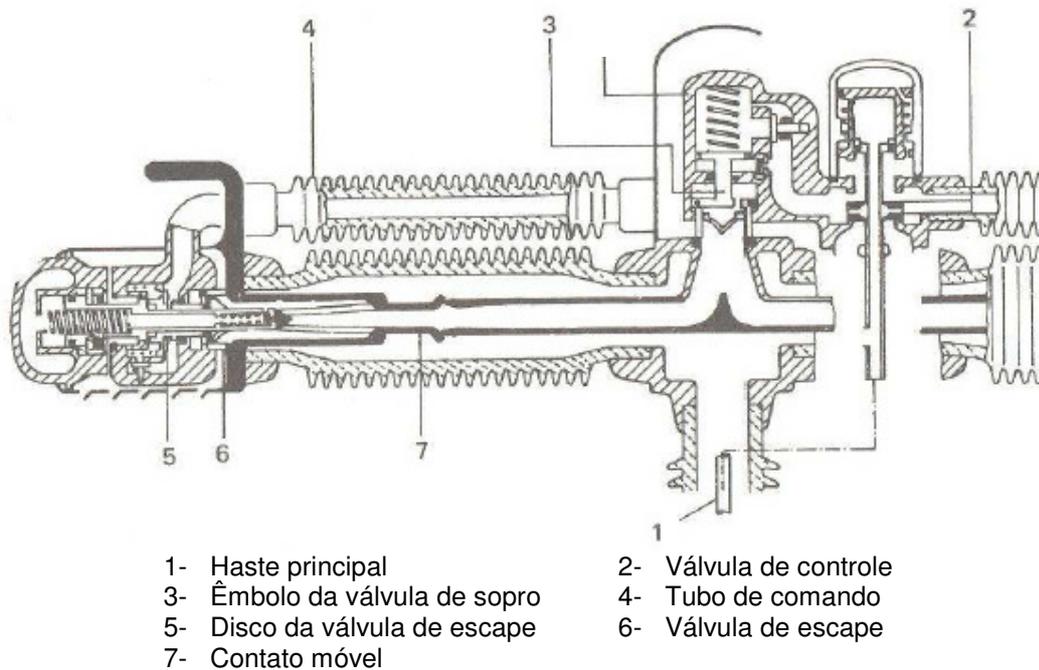


Figura 6 – Disjuntor a ar comprimido [11]

Dentre as vantagens fornecidas pela construção modular pode-se destacar o menor número de isoladores de porcelana necessários, pois a coluna suporta duas ou quatro câmaras, a facilidade de montagem e de obtenção de peças sobressalentes idênticas, além de permitir futuras modificações para aumentar a capacidade de interrupção ou da corrente nominal.

Além das vantagens fornecidas por este tipo de construção, os disjuntores a ar comprimido se sobressaem principalmente pela facilidade de obtenção do meio extintor e pela sua velocidade de operação.

Suas desvantagens gerais são: o alto custo das unidades centrais de ar comprimido (principalmente em pequenas instalações); a grande necessidade de manutenção; o nível de ruído emitido, o que limita sua utilização próximo a áreas residenciais.

As principais características de equipamentos desta natureza encontram-se resumidas abaixo.

- Operação a alta tensão: até 765 kV;
- Alta capacidade de interrupção: até 80 kA;

- Necessidade de fonte externa de ar comprimido;
- Alto nível de ruído;
- Necessidade de resistores de pré-inserção para controle de sobretensão;
- Baixo tempo de interrupção: 1 ciclo;
- Razoável necessidade de manutenção;
- Razoável complexidade de operação.

#### **5.4. Disjuntores a vácuo**

Este tipo de disjuntor tem sua utilização concentrada na faixa de tensão de 2 a 145 kV. Apesar de o vácuo apresentar alta rigidez dielétrica (cerca de 200 kV/cm), a tensão que pode ser aplicada entre seus contatos é limitada, pois essa rigidez pouco cresce conforme se aumenta a distância entre eles.

Existe uma particularidade interessante com relação aos aspectos construtivos deste equipamento. Ao serem interrompidas correntes elevadas, para evitar sobreaquecimento excessivo em alguns pontos do contato, os contatos de arco são projetados de forma que o próprio campo magnético gerado pelo arco provoque a separação destes contatos. Para que se consiga atingir satisfatoriamente essa característica, é necessário um estudo bastante preciso durante a fase de projeto. No entanto, sua obtenção oferece muitas vantagens com relação à operação, como a baixa necessidade de manutenção.

Além de requerer pouquíssima manutenção, com relação à expectativa de vida, este tipo de equipamento também se mostra muito vantajoso. Com o auxílio das curvas características mostradas na Figura 7, que representam o número de manobras suportadas em função da corrente interrompida para um disjuntor tipo PVO e outro a vácuo, pode-se observar melhor esse fato. Ambos os disjuntores representados são para operação a 25 kA e 7,2 kV.

Pode-se observar claramente a enorme diferença entre esses dois equipamentos, por exemplo, para o caso de interrupção da máxima corrente admitida. Enquanto o disjuntor tipo PVO pode operar somente cerca de 4 vezes com uma corrente de 25 kA, o disjuntor a vácuo pode realizar por volta de 100 manobras.

Essa enorme expectativa de vida quando comparada aos outros equipamentos pode ser explicada pela natureza do arco em disjuntores a vácuo. Como o plasma de vapor metálico que serve como meio para propagação do arco

elétrico apresenta alta condutividade, a tensão de arco resultante é extremamente baixa, variando entre 20 e 200 V. Aliado à pequena duração do arco, este fato resulta em uma reduzida energia dispersada no local de extinção, elevando sua expectativa de vida.

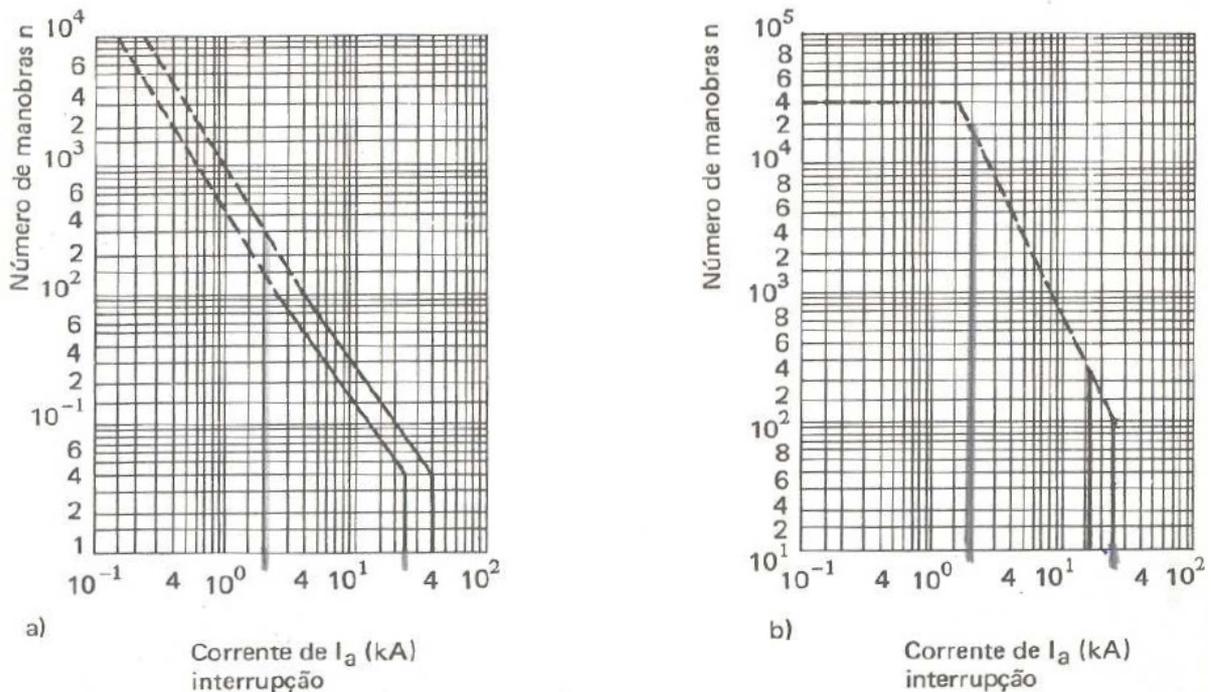


Figura 7 – Número de manobras em função da corrente interrompida para  
a)disjuntor tipo PVO b)disjuntor a vácuo [11]

Os disjuntores a vácuo apresentam ainda outras vantagens. Dentre elas é importante destacar a grande segurança na operação, por não emitir chama e não necessitar de suprimento de gases ou líquidos. A ausência de meio extintor líquido ou gasoso permite ainda fazer religamentos automáticos ou múltiplos.

Em linhas gerais, a câmara de um disjuntor a vácuo é formada por um cilindro cerâmico ou de vidro que fornece resistência mecânica, fechada por placas de uma liga metálica (ferro, níquel e cobalto). Em uma das placas é fixado o contato fixo, enquanto na outra, dotada de um fole metálico, é soldado o contato móvel. Finalmente, duas blindagens metálicas completam a construção, uma envolvendo o fole e outra, o conjunto de contatos. O objetivo desta blindagem é capturar as partículas metálicas quando da extinção do arco para que não se depositem nas paredes do tubo cilíndrico ou do fole. A Figura 8 ilustra uma câmara deste tipo.

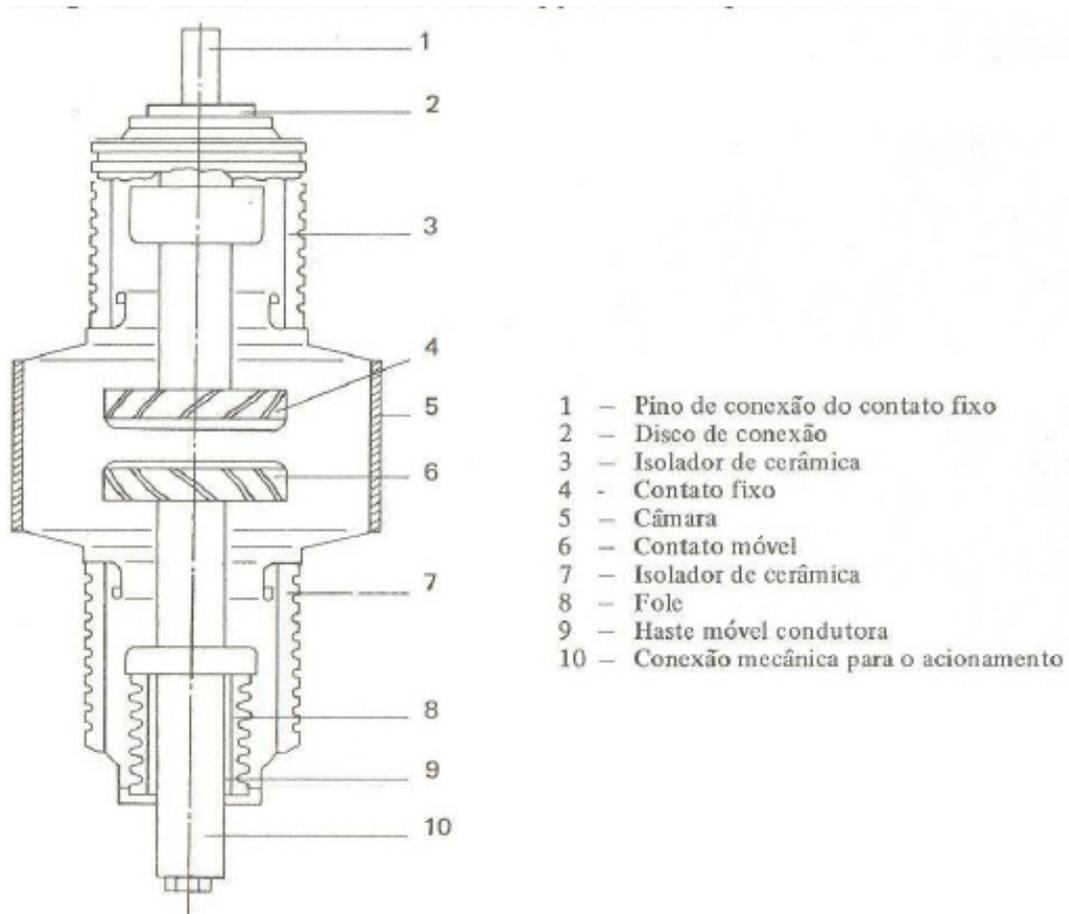


Figura 8 – Câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo [11]

### 5.5. Disjuntores a SF<sub>6</sub>

Disjuntores a SF<sub>6</sub>, hoje em dia, constituem a classe de disjuntores mais utilizada para níveis de tensões mais elevados. Podendo ser instalados para aplicações em redes de até 420 kV ou superiores, desde que contem com o auxílio de resistores de fechamento, sua potência de interrupção pode chegar a até 22.000 MVA com tempo de interrupção de 3 ciclos. No entanto, sua utilização não é viável em aplicações com faixas de tensão mais reduzida devido à relativa complexidade construtiva e, principalmente, por razões econômicas.

Na seção 8.3, em que é abordada a interrupção dos diferentes disjuntores, quando da explicação do funcionamento das várias técnicas de disjuntores a SF<sub>6</sub>, são mencionadas muitas particularidades sobre os aspectos construtivos de cada uma dessas tecnologias. Nesta seção serão abordadas características comuns a todas elas, além de particularidades de algumas técnicas que se façam necessárias.

Este tipo de disjuntor deriva diretamente dos disjuntores que utilizam ar comprimido como meio de extinção. Algumas diferenças, entretanto, são notáveis. No caso dos disjuntores a SF<sub>6</sub>, por exemplo, o gás não pode ser descartado de forma alguma para o meio ambiente. Após a interrupção de uma corrente, o gás deve ser armazenado no interior do equipamento para que se recombine, retornando ao estado inicial, antes que possa ser utilizado novamente para outra operação de extinção de arco.

Para garantir o bom funcionamento deste mecanismo, são necessárias constantes manutenções preventivas no equipamento. Além disso, no caso dos disjuntores a dupla pressão, o equipamento requer a instalação de compressores para a realização do bombeamento e pressurização do gás no interior do reservatório de alta pressão. Esses compressores, além de também demandarem manutenção, podem apresentar baixa confiabilidade e representar um aumento do investimento necessário para a concepção do disjuntor.

Aliado a tudo isso, deve-se atentar para o fato de que o gás em questão se liquefaz a temperatura ambiente quando comprimido, o que requer, neste caso, a instalação de resistores para aquecimento do reservatório de alta pressão, além de filtros e dessecantes. Todos esses fatores representam as principais desvantagens da utilização desta tecnologia em particular.

Os disjuntores a SF<sub>6</sub> que foram desenvolvidos posteriormente procuraram contornar esse tipo de problema. Para tanto passaram a utilizar um tipo de pistão e um cilindro para comprimir gás em seu interior durante o movimento de abertura e atingir a pressão requerida para realizar a extinção do arco sem haver a necessidade de utilizar compressor. Esta modificação atingiu o objetivo proposto e aumentou a confiabilidade do disjuntor, além de diminuir a frequência de manutenção necessária, entretanto a complexidade mecânica do equipamento também foi elevada.

A seguir encontram-se imagens ilustrativas de câmaras de disjuntor a SF<sub>6</sub> que utilizam algumas das diferentes tecnologias apresentadas neste trabalho. Os componentes mais importantes estão devidamente destacados.

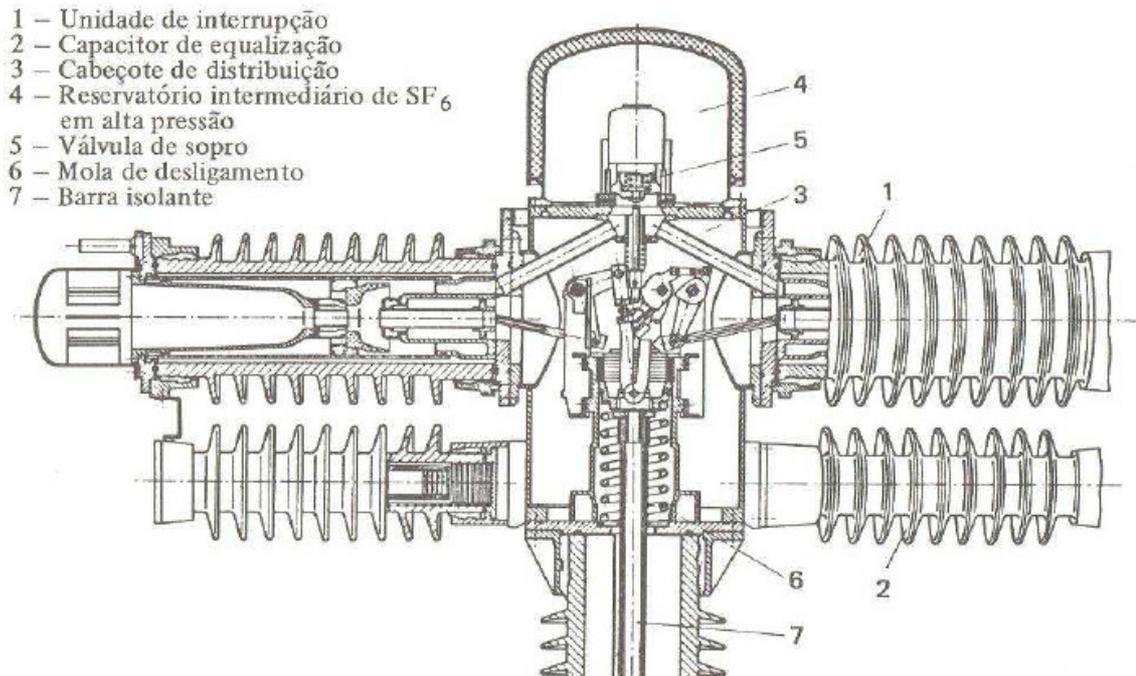


Figura 9 – Disjuntor a SF<sub>6</sub> tipo pressão única [11]

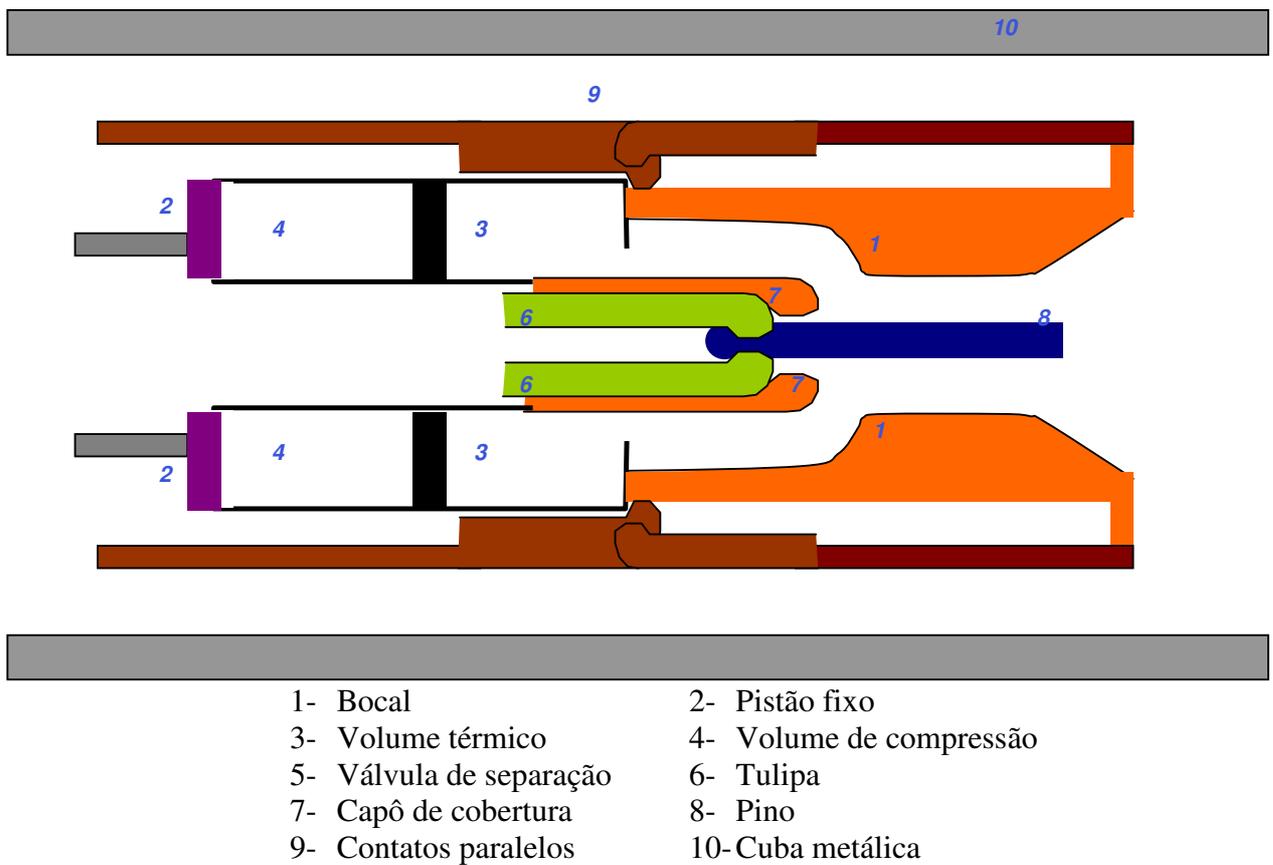
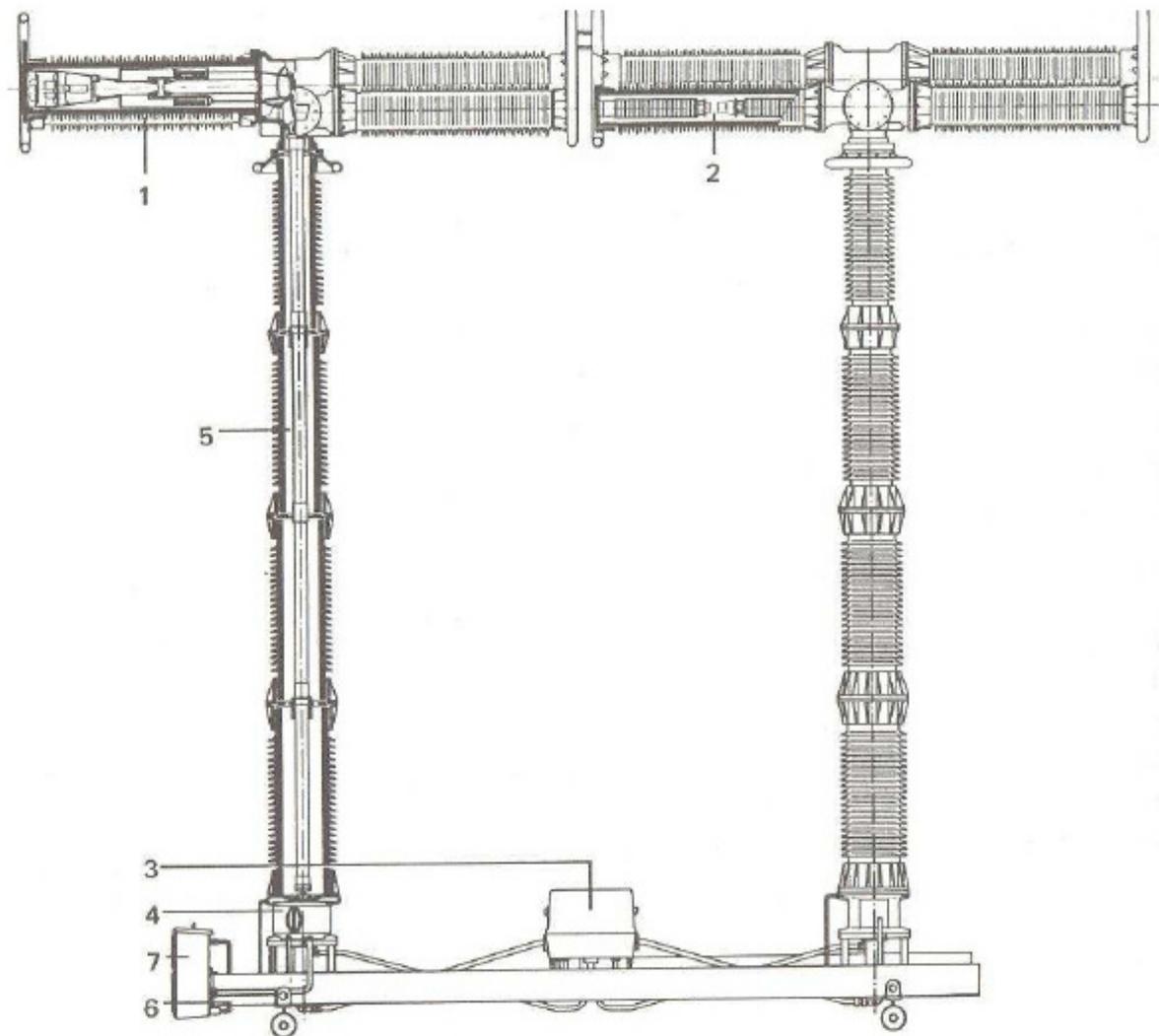


Figura 10 – Modelo de disjuntor a SF<sub>6</sub> tipo *selfblast* [8]



- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| 1 – Unidade interruptora     | 5 – Isoladores suportes |
| 2 – Resistor de pré-inserção | 6 – Base                |
| 3 – Unidade de válvulas      | 7 – Unidade de comando  |
| 4 – Acionamento hidráulico   |                         |

Figura 11 – Disjuntor a SF<sub>6</sub> tipo dois ciclos [11]

### 5.6. Disjuntores a sopro magnético

Disjuntores a sopro magnético são utilizados em redes cuja tensão pode chegar até 24 kV. Com relação aos outros disjuntores, este equipamento apresenta uma técnica de interrupção bastante particular, como o fato de seus contatos se abrirem no ar, o que reflete também em seus aspectos construtivos.

Uma das principais características deste tipo de disjuntor é a alta resistência do arco elétrico. Como neste caso o arco queima no ar e é forçado a se alongar consideravelmente, sua resistência aumenta e, conseqüentemente, aumenta

também a tensão por ele dissipada. Essa alta resistência lhe confere uma grande vantagem, pois, dessa forma, este tipo de equipamento não produz grandes surtos de manobra, uma vez que a resistência do arco interage com o circuito, tornando-o mais resistivo e diminuindo o valor instantâneo da TTR após a interrupção.

Outra vantagem interessante de disjuntores a sopro magnético é o fato de não utilizarem meio extintor inflamável para o corte da corrente. Isso os torna extremamente seguros e lhes permite serem utilizados em aplicações específicas.

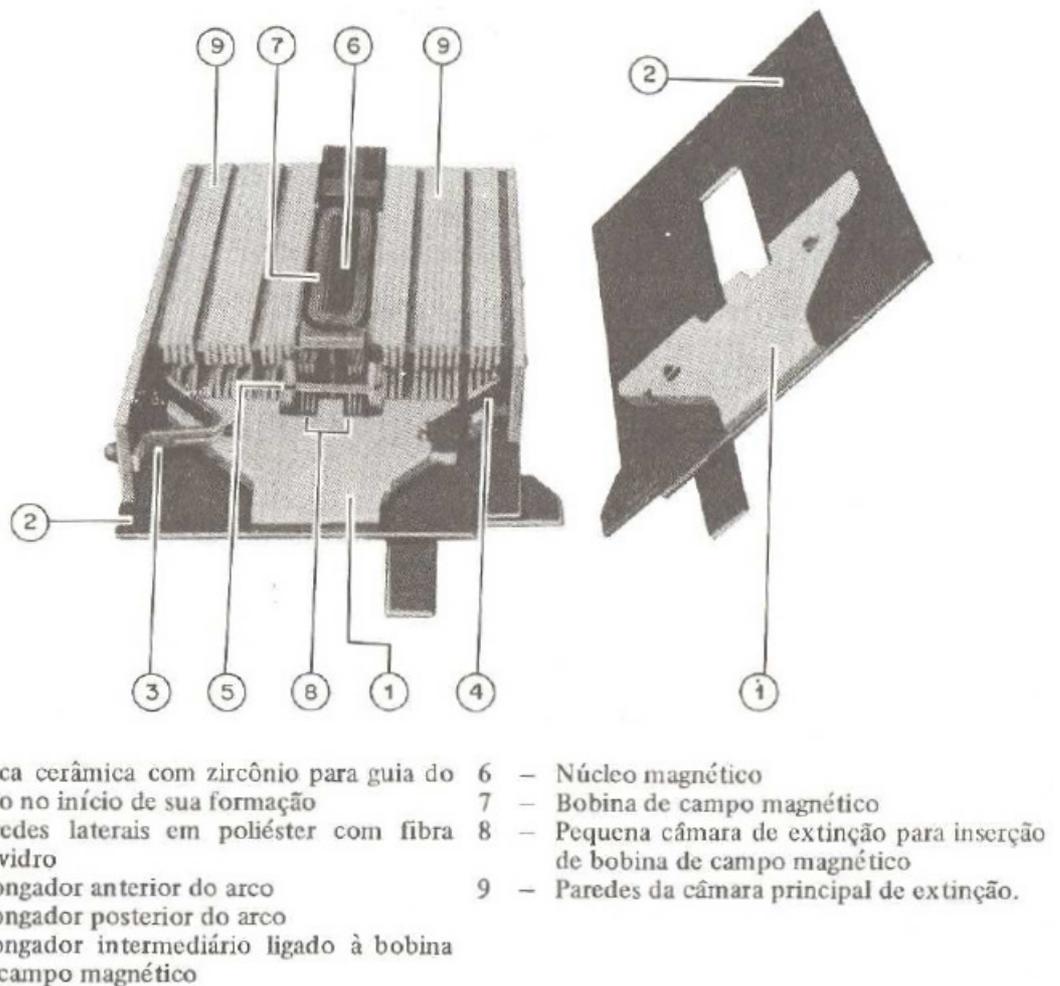


Figura 12 – Câmara de extinção de um disjuntor a sopro magnético [11]

Sua principal desvantagem, no entanto, também está ligada ao fato do arco elétrico queimar no ar. A consequência desta queima é uma rápida oxidação nos contatos, o que leva a uma frequente manutenção e à diminuição da sua vida útil. Como a velocidade de deteriorização de seus componentes está intimamente ligada à tensão e corrente de operação, este fator limita também sua utilização a redes de

tensão mais baixas. Outra desvantagem que apresentam é o alto ruído emitido, o que também pode limitar seu uso.

### **5.7. O sistema de duplo movimento**

O sistema de duplo movimento é uma adaptação do tipo de movimento padrão dos disjuntores com o objetivo de facilitar o corte da corrente. Neste caso, da mesma forma que anteriormente, a tulipa constitui o contato móvel do aparelho. Entretanto, no lugar de utilizar o pino como contato fixo, este contato também adquire movimento, sendo do tipo semimóvel. Portanto, ao invés de deslocar apenas a tulipa durante o movimento de abertura do aparelho, os dois contatos de arco deslocam-se em sentidos opostos com a mesma velocidade.

Este tipo de mecanismo não é exclusivo de nenhum disjuntor específico, podendo ser utilizado quase na totalidade dos equipamentos, independentemente do meio isolante para extinção do arco e da tecnologia empregada. No entanto, essa metodologia é mais comumente empregada nos disjuntores a ar comprimido e, principalmente, a SF<sub>6</sub>.

Disjuntores que utilizam este tipo de movimento na abertura de seus contatos apresentam algumas diferenças significativas com relação aos que utilizam um mecanismo de movimento mais simples.

Utilizando um sistema de biela no fundo da câmara de extinção, o movimento da parte móvel é igualmente transmitido à parte semimóvel. Desta maneira, a velocidade de cada um dos eletrodos é igual à metade da velocidade de movimento dos contatos nos disjuntores que utilizam um sistema de movimento simples.

O objetivo desta técnica é reduzir a energia cinética necessária fornecida pelo comando mecânico do disjuntor. Como se sabe, a energia cinética propriamente dita depende da velocidade de movimento e da massa do objeto, e o trabalho por ela fornecido é:

$$W = \frac{1}{2} m V^2 , \text{ onde:}$$

m é a massa do objeto;

V é a velocidade do movimento.

Obviamente, a massa total dos contatos a ser deslocada é maior que em relação ao movimento simples da tulipa. Em contrapartida, a velocidade necessária para a separação dos contatos é reduzida à metade da original.

Conseqüentemente, em função da massa, a energia cinética é aumentada de aproximadamente 1,5 ou 2 vezes, mas é consideravelmente reduzida pelo quadrado da nova velocidade. Portanto, com este sistema de duplo movimento, o órgão de operação deveria fornecer menos energia, permitindo, dessa forma, reduzir o custo do conjunto.

A Figura 13 a seguir ilustra um disjuntor que utiliza o sistema de duplo movimento de contatos.

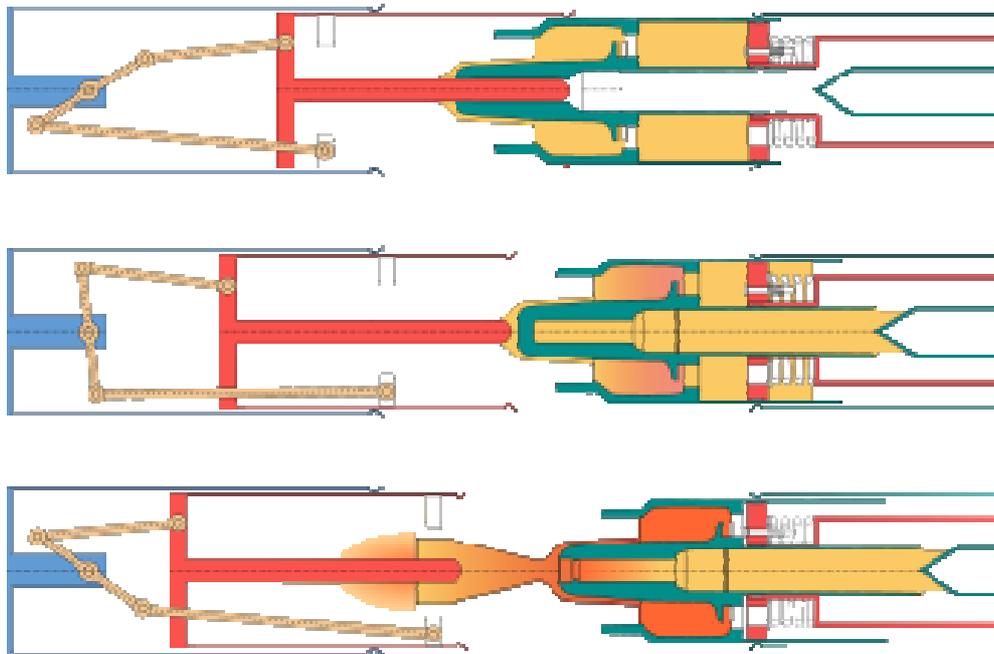


Figura 13 – Abertura de um disjuntor com sistema de duplo movimento [8]

## 6. CIRCUITOS DE CONTROLE

### 6.1. Introdução

Neste capítulo serão abordadas as características essenciais dos circuitos de controle às quais são aplicáveis a todos os projetos de disjuntores. Ao desenvolver um circuito de controle, o projetista deve planejá-lo de forma a respeitar uma lista de funções pré-estabelecidas no projeto. Tais características são obtidas pela inserção de elementos específicos para a função definida, como chaves, solenóides e contadores. A perda ou retirada de um desses elementos significa, também, a perda da função pela qual ele é responsável.

São quatro os tipos de mecanismo de operação de disjuntores: a solenóide, pneumático, a mola e a motor. Não é o objetivo de este trabalho abordar a fundo cada um desses mecanismos e detalhá-los nos seus pormenores. Inicialmente, serão apresentadas e explicadas as funções intrínsecas a todos os circuitos de controle de disjuntores independentemente do mecanismo de operação. Em seguida, para melhor exemplificar e facilitar o entendimento, será feita uma análise dessas funções para o caso dos disjuntores operados a solenóide, incluindo desenhos dos circuitos. Posteriormente, uma breve análise dos disjuntores operados a mola será realizada devido à sua similaridade em muitos aspectos aos operados a solenóide.

### 6.2. Características principais

Trataremos nesta seção sobre as principais características que devem estar presentes nos circuitos de controle dos disjuntores. São elas:

- a) Controle de fechamento (*closing*);
- b) Controle de abertura (*tripping*);
- c) Abertura livre (*trip free*);
- d) Antibombeamento (*anti pumping*);
- e) Confiabilidade (*releability*)

Compreender cada uma dessas funções permite não somente a pesquisa e localização de defeitos, mas também que se preveja o tipo de operação indevida que ocorrerá no caso de um dos componentes do circuito de controle estar inoperante.

### 6.2.1. Controle de fechamento (*closing*)

O circuito de controle de fechamento de um disjuntor deve fazer mais do que simplesmente fechar o equipamento. Para que o controle seja de fato realizado, existem outras funções que o circuito deve se mostrar capaz de atender para o bom funcionamento do disjuntor. Cada uma dessas funções, assim como a importância para sua integridade, será explicada a seguir.

- Início da operação de fechamento

Primeiramente, o circuito deve ser capaz de dar início à manobra de fechamento do disjuntor. Para tanto, o circuito deve energizar o dispositivo de fechamento (um solenóide ou um motor, por exemplo) responsável pela função.

- Interrupção (*out off* ou *cut off*)

Ao término da manobra de fechamento do equipamento, a alimentação deve ser automaticamente desligada ou interrompida. É importante lembrar que as bobinas dos solenóides não são dimensionadas para operar por longos períodos de tempo. A exposição excessiva do circuito a uma corrente elétrica pode sobreaquecer e causar danos no isolamento do disjuntor, resultando em avarias. Assim, não é permitido deixar a decisão de cortar a corrente a cargo do operador, sendo realizada automaticamente.

- Selo (*scal in*)

O objetivo desta função é garantir que o equipamento complete a manobra de fechamento quando esta operação for iniciada. Através de um dispositivo de selagem, o circuito assegura a alimentação da bobina responsável pelo fechamento até o fim do movimento. Caso esta função não estivesse presente, e tal comando fosse realizado através de uma chave, o operador poderia abri-la antes que o disjuntor estivesse completamente fechado e travado, interrompendo a alimentação e fazendo com que o disjuntor permanecesse aberto.

- Antibaque (*anti-slam*)

Esta função é de grande importância para os disjuntores no sentido de evitar choques mecânicos desnecessários. Circuitos de controle com essa característica

não permitem que o equipamento tente realizar uma manobra de fechamento quando já se encontra na posição fechada. Caso o disjuntor não contasse com esta facilidade e tal manobra fosse realizada nessas condições, não haveria nada que se opusesse contra o movimento do mergulhador, que provocaria um baque ao bater com uma força excessiva no final do percurso. Esta função é obtida impedindo a energização da bobina de fechamento quando o equipamento se encontra na posição fechada.

### **6.2.2. Controle de abertura (*tripping*)**

Assim como no caso do controle de fechamento, o controle de abertura não é feito simplesmente abrindo o equipamento. São duas as funções envolvidas neste caso, ambas similares às vistas anteriormente. Além disso, no caso da abertura, pode ser necessário energizar a bobina de um solenóide responsável por liberar a trava que impede o movimento indevido.

- Início da operação de abertura

Da mesma forma que no caso de fechamento, o circuito de controle deve fornecer meios para energizar o dispositivo de fechamento do disjuntor e dar início a este movimento.

- Interrupção (*out off* ou *cut off*)

Igualmente ao caso anterior, a exposição do circuito de controle a uma corrente elétrica por um longo período de tempo pode causar danos ao equipamento. Desta forma, após a conclusão da manobra de abertura, a alimentação deve ser automaticamente desligada ou interrompida.

### **6.2.3. Abertura livre (*trip free*)**

A abertura livre ou *trip free* é um tipo de função intrínseca ao circuito de controle do disjuntor que lhe permite realizar a manobra de abertura sem que tenha sido concluída a operação de fechamento. As facilidades que permitem essa característica são muito importantes no caso do disjuntor ter sido fechado sobre curto-circuito.

Para melhor explicar a importância desta função, peguemos o caso de um disjuntor operado a solenóide. Em condições normais, em um disjuntor que não

conta com a função de abertura livre, quando do seu fechamento através da energização de seu solenóide, o mergulhador opera por meio de acoplamento mecânico, fechando os contatos do disjuntor.

Ao final desta operação, um intervalo de tempo considerável seria necessário para que a bobina do solenóide fosse desenergizada e o equipamento pudesse ser aberto novamente. Caso a operação de fechamento tenha ocorrido sobre curto, é imprescindível que o disjuntor seja reaberto o mais rapidamente possível, não só para evitar as consequências danosas do curto no próprio equipamento, mas também para que se proteja a rede e todos os seus componentes. Para que se evite esse tipo de situação, os disjuntores passaram a contar com a função de abertura livre.

#### **6.2.4. Antibombeamento (*anti-pumping*)**

A incorporação da função de abertura livre tem como consequência direta a necessidade da implementação, também, da função de antibombeamento.

Quando um disjuntor é fechado através de uma ordem do operador (pressionando a botoeira, por exemplo) e uma operação de abertura livre ocorre, a conclusão deste conjunto de operações se dá em um intervalo de tempo muito pequeno. Desta forma, é muito provável que, ao atingir o final do curso do movimento de abertura, o operador ainda esteja pressionando a botoeira que emite a ordem de fechamento.

A fim de evitar que o disjuntor feche uma segunda vez por conta da mesma ordem, devem ser previstos meios que o impeçam de fazê-lo, sendo essa função chamada de antibombeamento. Geralmente, essa facilidade é disponibilizada pelo emprego de um relé de selo (bloqueio) que só pode ser liberado pela abertura da chave de comando de fechamento. Dessa forma, para que o operador possa enviar uma segunda ordem de fechamento, é preciso que, primeiramente, ele abra a chave de comando.

#### **6.2.5. Confiabilidade**

Sendo um disjuntor um equipamento utilizado para a proteção de uma linha, rede ou sistema elétrico, é de suma importância garantir sua correta operação no momento em que for requisitado. Como em muitos casos essas falhas não são frequentes, mesmo que ele fique inativo por longos períodos de tempo, é necessário

que ele seja extremamente confiável e, dessa forma, opere corretamente quando ocorrer uma falha.

Para garantir, então, esta confiabilidade, é muito comum que sua alimentação seja feita através de baterias, principalmente no caso do controle de abertura. Assim, pode-se assegurar que o equipamento efetuará a manobra de abertura para eliminar ou isolar o defeito. Muitas vezes, mas em casos mais esporádicos, o circuito de fechamento também é alimentado dessa forma.

Outra forma de aumentar sua confiabilidade é utilizar barramentos separados para os controles de abertura e fechamento. Dessa maneira, no caso da perda do circuito de fechamento, pela queima de um fusível, por exemplo, o circuito de abertura não é afetado de forma alguma, garantindo a abertura do disjuntor quando preciso.

É importante ressaltar que o emprego de fusíveis para a realização da proteção do circuito de abertura não é muito comum. A razão de se evitar este tipo de aplicação pode ser explicada pelo fato do fusível ficar inutilizado após seu uso. Caso sua proteção precise atuar para proteger o circuito, o disjuntor não será mais capaz de abrir, o que pode botar em risco toda a rede à qual está conectado. No entanto, quando são utilizados, algumas regras devem ser respeitadas quando do seu dimensionamento, tanto para o circuito de abertura quanto para o de fechamento.

No caso do circuito de fechamento, deve-se ter em mente que a bobina é projetada para um pequeno tempo de funcionamento. Durante uma operação de fechamento, esta bobina é energizada por menos de 1 segundo. Para que o fusível deste circuito possa ser projetado para queimar após 6 segundos e garantir da mesma forma a proteção da bobina de fechamento, é preciso que ele seja dimensionado ligeiramente abaixo do valor da corrente obtida pela divisão da tensão pela resistência. Dessa forma, para que a proteção seja feita de forma adequada, deve-se empregar um fusível cujo tamanho corresponda a um valor de corrente menor que a máxima corrente normalmente solicitada pela bobina de fechamento.

Já para o circuito de abertura, ocorre justamente o oposto. Os fusíveis para este tipo de proteção devem ser dimensionados para um valor de corrente muitas vezes superior ao da corrente resultante da divisão da tensão pela resistência. Do mesmo modo que as bobinas do circuito de fechamento, as do circuito de abertura também são projetadas para conduzir por um pequeno tempo de operação.

Portanto, caso a alimentação não seja automaticamente desligada após a conclusão do movimento de abertura (conforme a função de interrupção prevê), a corrente pode ser conduzida por um tempo excessivo e danificá-la. Neste caso, os fusíveis são dimensionados para proteger o circuito no caso de curto-circuito e para que se obtenha uma abertura com maior grau de confiabilidade, a bobina não é protegida quanto ao aspecto de seu tempo nominal de abertura.

### **6.3. Circuito de controle de disjuntores com mecanismo de operação a solenóide**

Conforme já adiantado na introdução deste capítulo, daremos início à análise das funções dos circuitos de controle de disjuntores para equipamentos operados a solenóide. O objetivo desta seção é exemplificar as funções de forma a facilitar o entendimento de cada uma delas. Para tanto, inicialmente será apresentado o circuito mais simples possível, com os elementos mínimos necessários. Em seguida, as funções já explicadas serão adicionadas uma a uma, com seus componentes de controle específicos na mesma ordem em que foram apresentadas.

Iniciaremos, então, com a apresentação do circuito de fechamento do disjuntor com seus elementos mínimos necessários para operar. Conforme se pode observar na Figura 4, esses componentes são a bobina de fechamento do disjuntor (*Closing Coil – 52CC*); um contator (*52X*); a chave de comando de fechamento (*Closing Switch - Closing – CS/C*); fusíveis e chave separadora.

O primeiro elemento a ser observado é a chave separadora. Diferentemente do que possa parecer à primeira vista, a chave possui 4 polos, sendo somente dois mostrados neste circuito. Os dois polos remanescentes integram o circuito de abertura e serão vistos mais à frente. A chave de 4 polos constitui um requisito de segurança, sendo operada em grupo para remover todo o controle do disjuntor. Dessa forma, com a chave aberta, elimina-se toda a possibilidade de operação elétrica do equipamento, permitindo que os operadores possam trabalhar sem qualquer risco de operação acidental por conta de um comando remoto do disjuntor.

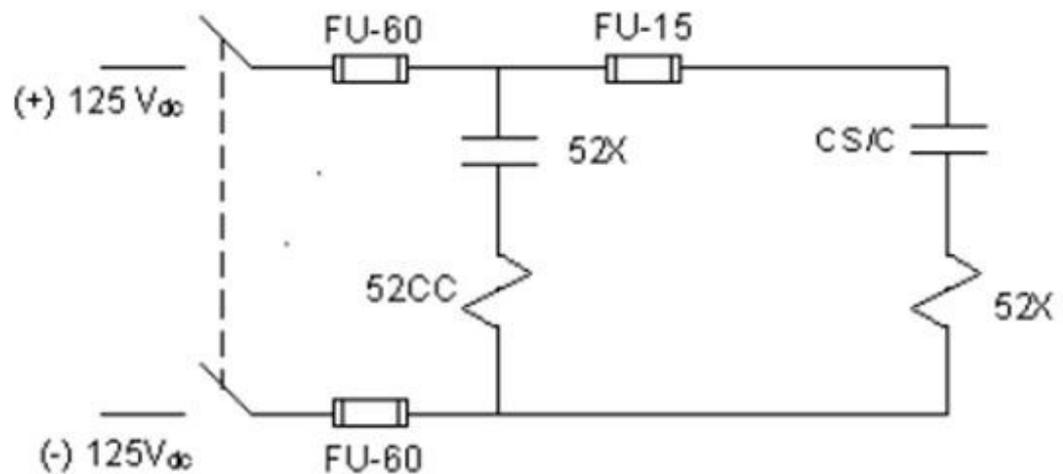


Figura 14 – Circuito básico para o fechamento de um disjuntor

Em seguida, como parte da proteção do circuito, nota-se a presença de três fusíveis. Dois deles estão ligados diretamente à chave e apresentam um valor nominal relativamente alto, no caso 60 A. A razão de seu alto valor se deve ao fato de conduzirem toda a corrente da bobina e dos componentes de controle de fechamento. Como explicado há pouco, a corrente total que flui através da bobina é superior a esse valor, sendo os fusíveis dimensionados para que queimem caso a corrente seja mantida por mais de 6 segundos. A proteção dos elementos mais leves localizados no ramo direito do circuito é feito por outro fusível de valor inferior, nesse caso, 15 A.

É importante deixar claro também que, com exceção do contato responsável pela sua energização, não se deve instalar qualquer tipo de componente em série com a bobina de fechamento do disjuntor. No caso de haver algum componente que desrespeite esta regra, sua falha provocará também a impossibilidade de energizar a bobina e, conseqüentemente, de realizar a abertura do equipamento.

Passaremos agora, então, à análise dos componentes de controle propriamente ditos e ao funcionamento do circuito. Com a chave inicialmente fechada, a operação de fechamento do disjuntor se dá da seguinte forma:

- Fecha-se a chave de comando CS/C;
- A corrente circula a partir da barra positiva para a barra negativa, energizando a bobina do contato 52X;
- A energização da bobina provoca o fechamento do contato 52X;

- A bobina de fechamento 52CC é energizada;
- O mergulhador do solenóide opera e o disjuntor fecha.

Este é o circuito mais simples de fechamento de disjuntor. Esses elementos permitem apenas a realização desta operação, sem qualquer uma das funções anteriormente expostas. Neste tipo de circuito, caso o operador mantenha a chave de comando CS/C na posição fechada por longo intervalo de tempo, os fusíveis principais queimarão e a bobina pode ser danificada. Para evitar que este tipo de situação ocorra, a função de interrupção é implementada, conforme segue.

A Figura 15 retrata a adição desta função. Como pode ser facilmente observado, foram incorporados ao circuito inicial um contato 52/aa e um relé de interrupção 52Y.

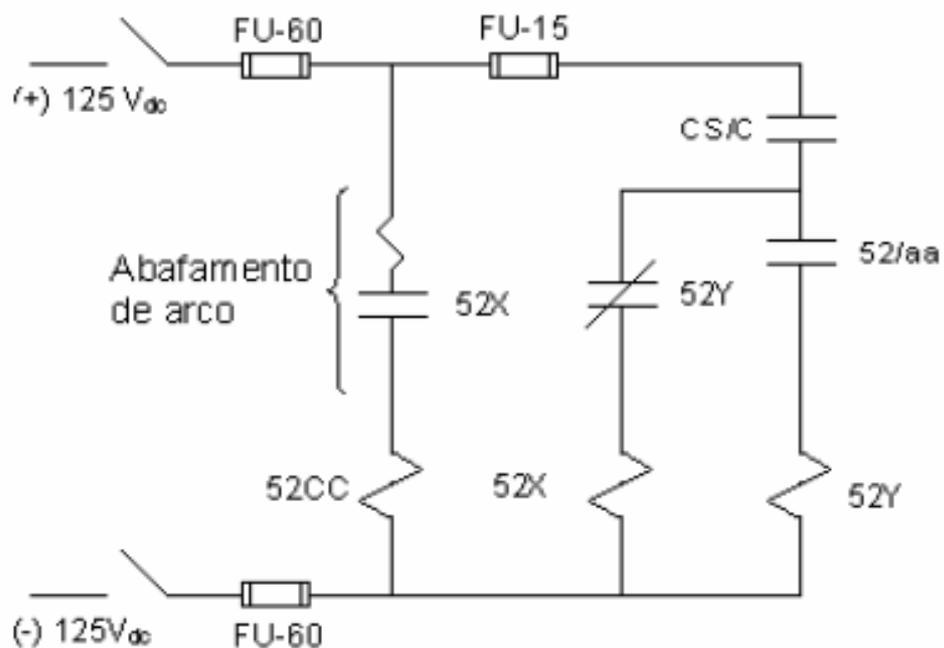


Figura 15 – Circuito de fechamento com interrupção automática da corrente

O contato 52/aa fecha juntamente com o disjuntor, podendo ser operado tanto pelo mergulhador do solenóide quanto pela própria mecânica do equipamento, conforme estabelecido em projeto. No primeiro caso, quando o mergulhador se aproxima da posição completamente fechada, uma pequena haste aciona o fechamento do contato. Neste caso, quando o mergulhador desce, o contato é

novamente aberto. Na segunda situação, quando a haste dos contatos do disjuntor se aproxima da posição de completamente fechado, o contato 52/aa fecha, permanecendo nesta posição enquanto o disjuntor estiver fechado.

A operação completa se dá como segue:

- Fecha-se a chave de comando CS/C;
- A corrente circula através do contato 52Y normalmente fechado, energizando a bobina do contato 52X;
- A energização da bobina provoca o fechamento do contato 52X;
- A bobina de fechamento 52CC é energizada;
- O mergulhador do solenóide opera e o disjuntor fecha;
- O contato 52/aa fecha juntamente com o disjuntor;
- A bobina do relé 52Y é energizada, provocando a abertura do contato 52Y;
- A passagem de corrente pela bobina 52X é interrompida;
- O contato 52X é aberto, desligando a bobina de fechamento 52CC;
- Com a abertura da chave de comando CS/C, a corrente deixa de circular através da bobina 52Y;
- O contato 52Y fecha novamente.

Portanto, o fechamento do disjuntor provocará a desenergização da bobina de fechamento, protegendo-a de um intervalo excessivo de condução de corrente.

O elemento indicado no circuito em forma de 'zig zag' logo acima do contato 52X é um abafador de arco. Como o valor da corrente é elevado e se tratando de corrente contínua, a extinção do arco que surge é relativamente difícil e o objetivo deste elemento é auxiliar nesse processo.

A próxima função a ser integrada ao circuito de controle de abertura é o selo. Conforme explicado anteriormente, é interessante tirar do operador a responsabilidade de uma operação incorreta ou mal sucedida. Como se pode observar na Figura 16, a simples adição de um contato 52X no local indicado garante essa função, que assegura o fechamento completo do disjuntor por mais que o operador libere a chave antes que a manobra esteja concluída.

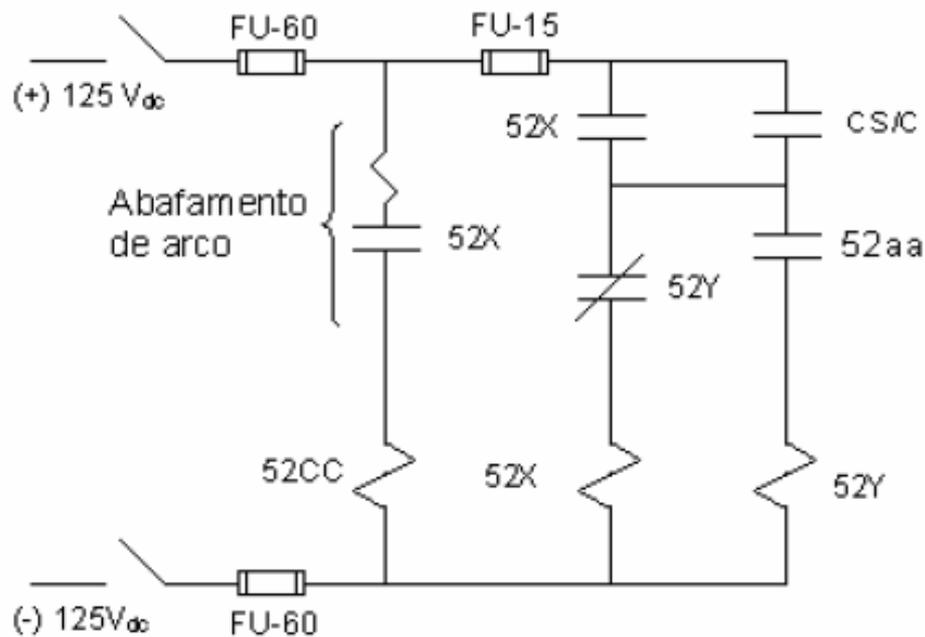


Figura 16 – Inclusão da função selo no circuito de fechamento

O circuito de controle funcionará, portanto, como abaixo:

- Fecha-se a chave de comando CS/C;
- A bobina do relé 52X é energizada;
- Os dois contatos 52X fecham, um deles provocando a energização da bobina de fechamento 52CC;
- Tem início a manobra de fechamento do disjuntor;
- Mesmo que o operador libere a chave de fechamento CS/C, o novo contato 52X garante a energização da bobina 52X e a consequente continuação da manobra de fechamento;
- O contato 52/aa fecha juntamente com o disjuntor;
- A bobina do relé 52Y é energizada, provocando a abertura do contato 52Y;
- A passagem de corrente pela bobina 52X é interrompida;
- Os dois contatos 52X são abertos, desligando a bobina de fechamento 52CC.

Devemos implementar agora a próxima função para o circuito de fechamento, o antibaque. Como se pode observar, com a última configuração apresentada, não existe nada que impeça que a bobina de fechamento seja energizada quando o





- Tem início a manobra de fechamento do disjuntor;
- Mesmo que o operador libere a chave de fechamento CS/C, o novo contato 52X garante a energização da bobina 52X e a consequente continuação da manobra de fechamento;
- Quando o disjuntor fecha, o contato 52/aa é fechado enquanto o contato 52ab é aberto;
- A bobina do relé 52Y é energizada, provocando a abertura do contato 52Y normalmente fechado e o fechamento do novo contato 52Y normalmente aberto;
- Este último passo sela sua bobina pela chave de fechamento.

Dessa forma, caso o disjuntor venha a ser aberto pela proteção ou qualquer outra razão e o operador ainda mantiver a chave de fechamento na posição fechada, a bobina de fechamento não será energizada, impedindo-o de tentar fechar. Para que o operador possa emitir uma nova ordem de fechamento, é necessário que retorne a chave para a posição aberta, restabelecendo a configuração inicial retratada na Figura 18, para, em seguida, acionar novamente a chave de comando.

Como forma de indicar em que posição o disjuntor se encontra, foi adicionada ao circuito uma lâmpada indicadora de luz verde comandada por um contato 52b auxiliar ao disjuntor. Quando o disjuntor se encontra na posição fechada, o contato 52ab estará aberto e a luz verde, desligada. Ela só acenderá quando o equipamento estiver aberto e o contato 52ab fechado, servindo como um indicador de que o disjuntor se encontra nesta posição.

Por fim, uma unidade de descargas *'thyrite'* também foi integrada ao circuito. O objetivo deste elemento é limitar as altas tensões que surgem quando a corrente decai através do processo de interrupção e proteger o isolamento da bobina de fechamento e dos outros componentes do circuito. Seu comportamento é similar ao de um para-raio na limitação de picos de tensão.

Agora que concluímos o circuito de fechamento do disjuntor com a implementação de todas as funções para o seu bom funcionamento e proteção do equipamento, daremos início à análise do seu circuito de abertura.

Como o circuito de abertura é extremamente simples, quando comparado ao de fechamento, devido ao número reduzido de funções necessárias a se implementar, não será preciso incluir cada uma das funções gradativamente, como foi feito no primeiro caso. A Figura 19 representa o circuito completo para controle de abertura de disjuntores.

Conforme se pode observar pela figura, os componentes que integram o circuito de abertura são a bobina de abertura do disjuntor (*tripping coil* – 52TC), a chave de comando de abertura (*Closing Switch - Tripping* – CS/T), um relé de proteção (R1), contatos auxiliares (52aa), fusíveis e a chave separadora.

Como já havia sido mencionado, a chave separadora é do tipo 4 polos, sendo os dois polos até então remanescentes tendo sido agora apresentados. A explicação a respeito da importância desta chave com relação à segurança já foi feita na abordagem dos circuitos de fechamento, se aplicando também para este caso.

Em seguida, pode-se notar a presença de dois fusíveis para a proteção da bobina de abertura. Os detalhes sobre seu dimensionamento também já foram dados neste trabalho, mas vale lembrar que os fusíveis são dimensionados para correntes superiores àquela que passa pela bobina e que são projetados para abrir somente em condição de curto-circuito.

Com relação aos contatos auxiliares, diferentemente do que se possa imaginar a princípio, é instalado um par deste tipo de contato não por uma questão de redundância, mas sim para dividir o esforço necessário para a realização da operação.

É importante observar também a disposição em paralelo entre a chave de comando de abertura e o contato do relé de proteção. Esses componentes são dispostos desta forma para que seja possível emitir o comando de abertura tanto pelo operador, através da chave de comando, quanto por uma ação da proteção do sistema, ao ser fechado o contato do relé utilizado para este fim.

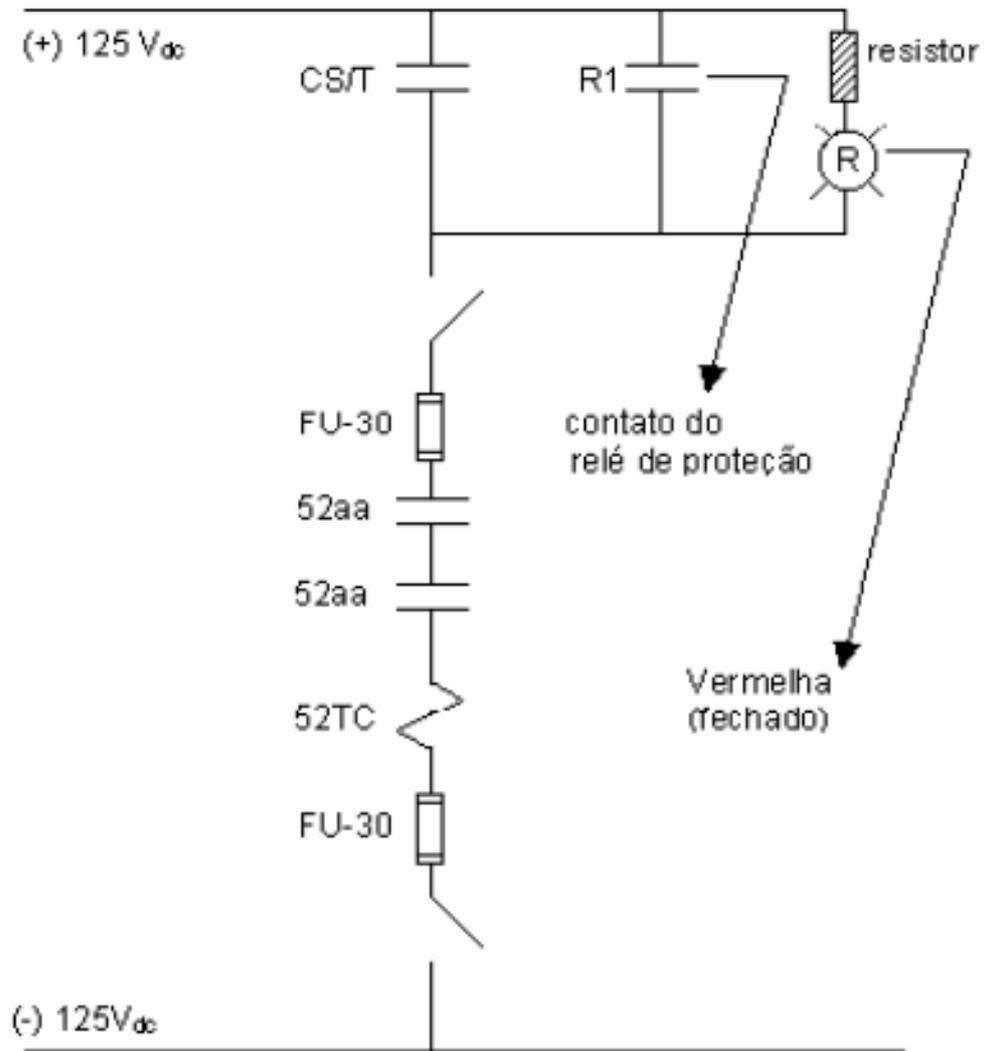


Figura 19 – Circuito para a abertura de um disjuntor

Por fim, assim como apresentado no circuito completo para controle de fechamento (Figura 20), nota-se a presença de uma lâmpada indicadora da posição em que se encontra o equipamento. Neste caso, uma lâmpada de luz vermelha acende quando o disjuntor se encontrar na posição fechada.

O circuito completo para o controle de disjuntores, portanto, deve unir tanto as facilidades para que se realize a abertura quanto para o fechamento. Na Figura 20, pode-se observar um circuito deste tipo. Existem algumas pequenas diferenças com relação àqueles mostrados ao longo desta seção, entretanto, todas as funções apresentadas também estão aqui incorporadas.

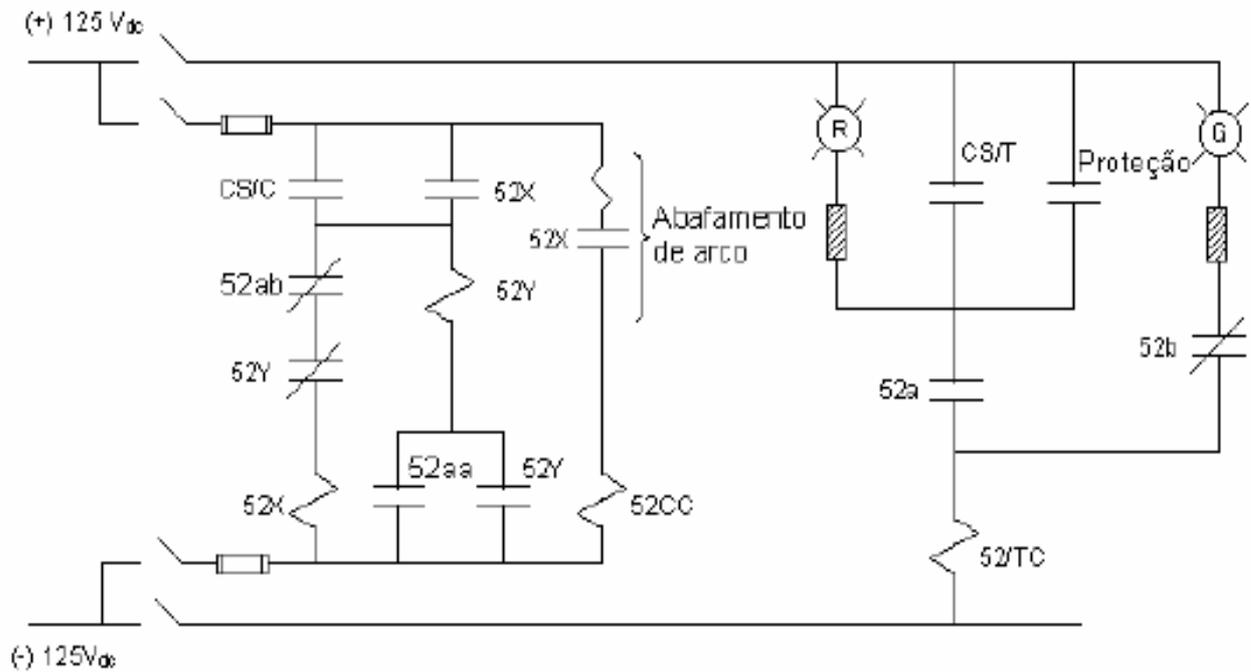


Figura 20 – Circuito completo para abertura e fechamento de disjuntores

#### 6.4. Circuito de controle de disjuntores com mecanismo de operação a mola

No caso de disjuntores cujo circuito de controle é operado com o auxílio de uma mola, existem algumas diferenças com relação à operação a solenóide que merecem ser destacadas.

Este tipo de circuito conta com um motor de corrente contínua ligado à barra através de um contato de chave de comando (CS/B). A finalidade deste motor é comprimir a mola que, ao se expandir, provoca o fechamento do disjuntor. A Figura 21 representa um circuito deste tipo já com todas as funções devidamente incorporadas.

O contato de bloqueio da chave de comando que alimenta o motor deve estar permanentemente fechado enquanto o disjuntor estiver em operação normal, abrindo somente quando a chave de comando é levada para a posição bloqueada. Com o contato permanentemente fechado, garante-se a compressão da mola, o que permite emitir um comando para fechar o equipamento imediatamente após a abertura.

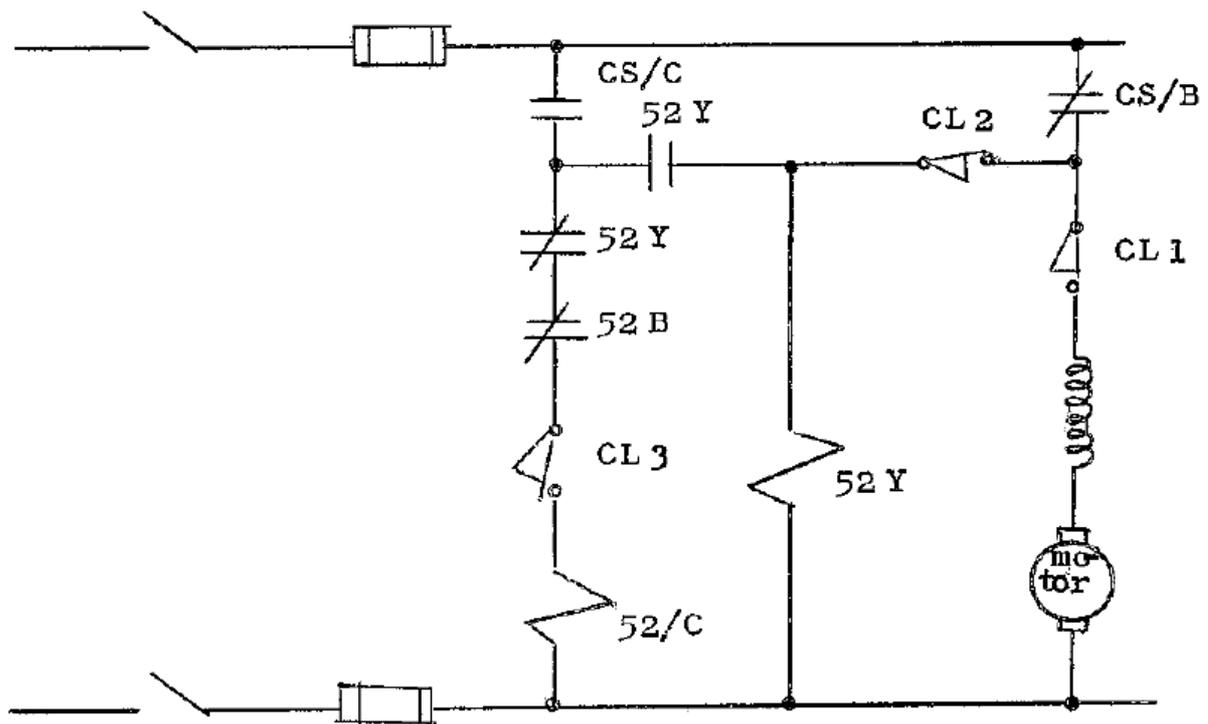


Figura 21 – Circuito de controle de abertura operado a mola

O fechamento do disjuntor é realizado ao se retirar uma trava, que segura a mola comprimida, devido à energização da bobina de fechamento. Como este mecanismo demanda uma corrente bastante reduzida para ser executado, não é necessária a utilização de um relé auxiliar para seu comando.

A chave de fim de curso CL1 tem por objetivo interromper a alimentação do motor quando a mola já estiver carregada. Quando a mola se encontra distendida, esta chave fecha, permitindo que o motor seja acionado e é aberta novamente no momento em que o motor completar o serviço de compressão.

Já a chave CL3 permanece aberta enquanto a mola de fechamento não se encontrar na condição de totalmente carregada, impedindo a energização da bobina de fechamento nesta condição. Dessa forma, garante-se que o disjuntor só será acionado quando a mola estiver em condições de realizar o fechamento.

A função antibaque é garantida com a inserção do contato auxiliar 52b, que, como já foi explicado, impede a energização da bobina de fechamento quando o equipamento já se encontrar na posição fechada.

Para analisar o funcionamento deste circuito, consideremos o disjuntor inicialmente na posição aberta e a mola devidamente carregada. Ao ser acionada a chave de comando para fechar o disjuntor, libera-se a mola através da energização

da bobina 52/C, abrindo também o contato auxiliar 52b. A expansão da mola fará com que a chave CL1 se feche para recarregá-la e que a chave CL3 permaneça aberta até a conclusão dessa operação.

Se por algum motivo o disjuntor for aberto, a função antibombeamento é garantida pelo relé auxiliar 52Y com dois contatos pela chave CL2, que opera da mesma forma que a chave CL1. Pela ação do contato normalmente fechado 52Y, evita-se que a bobina 52/C seja reenergizada, caso o operador mantenha fechada a chave de comando. Para realizar um novo fechamento, o operador deverá retornar a chave à posição neutra. Isso provocará a abertura do contato CS/C e desenergizará a bobina 52Y. Acionando, agora, novamente a chave, o disjuntor fechará outra vez.

O circuito de controle de abertura para este caso é idêntico ao que utiliza operação a solenóide, portanto não será retratado.

## 7. A TENSÃO TRANSITÓRIA DE RESTABELECIMENTO (TTR)

### 7.1. Introdução

Quando da abertura de um disjuntor operando sob corrente alternada, imediatamente após a extinção do arco elétrico, surge uma tensão entre seus terminais. Esta tensão, no período transitório anterior ao amortecimento das oscilações, é denominada Tensão Transitória de Restabelecimento (TTR) ou TRV, do inglês, *Transient Recovery Voltage*.

Para que um disjuntor seja aprovado para operar em um dado sistema elétrico, é necessário que ele se mostre capaz de suportar a TTR definida pelas normas vigentes. Essas normas agrupam a maioria dos defeitos mais comuns que podem ser observados nas redes elétricas. Trata-se de um parâmetro essencial para o sucesso de um corte de corrente, particularmente nos casos de sistemas a alta e extra-alta tensão.

### 7.2. Características e fatores de influência

Os dois principais parâmetros que caracterizam a TTR são: a amplitude máxima da tensão (AF – *amplitude factor*), e a Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento (TCRT) ou RRRV – *Rate of Rise of Recovery Voltage*. O fator AF pode ser expresso como a razão  $K_p$  entre o valor máximo da sobretensão e a tensão nominal da rede (em pu). Um valor de amplitude muito elevado pode alterar o comportamento dielétrico do meio e provocar a reativação de um arco elétrico após o corte da corrente em uma rede. Já a velocidade de subida é expressa em kV/ $\mu$ s. Trata-se de um importante fator para que se determine se um arco elétrico será reativado e, assim, se estabelecer novamente entre os contatos de arco do disjuntor. Estes dois tipos de parâmetros, portanto, caracterizam a severidade da TTR.

Para que um corte seja bem sucedido, a velocidade de subida deve ser inferior à velocidade de regeneração dielétrica do meio de extinção do arco. Desta forma, o disjuntor vence a corrida dielétrica e o equipamento pode suportar o valor de pico da TTR sem permitir o reinício do arco.

Os dois parâmetros básicos da TTR (amplitude e inclinação) dependem não somente do tipo de defeito a ser extinto, mas também das características da rede onde o disjuntor está conectado.

Em uma aproximação mais simples, não sendo levadas em conta as reflexões de onda, uma rede elétrica pode ser representada por um circuito RLC. A Figura 22 a seguir ilustra a variação da TTR em função do fator  $1/RC$ , característico da rede em consideração, durante a evolução do tempo.

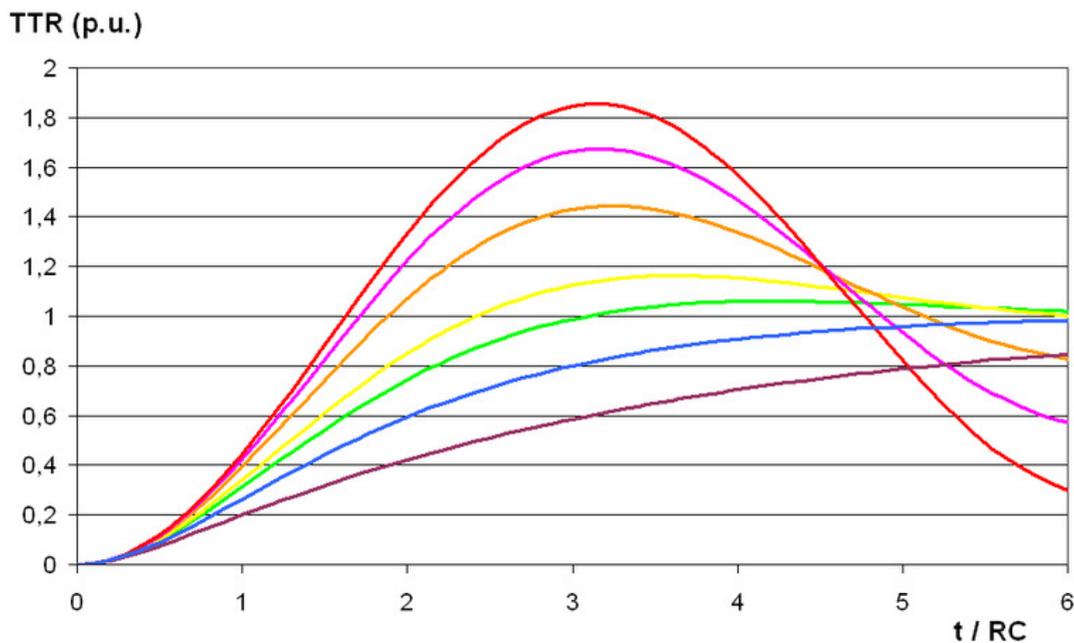


Figura 22 – Variação da TTR em função de  $1/RC$  [8]

A TTR é influenciada particularmente pelos seguintes fatores:

- Condição do neutro na rede (efetivamente aterrado, isolado etc.);
- Tipo de carga (indutiva, capacitiva etc.);
- Tipo de rede (com cabos, linhas aéreas, subterrânea etc.);

A TTR se estabelece entre os terminais do disjuntor quando da sua abertura no caso da interrupção de uma corrente de falta, mas também em condições normais de serviço (abertura de linhas, desconexão de um transformador ou um motor etc.). O tipo mais severo de tensão desta natureza ocorre no primeiro polo de um disjuntor que interrompe um defeito em um sistema trifásico não aterrado. O corte, geralmente, é realizado quando da passagem pelo zero natural da corrente ou, no caso de cargas indutivas, quando o equipamento força a passagem pelo zero da corrente.

Conforme mencionado, para que o corte da corrente seja realizado com êxito, a tensão entre os contatos que o disjuntor pode suportar deve ser superior à TTR, de forma a evitar um fracasso dielétrico do disjuntor e o reinício do arco. Com as técnicas de corte atuais, geralmente, não é necessário alterar o valor da TTR para que se realize o corte de correntes. Inclusive para o caso de valores elevados de corrente, que podem atingir valores de 50 kA ou 63 kA.

No entanto, para o corte de defeitos em linha de forte intensidade, a redução da inclinação da TTR através do emprego de capacitores em paralelo ao disjuntor ou entre o disjuntor e a linha aérea pode ser bastante útil. Para facilitar o corte de fracas correntes indutivas, muitas vezes são empregados, também, circuitos RC ou varistâncias para reduzir, respectivamente, a inclinação e a amplitude da TTR.

### **7.3. Análise da TTR**

A tensão de restabelecimento que surge entre os contatos do disjuntor após a extinção do arco também pode ser analisada em função das frequências naturais e industrial que se superpõem durante o período transitório anterior ao amortecimento. Seu valor inicial é dado justamente pela combinação dessas componentes.

A partir do terminal do disjuntor oposto à falta, uma onda de tensão com esse valor inicial se propaga através das linhas conectadas à barra sendo refletida em pontos de descontinuidade. Após esta primeira reflexão, retorna ao ponto inicial, onde é refletida novamente, somando-se à onda de tensão inicial. Reflexões que ocorrem em pontos próximos ao inicial contribuem para o aumento dos valores iniciais da TTR, enquanto reflexões em pontos mais distantes contribuem para os valores de pico. Este processo se repete até o amortecimento completo da onda.

Como é de se supor, existe uma enorme variedade de formas possíveis que este tipo de onda pode assumir. Algumas, por exemplo, possuem mais de um valor de pico, sendo necessário definir o primeiro pico e o pico máximo para o cálculo da TTR a ser aplicada em ensaios. A Figura 23 a seguir ilustra as quatro maneiras diferentes como a TCRT pode ser definida.

Cada uma das linhas tem o seguinte significado:

- (i): Taxa média de crescimento de zero ao pico máximo da TTR.
- (ii): Taxa média de crescimento de zero ao primeiro pico da TTR.
- (iii): Máxima taxa média de crescimento, expressa como a tangente à curva da TTR passando pela origem.

(iv) Máximo valor instantâneo da TCRT.

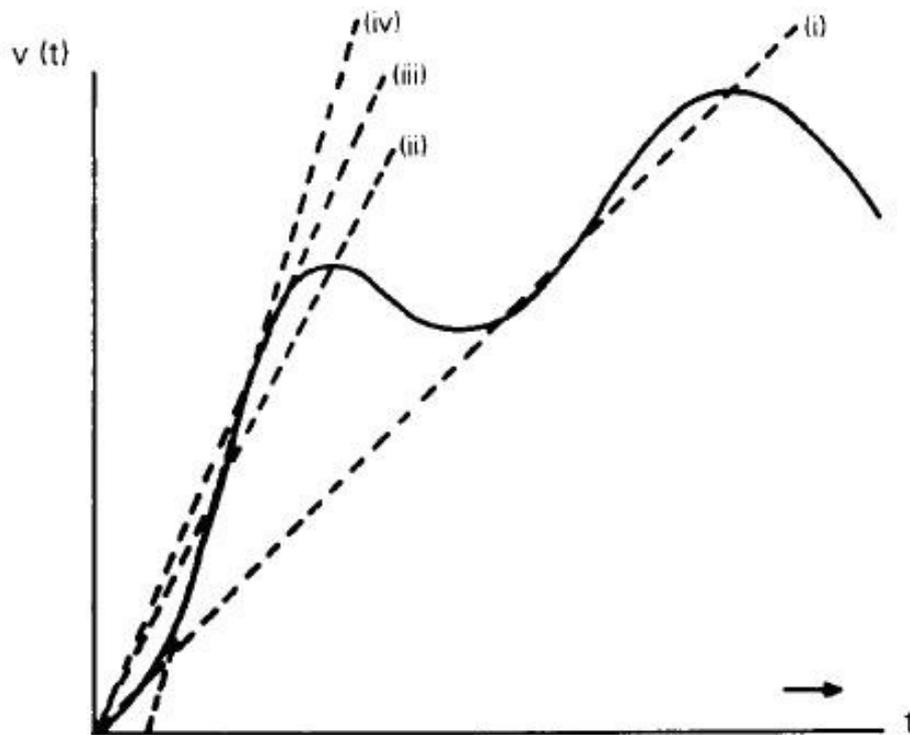


Figura 23 – Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento (TCRT) [5]

A definição da TRT específica para cada disjuntor deve levar em conta diversos fatores, inclusive o tipo de meio de extinção do disjuntor. Disjuntores a óleo, por exemplo, são mais sensíveis às TCRT definida em (i) e (ii), enquanto os que empregam  $SF_6$  ou ar comprimido são mais sensíveis às TCRT dos tipos (iii) e (iv).

Antes de analisar os métodos de modelagem da tensão transitória de restabelecimento, será dada uma breve descrição deste tipo de onda.

A Figura 24 ilustra a formação da TTR aplicada a um disjuntor em seguida à interrupção de uma falta terminal. Neste caso, trata-se de uma falta trifásica aterrada alimentada por um sistema solidamente aterrado, tipo barra infinita. Assume-se que a tensão nos terminais sob falta é igual a zero. Este tipo de tensão é a que ocorre sobre o terminal oposto ao da falta, em qualquer fase do disjuntor.

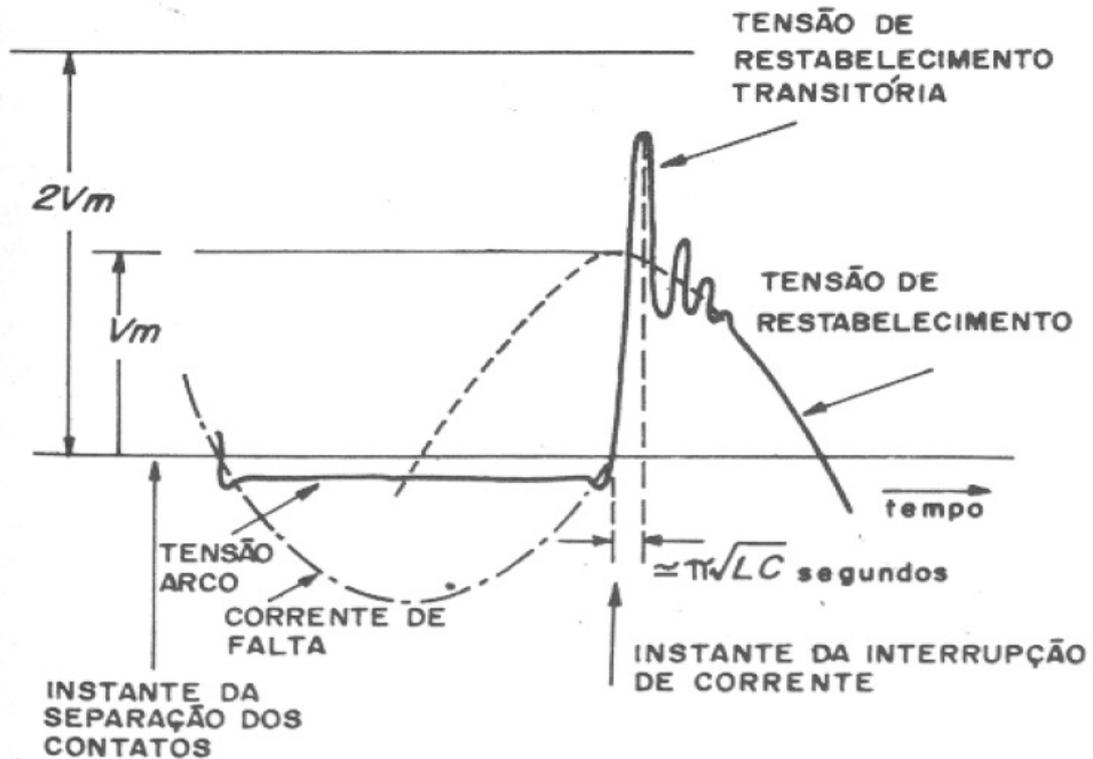


Figura 24 – Formação da TTR em seguida à interrupção de uma falta terminal [10]

Conforme se pode observar na figura, a partir da separação dos contatos, estabelece-se um arco elétrico entre os contatos principais do disjuntor, fazendo com que a corrente continue a circular pelo sistema. Antes da interrupção da corrente, a tensão é diferente de zero e assume o valor da tensão do arco elétrico no interior da câmara de extinção.

No momento em que o arco é extinto e, conseqüentemente, a corrente é interrompida, essa tensão cresce acintosamente. Esta tensão, na verdade, busca atingir o valor da tensão a frequência industrial do sistema aplicada ao disjuntor, que neste instante se encontra próxima ao seu valor máximo ( $V_m$ ).

Nesse processo, o valor de  $V_m$  é ultrapassado e uma tensão oscilatória se estabelece. A componente transitória, cuja frequência é definida pelas indutâncias e capacitâncias características do circuito, se superpõe à componente de frequência industrial formando a tensão transitória de restabelecimento.

Decorridos alguns instantes, essa oscilação é completamente amortecida e a tensão volta a adquirir a frequência industrial do sistema. É importante observar que neste caso, devido ao fato da tensão no lado em que ocorre a falta ser igual a zero,

a tensão do lado oposto (ilustrada na Figura 24) confunde-se com a própria tensão de restabelecimento.

#### 7.4. Modelagem da TTR

Após a análise do comportamento da TTR, assim como dos fatores que a influenciam, segue a explicação acerca de sua modelagem. Para que um disjuntor possa ser comercializado, é necessário que ele atenda uma série de requisitos para as condições que pretende operar.

Nos ensaios de abertura de curto-circuito, por exemplo, o disjuntor deve ser submetido não somente às correntes que caracterizam sua capacidade de interrupção, mas também, após a interrupção, deve ser aplicada entre seus terminais uma tensão não inferior à tensão de restabelecimento transitória especificada.

A maneira como a TTR é especificada pode ocorrer por dois métodos distintos.

- Método dos quatro parâmetros

Este método se aplica aos casos em que a tensão é elevada (superior a 100 kV). Nessas condições, as correntes de curto-circuito são relativamente grandes em relação à máxima corrente de curto no ponto considerado. Assim, a tensão de restabelecimento transitória possui um período inicial de alta razão de crescimento, seguido de outro período de baixa razão de crescimento.

Os quatro parâmetros utilizados neste tipo de modelagem são:

- $U_1$  – Primeira tensão de referência (kV)
- $t_1$  – Tempo para alcançar  $U_1$  ( $\mu$ s)
- $U_c$  – Segunda tensão de referência (valor de pico da TTR) (kV)
- $t_c$  – Tempo para alcançar  $U_c$  ( $\mu$ s)

A Figura 25 ilustra a modelagem da TTR pelo método dos quatro parâmetros.

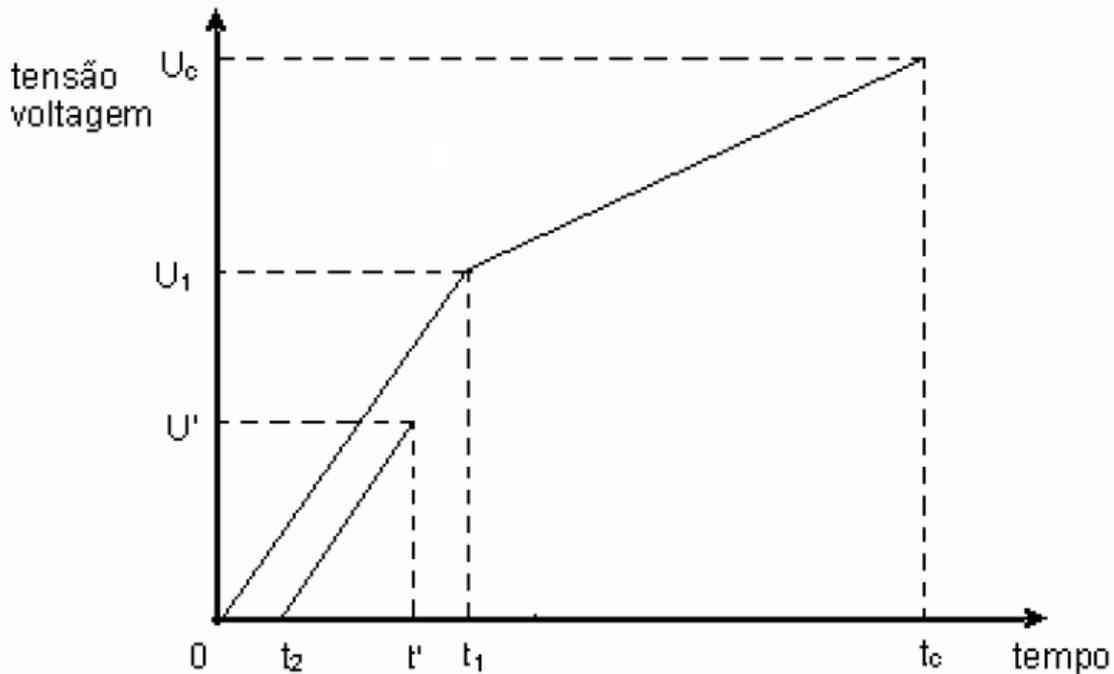


Figura 25 – Modelagem da TTR pelo método dos quatro parâmetros [10]

- Método dos dois parâmetros

Este tipo de modelagem é utilizado para os casos em que as correntes de curto-circuito são relativamente pequenas em relação à máxima corrente de curto no ponto considerado. Geralmente, se aplica para os casos em que a tensão é inferior a 100 kV, mas pode ocorrer também para casos em que a tensão é superior a esse valor, mas que a corrente respeita as características mencionadas.

Diferentemente do caso anterior, a tensão transitória de restabelecimento possui uma característica de frequência amortecida.

Os dois parâmetros utilizados neste tipo de modelagem são:

- $U_c$  – Tensão de referência (valor de pico da TTR) (kV)
- $t_c$  – Tempo para alcançar  $U_c$  ( $\mu$ s)

A Figura 26 ilustra a modelagem da TTR pelo método dos dois parâmetros.

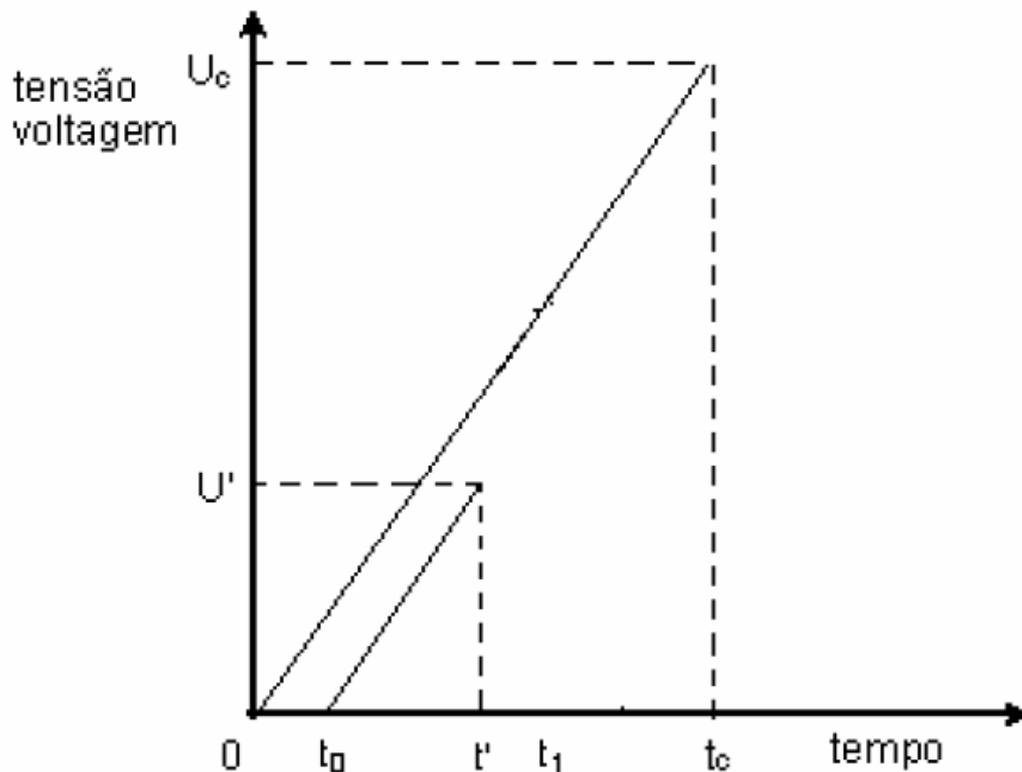


Figura 26 – Modelagem da TTR pelo método dos dois parâmetros [10]

Esses dois tipos de modelagem não tentam prever fielmente o comportamento da TTR, o que seria extremamente complicado e dispendioso, devido à sua enorme complexidade. Na realidade, esses métodos se propõem a criar um envelope de tensão que cubra os valores máximos que a TTR pode alcançar quando da interrupção da falta especificada.

Para uma boa representação, portanto, a tensão transitória de restabelecimento prospectiva de um sistema não deve exceder em momento algum a linha de referência que representa a TTR especificada para o disjuntor.

### 7.5. Defeito quilométrico

O caso mais severo de TTR aplicada a um disjuntor se dá quando da ocorrência do chamado defeito quilométrico. Por definição, trata-se de um curto-circuito que se produz em um ponto afastado do disjuntor, a partir de aproximadamente 1 quilômetro de distância.

A princípio, pode-se imaginar que este seria um caso mais simples para o disjuntor devido à existência da impedância de linha. Em um curto afastado do equipamento, a corrente seria reduzida e o esforço exigido do disjuntor para realizar

a interrupção deveria ser menor. A redução da corrente de falta pela impedância do trecho de linha, de fato, ocorre, atenuando os valores dos picos máximos da TTR. No entanto, por outro lado se observa que as condições impostas são agravadas devido à elevada TCRT.

A Figura 27 ilustra um circuito em que ocorre um defeito deste tipo, em que a falta se dá no ponto B. Com a abertura do disjuntor, observa-se a existência de duas malhas RLC fechadas e independentes, aqui chamadas de 'circuito 1' e 'circuito 2'.

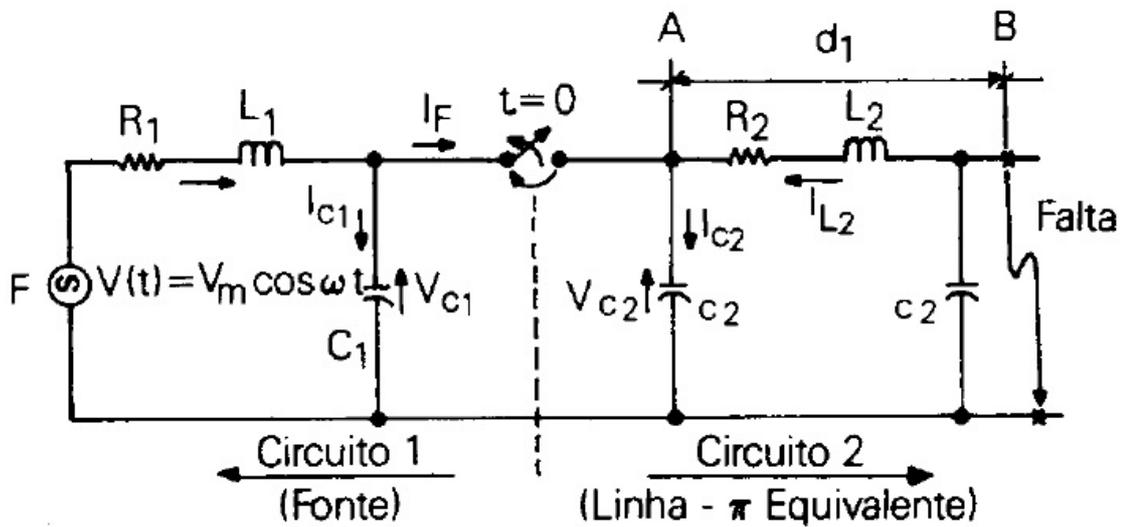


Figura 27 – Circuito equivalente para um defeito quilométrico [5]

Como já se sabe, as sobretensões se propagam ao longo da linha e são refletidas toda vez que encontram um ponto de descontinuidade (um circuito aberto ou curto-circuito, por exemplo). No circuito retratado, a onda de sobretensão que se origina ao ser aberto o disjuntor, no circuito 2, se depara com um circuito aberto em uma direção e com um curto-circuito na outra. Devido a essas descontinuidades, as ondas serão refletidas e irão intervir nas ondas iniciais, provocando o aumento da TCRT e, conseqüentemente, elevando a severidade da TTR.

A principal diferença entre um defeito quilométrico e outro na saída do disjuntor é que a presença da impedância da linha não só limita o valor da corrente, como também suporta alguma tensão no sistema.

Para estudos mais aprofundados sobre defeitos desta natureza e suas conseqüências para o sistema elétrico, consultar [5], [7], [8] e [10].

## **8. O ARCO ELÉTRICO**

### **8.1. Definição**

O arco elétrico, por definição, é uma corrente elétrica visível em um meio isolante (ar, vácuo, gás, SF<sub>6</sub> etc.), que ocorre a partir da ionização desta matéria. Sejam duas superfícies condutoras que apresentem diferença de potencial. Quanto mais próximas se encontrarem, mais fácil será a ocorrência deste fenômeno. Uma vez o meio ionizado, estabelece-se um canal condutor que se acopla a estas superfícies de contato. O arco não se extinguirá, portanto, mesmo que os condutores se separem, desde que a diferença de potencial seja suficiente para mantê-lo aceso.

O ponto em que o arco se fixa é estável. Uma vez que encontra o caminho mais curto, ele se mantém nesse local, pois, diferentemente do meio que o circunda, no arco, o meio já se encontra ionizado.

Geralmente, a corrente que atravessa o arco elétrico é intensa e variável, e seu escoamento na matéria ionizada emite uma radiação cujo espectro é característico do meio onde se encontra. Esse fenômeno provoca um barulho intenso devido à grande expansão da matéria e emana um calor excessivo.

No caso dos disjuntores, caso o arco não seja extinto rapidamente, a alta temperatura e os efeitos da radiação provocados por este fenômeno podem acarretar em sérios danos ao equipamento, inclusive comprometendo sua performance de forma definitiva.

### **8.2. Formação e extinção**

No campo teórico, para que um disjuntor consiga realizar com sucesso a interrupção de uma corrente alternada de maneira ideal, é preciso que ele passe diretamente do estado condutor ao estado isolante no exato momento da passagem da corrente por zero. Dessa forma, sua resistência deve passar do valor zero a infinito em um intervalo de tempo infinitesimal. Neste caso, o disjuntor deve ser capaz de absorver toda a energia liberada pelo arco antes do corte e suportar a TTR – Tensão Transitória de Restabelecimento, presente nos terminais de contato e que pode provocar uma ruptura dielétrica.

Para efeitos de ilustração, tomemos como exemplo o caso de um curto-circuito em uma dada rede elétrica com indutância natural  $L$  ( $R$ ,  $C$  irrelevantes). A energia armazenada será, então, igual a  $\frac{1}{2} L i^2$ , e a sobretensão será  $L \frac{di}{dt}$ .

No entanto, na prática, conceber um disjuntor que consiga interromper a corrente no momento preciso de sua passagem pelo zero natural é impossível. Para se ter uma idéia do nível da corrente a ser interrompida, no caso de uma corrente de curto-circuito de alta tensão de 10 kA, 50 Hz, a 1 ms antes do zero seu valor é de 3 kA e a 0,1 ms, ainda vale 300 A. Portanto, conseguir cortar a corrente no exato instante em que ela passa por zero sem que haja qualquer efeito de tensão ou eletromagnetismo é simplesmente irrealizável.

Devido à impossibilidade de atender as condições ideais, a manobra de abertura de disjuntor com o objetivo de cortar a corrente elétrica leva sempre à formação de um arco elétrico entre os seus contatos principais. No interior do disjuntor, a técnica para eliminar o arco elétrico é baseada em três fatores:

- Redução da temperatura;
- Alongamento do arco elétrico;
- Velocidade de abertura dos contatos.

Para melhor compreender os fenômenos da formação e extinção do arco elétrico, o processo de corte no interior da câmara de extinção de um disjuntor será dividido em três etapas.

### **8.2.1. O período pré-arco**

Conforme explicado, a formação do arco elétrico se dá pela ionização de um meio isolante e é facilitada pela proximidade entre as superfícies condutoras. A ionização do meio no interior de um disjuntor ocorre de três diferentes formas:

- Ionização elétrica (eletromagnética), devido ao campo elétrico formado pela separação dos contatos;
- Ionização mecânica ou por choque, devido à colisão de elétrons;
- Ionização térmica, devido às altas temperaturas entre os contatos.

Quando do movimento de abertura do disjuntor, seja ele por uma ordem do controlador ou pelo surgimento de um defeito no circuito, os contatos principais, ao

se separarem, provocam a ruptura dielétrica da região entre eles. O fato da corrente elétrica alternada ser interrompida de forma brusca leva a uma alta variação de  $\frac{di}{dt}$ , o que resulta em uma sobretensão  $L \frac{di}{dt}$  na indutância própria do circuito.

Esse fenômeno provoca, então, o começo da ionização do meio. Inicialmente, enquanto os contatos de arco ainda se tocam, nos instantes que precedem a sua separação, devido à diminuição da área de passagem da corrente, a densidade da corrente aumenta rapidamente, provocando um súbito aumento da temperatura dos contatos. Inicia-se, portanto, um processo de ionização térmica do meio que os circunda.

Ao se separarem, o meio já se encontra suficientemente ionizado para formar o arco elétrico e forçar a continuação da passagem da corrente. O meio passa a ser, então, progressivamente ionizado, não só pela componente térmica, mas também pela componente eletromagnética devido ao campo elétrico formado pela separação dos contatos e pela componente mecânica devido aos choques ocasionados entre os íons acelerados por esse mesmo campo elétrico e as moléculas e/ou átomos do meio.

Assim, o meio, que inicialmente era isolante, torna-se um gás ionizado denso de elétrons. Devido a este fenômeno de ionização, a ruptura dielétrica e a aparição do arco manifestam-se imediatamente, dando continuidade ao circuito.

O arco que aparece é constituído de uma coluna de plasma composta de íons e elétrons provenientes do meio intracontatos, ou dos vapores metálicos liberados dos eletrodos. Os elétrons liberados veiculam a corrente no arco e mantêm o mecanismo de ionização. Os íons positivos contribuem também para o transporte da corrente, mas em uma escala muito inferior em comparação aos elétrons, cuja mobilidade é bastante superior, devido à enorme relação de massa.

### **8.2.2. O período de arco ativo e extinção**

Quando os contatos do disjuntor se separam, a região entre eles é submetida a um forte campo elétrico devido à diferença de potencial entre o pino energizado e a tulipa com potencial zero. Além disso, a temperatura do meio já se encontra muito elevada devido ao aumento da densidade de corrente a poucos instantes antes da separação. Sendo o arco um ótimo condutor a altas temperaturas (10.000 K), é

possível que a corrente decaia até seu primeiro 'zero' e consuma por si só a energia armazenada nas indutâncias do circuito. É necessário, portanto, resfriar o arco para que o meio se torne novamente isolante.

A tensão entre os dois contatos, chamada 'tensão de arco', resultante da resistência do arco e as quedas de tensão de superfície (tensões catódicas e anódicas) depende da natureza do arco, e é influenciada pela intensidade da corrente e pelas trocas térmicas com o meio (materiais que constituem o disjuntor). Estas trocas térmicas, que ocorrem por radiação (50%), convecção e condução, são características da potência de resfriamento do equipamento.

Como já mencionado, para extinguir o arco elétrico o disjuntor deve, então, resfriar o meio. O resfriamento provoca o decréscimo tanto da ionização quanto da condutância, a partir da recombinação dos íons e elétrons, obtendo partículas eletricamente neutras.

A ionização diminui naturalmente conforme a corrente do arco se aproxima do zero. Portanto, o disjuntor deve ser projetado aproveitando-se deste fato, de modo a concentrar seus esforços de resfriamento do meio no momento em que a corrente se aproxima do zero para ter seu trabalho facilitado. Cada tipo de disjuntor utiliza-se de uma técnica específica para realizar este resfriamento e, conseqüentemente, a extinção do arco, o que será visto, mais a frente, em detalhes.

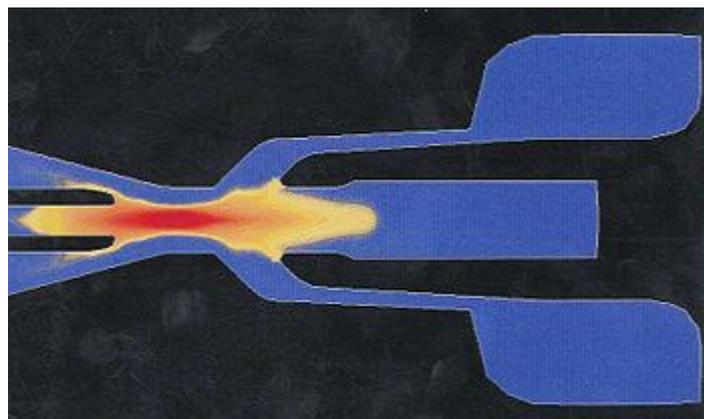


Figura 28 – Arco entre os contatos de um disjuntor [8]

### 8.2.3. O período pós-arco

Para garantir o sucesso da extinção, é necessário que o aumento da tensão permaneça abaixo de certo valor crítico. Esse é o momento da primeira 'corrida', a energética, entre a liberação e a absorção de energia. Como existe ainda uma

condutância residual, ao ser aplicada uma tensão, pode surgir uma corrente de pequena amplitude, denominada corrente pós-arco. Esta tensão é chamada de tensão transitória de restabelecimento (TTR), que surge entre os contatos principais quando o arco é extinto. O disjuntor deve permitir que a resistência do meio aumente rápido o suficiente para que a potência dissipada pela corrente pós-arco seja sempre inferior à potência de resfriamento do equipamento.

No entanto, se a potência dissipada pelo efeito Joule for superior à capacidade de resfriamento característica do disjuntor, o meio não será mais resfriado. Isto é, se o valor da condutância não for suficientemente baixo ou a taxa de crescimento da tensão aplicada for elevada demais, a potência dissipada pela corrente pós-arco pode ser suficiente para reaquecer o meio. Quando isso ocorre, tem-se o reinício do arco entre os dois contatos, o que representa um fracasso térmico do corte. A maioria dos disjuntores é projetada para evitar a reignição do arco após a primeira passagem da corrente por zero depois da separação dos contatos.

Atingir seu objetivo na fase térmica, no entanto, não garante ao disjuntor êxito no processo de interrupção. Após a extinção no zero da corrente e o sucesso térmico da extinção, existe ainda uma última etapa para que ele obtenha sucesso no corte.

Esse último estágio é a 'corrida' dielétrica, entre as velocidades de regeneração dielétrica e da tensão transitória de restabelecimento (TTR). Após a fase térmica, o valor da TTR continua aumentando até atingir seu pico máximo. O aumento da tensão entre os contatos principais do disjuntor provoca a ionização do meio novamente. Se a velocidade de reionização devido a esta tensão for superior à de desionização por conta do resfriamento, ocorre novamente a formação do arco, representando um fracasso dielétrico. Renovam-se, então, os fenômenos até o momento em que o campo elétrico não forneça mais nenhuma tensão de reionização.

Caso contrário, se a velocidade de regeneração dielétrica for mais rápida que a da TTR, o meio torna-se isolante e o corte é dito bem-sucedido.

O aumento da rigidez dielétrica do meio realizado através da desionização da zona de arco pode ser obtido por dois processos distintos:

- Recombinação de íons positivos e elétrons por convecção (devido ao jato de gás) e por condução (forçando o arco contra superfícies de resfriamento), na zona em que a temperatura é reduzida.
- Por difusão e ejeção de partículas ionizadas para fora do espaço entre os contatos devido ao movimento de gás sobre pressão.

Portanto, no caso da reparação do arco, existem dois tipos de fracassos:

- Reignição, se ocorrer no quarto de período seguinte ao zero da corrente, sendo considerado um fracasso térmico;
- Reinício, se ocorrer após este intervalo, sendo considerado um fracasso dielétrico.

A Figura 29 ilustra o comportamento da tensão e da corrente em uma fase do disjuntor quando da interrupção de uma corrente de curto-circuito.

Nesta figura, observa-se claramente, a partir do momento em que o curto-circuito é aplicado:

- A evolução da corrente enquanto a tensão cai para o valor zero;
- O momento em que os contatos se separam e o conseqüente estabelecimento do arco elétrico;
- A extinção do arco e eliminação da falta.

Na figura, existem dois tipos de tensão além da tensão aplicada pela rede. A primeira é a tensão transitória de restabelecimento (TTR), vista no capítulo 7. A segunda é a tensão de restabelecimento (*Restriking Voltage*), que é a tensão que surge através dos terminais de um disjuntor após a interrupção e extinção do arco e o fim do período oscilatório.

Pode-se notar ainda que há uma deformação da corrente de curto-circuito antes da separação dos contatos, quando ela não se comporta como uma senóide. Isso ocorre devido ao surgimento da componente simétrica e, principalmente, da componente assimétrica da corrente DC.

Existem três intervalos bastante distintos no processo de interrupção de uma corrente por parte de um disjuntor. A Figura 30 representa respectivamente a evolução da corrente, tensão e energia durante o corte de uma corrente.

O primeiro intervalo a ser observado se estende desde a separação dos contatos principais até o momento da extinção do arco elétrico (trecho AB). Conforme já explicado anteriormente, este é o intervalo em que ocorre a ionização

do espaço entre os contatos principais do disjuntor e que existe o arco elétrico. Durante esse intervalo, o disjuntor é submetido aos esforços da energia do arco e aos efeitos eletrodinâmicos da corrente.

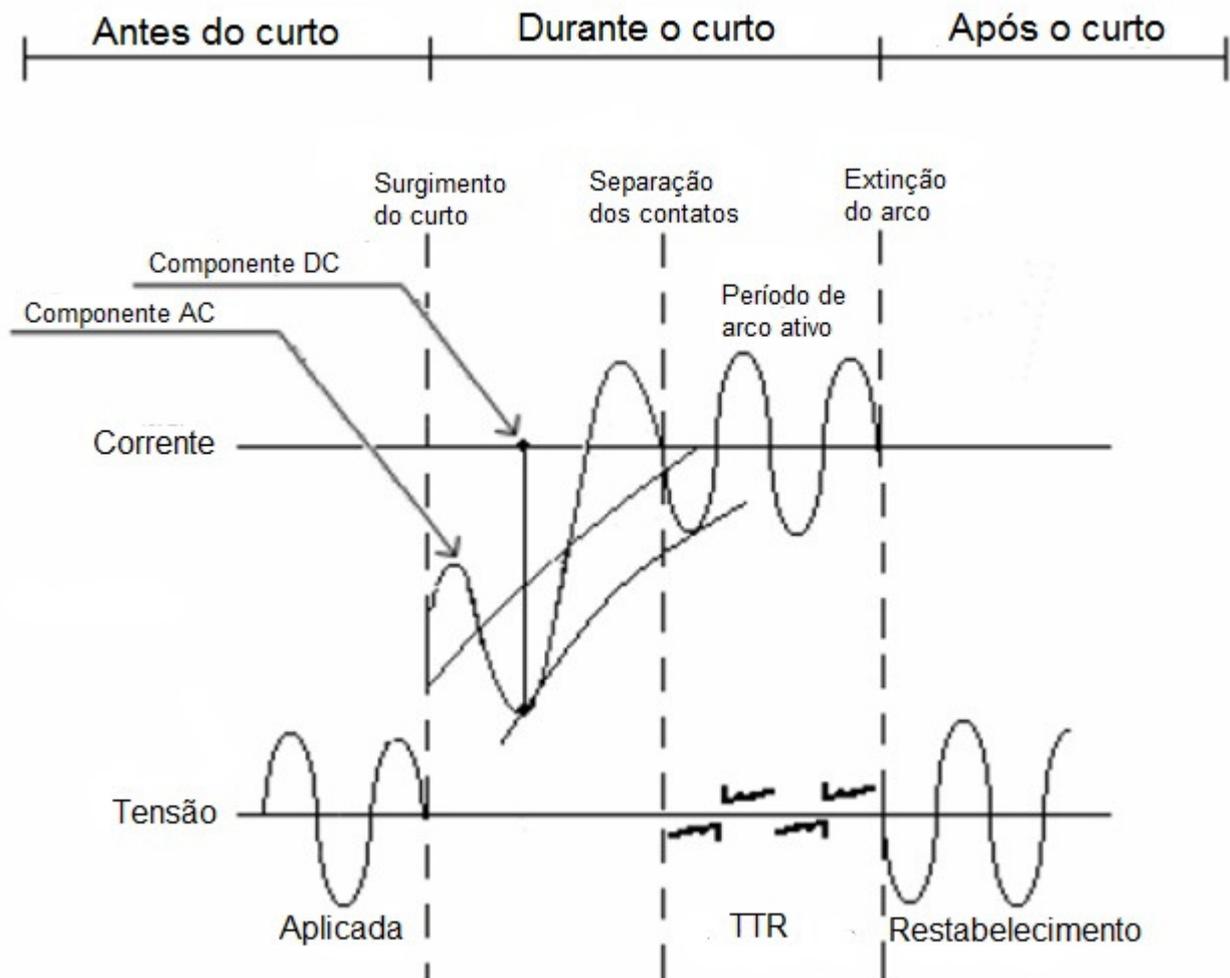


Figura 29 – Características dos períodos de interrupção de uma corrente de curto-circuito [10]

O segundo intervalo ocorre com a aproximação da corrente do zero natural e vai até o aparecimento da TTR nos terminais do disjuntor (trecho BC). Não se pode definir com precisão o momento em que se inicia e termina este intervalo. Apesar de se estender somente por algumas dezenas de microssegundos, durante o período em que a corrente tende a zero e, conseqüentemente, o acréscimo de energia é desprezível, é durante este intervalo que será definido o resultado da primeira 'corrida' do disjuntor, a energética.

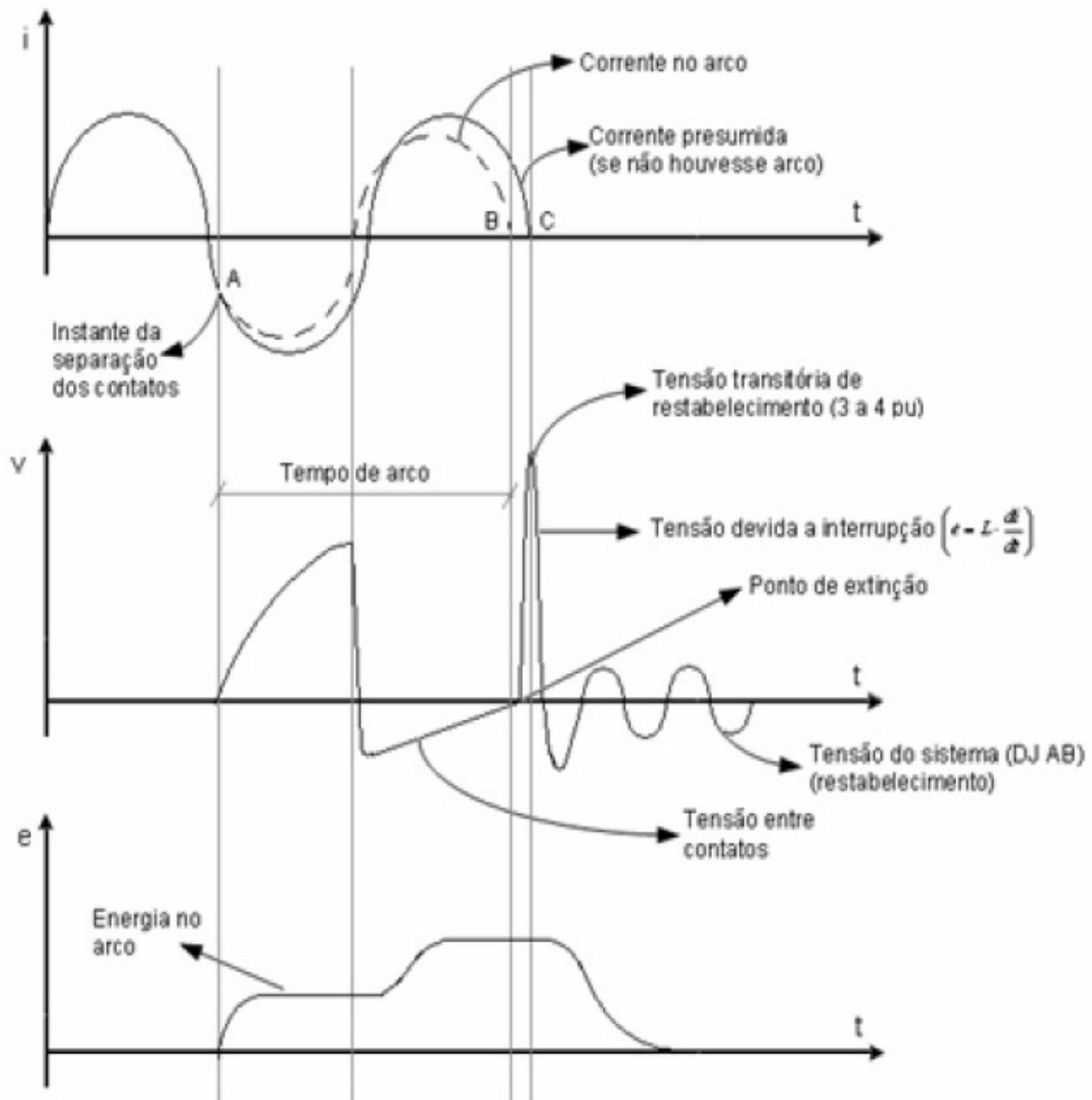


Figura 30 – Processo de interrupção de corrente em um disjuntor [10]

É durante este momento que o disjuntor concentra seus esforços em resfriar o arco e desionizar o espaço entre os contatos. No caso do disjuntor ideal, a ionização é nula neste instante e sua resistência passa do valor zero a infinito.

No entanto, no caso real dos disjuntores, ocorre uma ionização residual que determinará a capacidade do disjuntor suportar a TTR inicial, o que pode ocorrer de três diferentes maneiras.

- 1º Caso

O disjuntor se mostra capaz de desionizar suficientemente o meio e consegue suportar a TTR inicial. Assim, o meio torna-se isolante outra vez, extingue-se, então, o arco elétrico e inicia-se o período pós-arco sem o surgimento da corrente pós-arco.

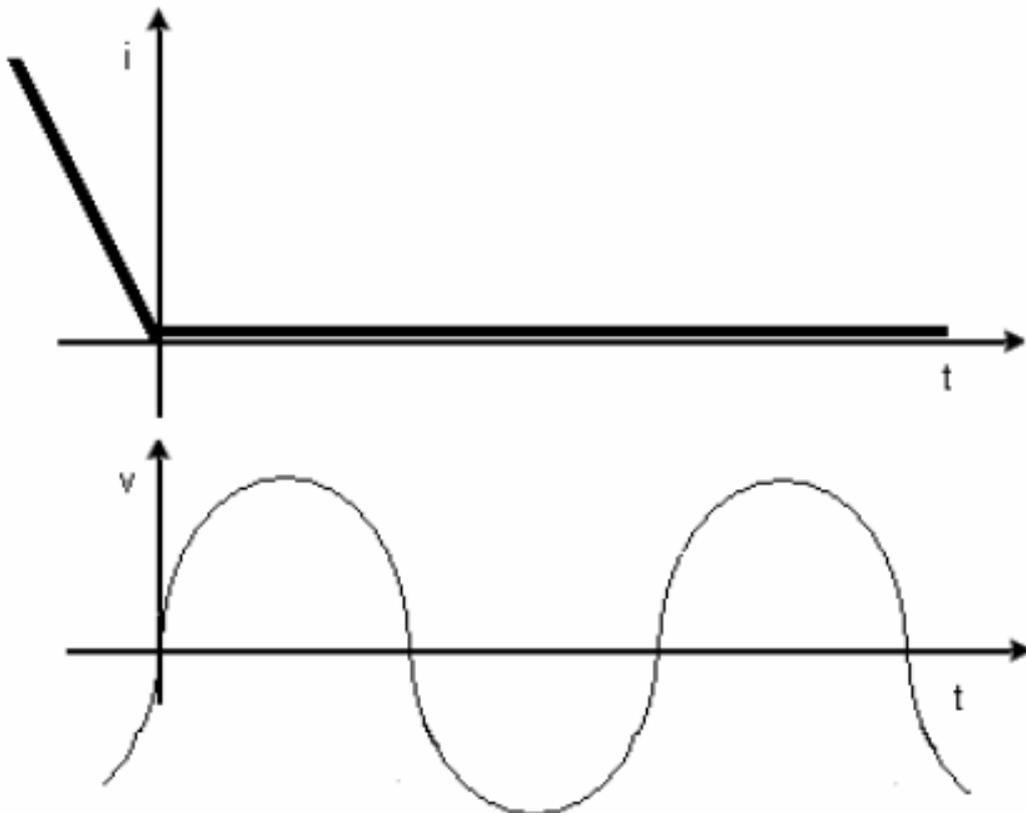


Figura 31 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo para uma interrupção [10]

- 2º Caso

O disjuntor não é capaz de desionizar suficientemente o meio. A potência de resfriamento do disjuntor é inferior à potência dissipada no meio pelo efeito Joule, ocasionando em um fracasso térmico do corte. Ao se aplicar a TTR inicial, surge a corrente pós-arco cuja potência dissipada provocará o aquecimento do meio, dando reinício ao arco entre os contatos principais do aparelho.

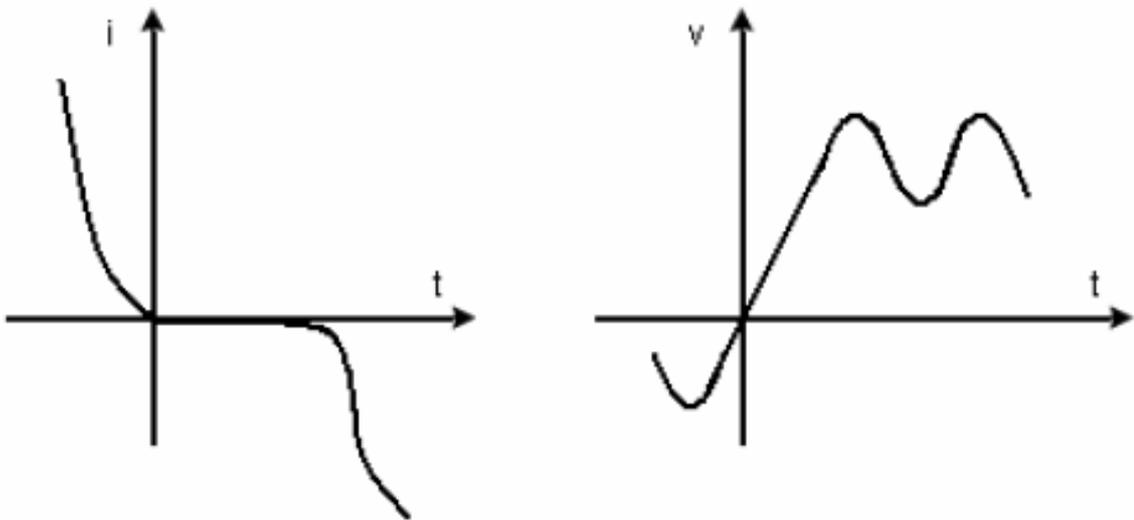


Figura 32 – Curvas de tensão e corrente para uma reignição térmica [10]

- 3º Caso

Trata-se de um caso intermediário entre os dois outros possíveis, sendo muito raro, mas que ocorre nos ensaios em torno da corrente de zero. Ao se aplicar a TTR inicial, surge uma corrente pós-arco. No entanto, por ter uma intensidade muito baixa, não é capaz de dissipar uma quantidade de energia suficiente para reaquecer o meio e provocar a reignição do arco, sendo extinta novamente pelo disjuntor.

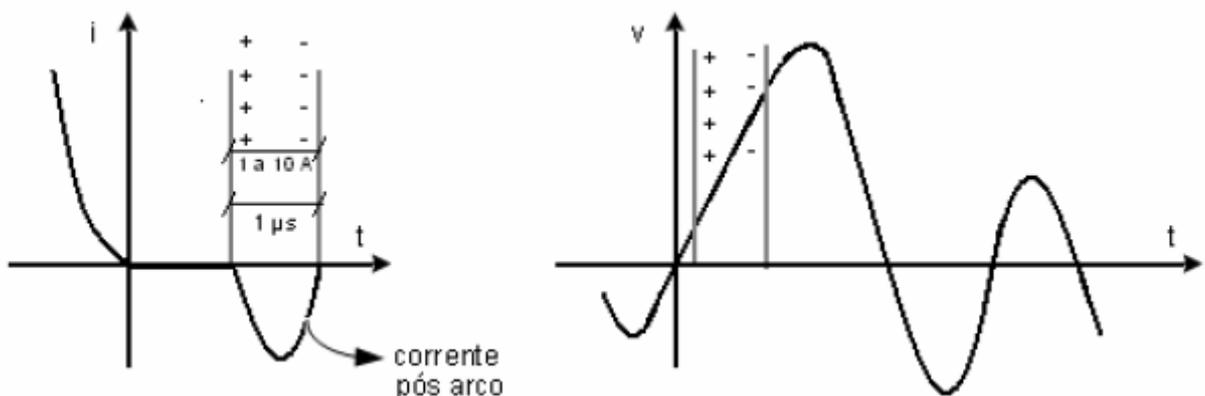


Figura 33 – Curvas de corrente e tensão para uma interrupção de corrente pós-arco [10]

O terceiro e último intervalo que deve ser destacado se inicia juntamente com a TTR, e continua enquanto o disjuntor se mantém aberto. Essa é a região onde ocorre a 'corrida' dielétrica. Após suportar o início da tensão sem permitir a reignição do arco, o disjuntor deve ser capaz de suportar a diferença de potencial entre os

contatos sem permitir que o meio volte a se tornar condutor, ou seja, sua velocidade de regeneração dielétrica deve ser mais rápida que a da TTR.

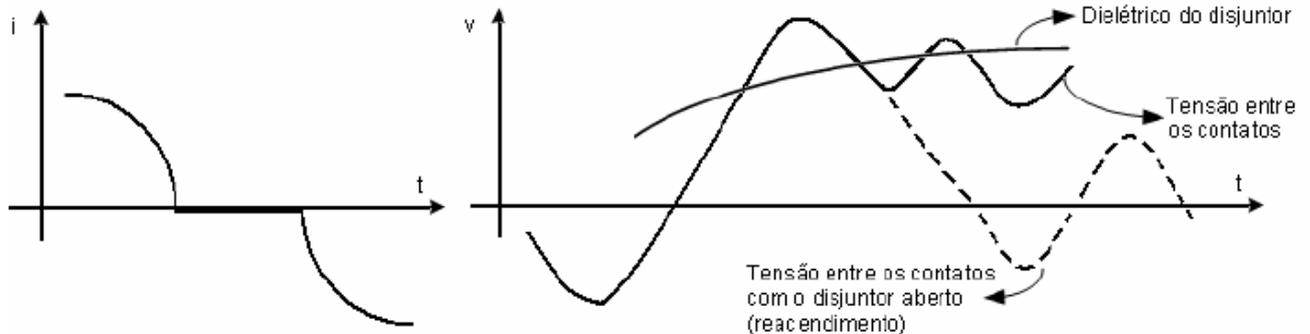


Figura 34 – Comparação das curvas de corrente e tensão com o dielétrico do disjuntor [10]

É admissível, embora não seja desejado, que a curva de dielétrico seja pouco inferior ao primeiro pico da TTR. Entretanto, isso não é admissível para os picos seguintes.

### 8.3. Técnicas de interrupção

Até o momento foram explicadas a formação e a extinção do arco elétrico no interior da câmara de interrupção de um disjuntor, a evolução da corrente e da tensão no equipamento durante o processo de eliminação de um curto-circuito no sistema e as características construtivas para a concepção de disjuntores que utilizam as técnicas de extinção mais comuns. Seguem, em mais detalhes, explicações sobre cada uma dessas técnicas.

#### 8.3.1. Extinção do arco elétrico em disjuntores a óleo mineral isolante

O óleo mineral isolante é utilizado em dois equipamentos similares, os disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO) e os disjuntores a grande volume de óleo (GVO). Conforme explicado, devido ao movimento de abertura do disjuntor, a densidade de corrente que passa pelos contatos principais aumenta. Conseqüentemente eleva-se também a temperatura, pela diminuição da área de contato entre eles. Esse aumento da temperatura levará ao aquecimento do óleo isolante onde os contatos de arco estão mergulhados, ionizando o meio, além de poder ocasionar, já neste estágio, a formação de vapor de óleo.

Geralmente, a vaporização do óleo tem início somente após a separação dos contatos principais. Como neste instante o meio já se encontra ionizado, pela diferença de potencial o arco elétrico é formado na região, o que faz com que a temperatura se eleve ainda mais. Dessa forma, a energia do arco desencadeia o processo de vaporização do óleo.

Muitos são os gases gerados pela decomposição do óleo. O mais importante deles é o hidrogênio ( $H_2$ ), mas ocorre também a formação de oxigênio ( $O_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), etano ( $C_2H_6$ ), eteno ( $C_2H_4$ ) e metano ( $CH_4$ ). A quantidade de cada um dos gases produzidos depende da magnitude e da duração do arco elétrico.

O princípio fundamental da extinção do arco utilizando este tipo de tecnologia é baseado na utilização dos gases produzidos com duas diferentes funções:

- Resfriar o arco, uma vez que a maioria deles possui um efeito refrigerante bastante acentuado
- Aumentar a pressão em torno do arco, elevando o gradiente de tensão necessário para sua manutenção

Dentre as diferentes técnicas que utilizam esses princípios, duas em especial devem ser aqui destacadas pelo avanço que representaram no uso desta tecnologia com relação aos disjuntores a óleo anteriores.

- *Cross Blast*

A técnica do *cross blast*, também conhecida como *cross jet* ou sopro transversal, utiliza-se do aumento da pressão no interior da sua câmara de extinção para alongar o arco elétrico.

Conforme os contatos de arco se afastam um do outro, são descobertas algumas aberturas instaladas somente de um lado da câmara de extinção. Com o intuito de aliviar a alta pressão no seu interior, os gases são expelidos por essas aberturas, alongando dessa forma o arco. O arco é, então, forçado contra as paredes da câmara de extinção que se encontram a uma temperatura mais baixa que a região entre os contatos principais.

No momento em que a corrente se aproxima do zero e a quantidade de energia liberada pelo arco diminui acintosamente, ocorre uma queda de temperatura na coluna de arco. Assim, os gases são desionizados, aumentando a

suportabilidade dielétrica entre os contatos. O disjuntor vence as ‘corridas’ térmica e elétrica, prevenindo, portanto, a reignição e o reinício do arco elétrico.

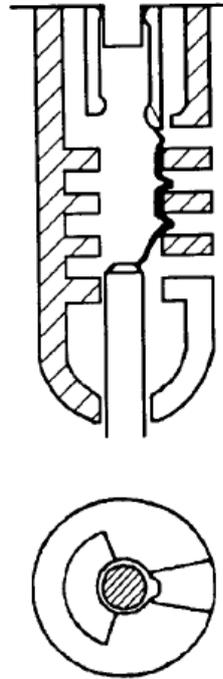


Figura 35 – Câmara de extinção tipo *cross blast* [10]

- *Axial Blast*

Sendo referida também em português pelo nome de sopro axial, a técnica do *axial blast* ao invés de alongar o arco elétrico como no caso anterior, baseia-se na expulsão dos gases ionizados da região entre os contatos principais para extinguir o arco elétrico.

A idealização desta técnica é muito similar à anterior. Da mesma forma que ocorre no caso do *cross blast*, os contatos de arco revelam aberturas no interior da câmara de extinção ao se afastarem. A grande diferença se dá pelo fato de que as aberturas neste caso são simétricas ao longo da câmara. Aumenta-se, desta forma, a área de escape dos gases, favorecendo o resfriamento e a desionização da região entre os contatos através da exaustão. O arco elétrico, no entanto, permanece na posição axial, sem ser forçado contra as paredes da câmara.

Assim como anteriormente, reduz-se a temperatura e aumenta-se a suportabilidade dielétrica. Ao extinguir o arco quando seu valor se aproxima do zero, o disjuntor não permite que ele se forme novamente entre seus contatos.

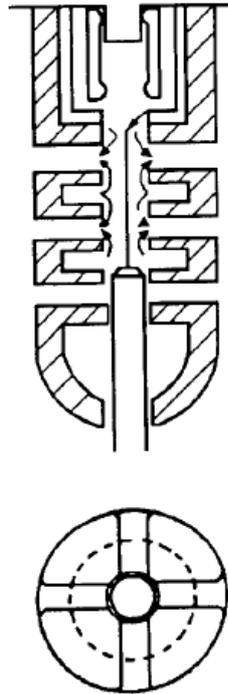


Figura 36 – Câmara de extinção tipo *axial blast* [10]

### 8.3.2. Extinção do arco elétrico em disjuntores a ar comprimido

As câmaras de extinção dos disjuntores a ar comprimido utilizam ar natural como meio isolante entre os contatos para extinguir o arco. Este aparelho proporciona ar na quantidade e pressão necessárias para realizar esta função.

O princípio de extinção empregado em equipamentos desta natureza é bastante simples. A partir de uma fonte pressurizada de ar, o método baseia-se em criar um fluxo de ar sobre o arco suficiente para resfriar a região entre os contatos ao mesmo tempo em que expulsa o ar ionizado que ali se encontra. Diferentemente da maioria dos disjuntores, o meio ionizado, conforme é expelido, pode ser descartado diretamente para a atmosfera sem qualquer tipo de tratamento por não se tratar de material danoso ao meio ambiente, o que confere uma grande vantagem em termos econômicos a este tipo de disjuntor, embora isto possa se constituir em desvantagem devido ao incômodo do ruído que sua operação provoca.

Em disjuntores a ar comprimido, quando o arco elétrico se estabelece entre seus contatos principais, devido ao movimento de abertura para a interrupção de uma corrente, é emitido um sopro de ar na direção longitudinal dos contatos e pelo seu interior. A expulsão do ar se dá pela abertura das válvulas de sopro para a atmosfera, estabelecendo, dessa forma, um fluxo de ar comprimido no interior da

câmara de extinção do disjuntor, o que provocará o resfriamento e a desionização do meio pela substituição do ar, anteriormente ionizado, por 'ar fresco'.

Existem dois tipos de técnicas para a extinção de arco em equipamentos deste tipo, ambas utilizando-se do mesmo princípio, conforme descrito acima.

- *Mono blast*

Este tipo de construção conta com uma câmara de sopro axial em uma única direção. Esta é uma das técnicas mais simples de extinção dentre todos os disjuntores. Conforme descrito, a partir da abertura das válvulas de sopro para a atmosfera, o ar que se encontra pressurizado nas câmaras de ar comprimido é canalizado em sentido longitudinal na direção do contato móvel, expelindo o ar ionizado e resfriando o meio. Assim, o disjuntor é capaz de vencer tanto a 'corrida' térmica quanto a dielétrica, extinguindo o arco e interrompendo a corrente.

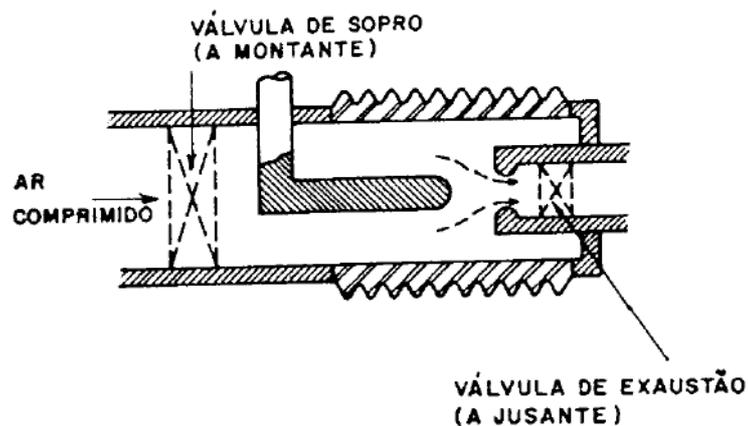


Figura 37 – Câmara de extinção tipo *mono blast* [4]

- *Duo blast*

Esta técnica, na realidade, é uma otimização do *mono blast*. Ao invés de contar com um sopro em uma única direção, sua construção estabelece um sopro duplo, tanto na direção do contato fixo quanto do móvel. Este sistema eleva consideravelmente a capacidade de resfriamento e da taxa de crescimento da suportabilidade dielétrica. Portanto, nos disjuntores em que é aplicada a técnica tipo *duo blast*, a eficiência é bastante aumentada.

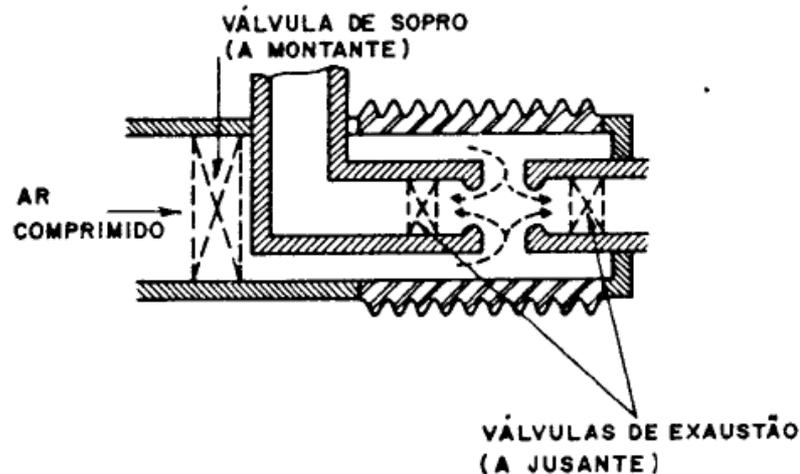


Figura 38 – Câmara de extinção tipo *duo blast* [4]

### 8.3.3. Extinção do arco elétrico em disjuntores a vácuo

A possibilidade de se formar um arco elétrico no vácuo, a princípio, pode parecer contraditória, pois, conforme foi explicado, para que o arco se estabeleça é necessário que exista um meio ionizado, o que, em princípio, seria impossível neste caso.

Devido à alta temperatura a que os contatos principais são submetidos quando do movimento de abertura do disjuntor, por conta do aumento da densidade de corrente, ocorre uma emissão de metal líquido dos contatos. Esta nuvem de partículas metálicas é formada por elétrons e íons, que servem de caminho para que o arco elétrico se estabeleça e se fixe nos contatos de arco.

Conforme o disjuntor dá continuidade à sua manobra de abertura e os contatos se afastam um do outro, as pontes metálicas tendem a diminuir. Quando a corrente se aproxima do zero, o arco é extinto e, assim que a corrente é interrompida, essas partículas se depositam rapidamente sobre a superfície dos contatos. O disjuntor, conseqüentemente, recupera sua rigidez dielétrica, o que ocorre a uma velocidade bastante elevada. A ausência de íons logo após a interrupção da corrente faz com que as características do disjuntor a vácuo se aproximem do ideal no que diz respeito à suportabilidade dielétrica.

Existem dois tipos de arco elétrico que podem se propagar em disjuntores a vácuo. Em ambos os casos o método de extinção empregado é o descrito acima. Os tipos de arco possíveis são:

- Arco difuso

Este tipo de arco, que se distribui por toda a superfície dos contatos do disjuntor, ocorre quando da interrupção de pequenas correntes (até aproximadamente 10 kA). A formação deste tipo de arco ocorre devido à microrrugosidade presente na superfície dos contatos. Os pontos um pouco mais salientes serão os últimos a perderem contato quando do movimento de abertura. Formam-se, então, diversos pequenos arcos que se fixam nesses pontos. Esses inúmeros arcos paralelos dão origem ao chamado arco difuso.

A microrrugosidade referida é, de fato, microscópica. Para todas as análises, os contatos de arco são considerados lisos.

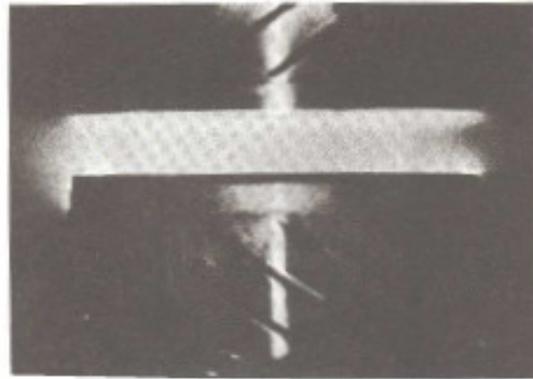
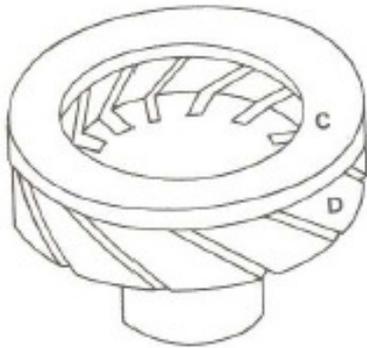


Figura 39 – Contato de um disjuntor a vácuo e o arco difuso [11]

- Arco contraído

Para valores de corrente superiores a 10 kA, outra forma de arco se estabelece neste tipo de disjuntor, o chamado arco contraído. A formação deste tipo de arco, substituindo o anterior, ocorre devido ao aumento do campo magnético dos diversos arcos paralelos e, conseqüentemente, de sua atração mútua, provocada pelo aumento da corrente. Desta forma, os focos de emissão de íons se unem, formando um único foco e contraindo-se.

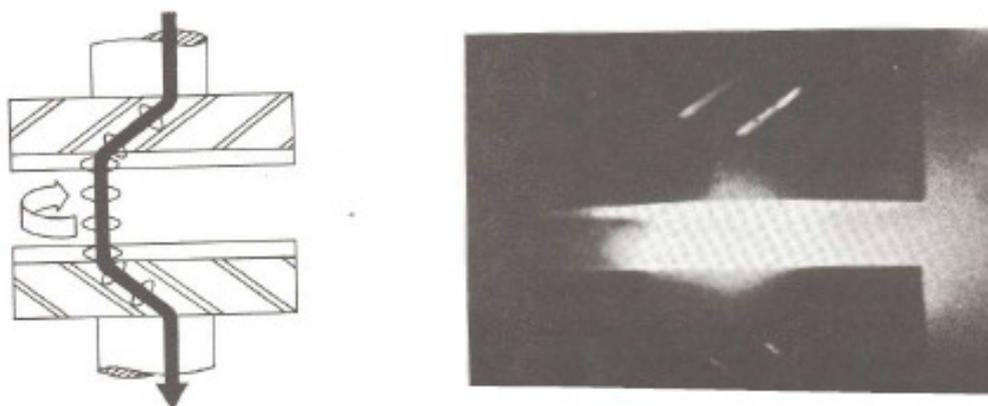


Figura 40 – Arco contraído e seu deslocamento no interior do contato [11]

Observando-se atentamente as duas figuras (39 e 40), pode-se notar uma diferença quanto à luminosidade dos arcos entre os contatos do disjuntor. O arco do tipo difuso apresenta uma configuração mais espalhada, se estendendo ao redor de todo o contato de arco e fazendo com que a luz emitida seja de uma intensidade mais fraca. Já o arco do tipo contraído se concentra no centro entre os dois contatos. Como se pode notar, a luminosidade emitida por este tipo de arco é muito mais intensa e concentrada na região central.

### 8.3.4. Extinção do arco elétrico em disjuntores a SF<sub>6</sub>

#### 8.3.4.1. Propriedades do SF<sub>6</sub>

Antes que sejam apresentados os diferentes métodos de extinção em disjuntores que utilizam SF<sub>6</sub> como meio isolante entre os contatos, será feita uma breve descrição das propriedades do gás em questão.

O gás SF<sub>6</sub>, cujo nome científico é hexafluoreto de enxofre, é um gás sintético que, apesar de ser conhecido desde 1904, só foi utilizado como meio isolante por volta de 1940 e seu uso como meio extintor de arco elétrico foi iniciado somente no ano de 1952. Trata-se de um gás incolor, inodoro, não tóxico, não combustível e extremamente estável devido à sua estrutura molecular simétrica. Com peso molecular igual a 146 g/mol, é um dos gases mais pesados conhecidos e é inerte até cerca de 5.000 °C, fazendo com que se comporte praticamente como um gás nobre.

Do ponto de vista da aplicação em disjuntores, este gás apresenta diversas propriedades físicas e químicas que fazem dele um excelente meio isolante e extintor. Além de ser extremamente estável e inerte, o que lhe confere a capacidade

de não apresentar mudanças químicas a temperaturas em que os óleos isolantes começam a se decompor, mesmo sob a ação do arco elétrico este gás sofre uma lenta decomposição. Nestas condições, são produzidos fluoretos tóxicos de ordem mais baixa, como  $SF_2$  e  $SF_4$ , no entanto, devido à sua alta capacidade de regeneração, estes gases se recombinaem imediatamente após a extinção do arco.

É importante ressaltar, entretanto, que a regeneração não é completa por conta de reações secundárias que também ocorrem entre o gás decomposto e metais vaporizados a partir dos contatos principais devido à alta temperatura no interior do equipamento. Os elementos gerados por estas novas combinações são na maioria fluoretos metálicos, como o de cobre ( $CuF_2$ ) e o de tungstênio ( $WF_6$ ). Esses elementos, apesar de tóxicos, são não condutores e podem ser facilmente removidos sob a ação de filtros de alumina ativada, sem causar maiores danos ao disjuntor. De uma forma geral, esses elementos se acumulam ao redor dos contatos principais sob a forma de um pó branco.

Outra grande qualidade que o  $SF_6$  apresenta para a aplicação em equipamentos dessa natureza é o fato de ser um gás eletronegativo. Dessa forma, possui uma afinidade para se associar aos elétrons livres, fazendo com que íons negativos possuam uma mobilidade bastante reduzida. Assim, quando a corrente se aproxima do zero, a condutância do meio reduz rapidamente, pois a remoção dos elétrons presentes no plasma do arco elétrico ocorre de forma bastante veloz. Vale lembrar que suas características isolantes, assim como as de qualquer fluido com tal propriedade, variam com a densidade, e conseqüentemente com a pressão a que está submetido. A Figura 41 ilustra uma comparação entre a rigidez dielétrica do  $SF_6$ , do ar e do óleo mineral isolante.

Apesar da superioridade deste gás em vários aspectos na utilização em disjuntores, existem também algumas desvantagens consideráveis que devem ser levadas em conta. A primeira delas é a baixa confiabilidade dos compressores de gás, extremamente necessários para assegurar suas propriedades específicas exigidas no projeto. Outra desvantagem é a tendência do  $SF_6$  de se liquefazer quando comprimido a temperatura ambiente. Sua temperatura de liquefação a 16 bar, por exemplo, é de 10 °C. Um terceiro ponto desfavorável se dá no caso de disjuntores de dupla pressão, em que são necessários resistores para aquecer o reservatório de alta pressão.

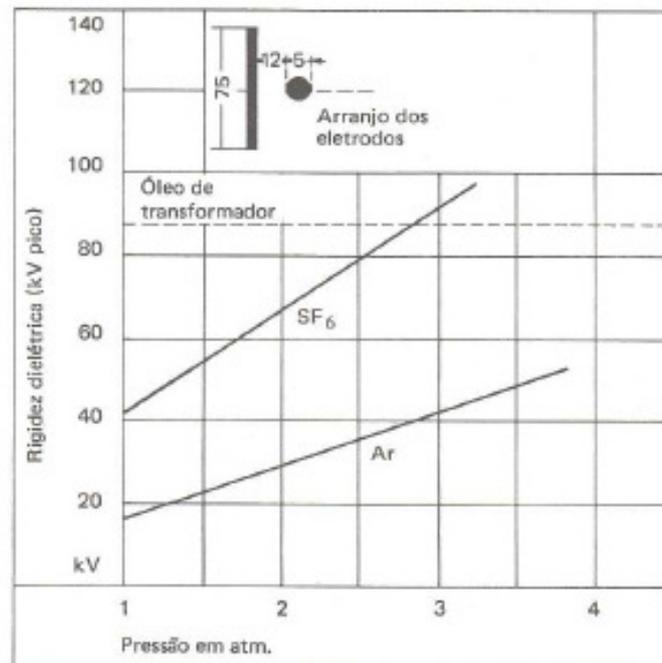


Figura 41 – Rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub>, do ar e do óleo mineral isolante [11]

Além dessas desvantagens nos aspectos construtivos do equipamento, por se tratar de um gás mais pesado que o ar (em torno de 5 vezes superior), são necessários cuidados quando é utilizado em grandes quantidades e em ambientes fechados, pois tende a se acumular em frestas e partes baixas de salas na ocorrência de vazamentos. Ligado ao fato de ser inodoro e incolor, apesar de não ser tóxico, torna-se muito perigoso por poder causar morte por asfixia. Portanto, um dos requerimentos do ambiente onde será instalado um equipamento deste tipo é que seja ventilado para que acidentes desta natureza não ocorram.

A Tabela 2 resume as propriedades do SF<sub>6</sub>.

Tabela 2 – Propriedades do gás SF<sub>6</sub> [10]

<b>Propriedades do SF<sub>6</sub></b>	
<b>Físicas</b>	
Peso molecular	146,05
Temperatura de sublimação, °C °F	-63,9 -83
Melting point a 32.5 psia °C °F	-50,8 -59,4
Densidade a 21°C, 1 atm, g/l a 70 °F, 1 atm, lb/ft <sup>3</sup>	6,139 0,382
Tensão superficial a -20°C, dyn/cm	8,02
Viscosidade	
Líquido a 13.52°C (56.34°F)	0,305
Gás a 31.16°C (88.08°F)	0,0157
Índice de refração a 0°C (32°F), 1 atm, $n_D$	1,000738
Temperatura crítica °K	318,70
Pressão crítica, bars	37,71
Atmosfera	37,22
Volume crítico.	1,356
Solubilidade a 1 atm	
em transformadores a óleo a 27 °C (80.6°F), mL SF <sub>6</sub> / mL óleo em	0,408
água a 24.85 °C (76.73 °F), mL SF <sub>6</sub> / mL água	0,0055
Solubilidade da água em SF <sub>6</sub> , em percentual do peso.	0,0097
<b>Elétrica</b>	
Força dielétrica, em relação ao nitrogênio a 1 atm, 60Hz – 12 MHz	2,3 – 2,5
Constante dielétrica a 25°C (77°F)	1,002
Perdas tangentes (tan $\delta$ ) a 1 atm	$< 2 \cdot 10^{-7}$
<b>Termodinâmica</b>	
Calor de sublimação $cal/g \cdot mol$	5640
Calor de fusão $cal/g \cdot mol$	1200
Calor de vaporização a 25°C, cal/g a 70°F, Btu/lb	28,380 15,767
Calor para formação a 25°C, $kcal/g \cdot mol$	-291,77
Condutividade térmica a 30°C, $cal/s \cdot cm \cdot ^\circ C$	$3,36 \cdot 10^{-5}$

É preciso atentar ainda para as impurezas contidas no SF<sub>6</sub> comercial por conta do processo de fabricação, que podem alterar suas propriedades dielétricas. Algumas dessas impurezas são extremamente tóxicas e podem ocorrer em quantidades tão reduzidas a ponto de não serem detectadas pelos métodos químico-analíticos atuais. Além disso, existem impurezas de natureza ácida e água, que podem provocar corrosão no interior do disjuntor, que reduzem sua capacidade de interrupção, podendo levar inclusive à falha. Um terceiro tipo de impureza é a

eventual presença de oxigênio, nitrogênio e tetrafluorometano (CF<sub>4</sub>). Essas últimas não são desejáveis, mas não provocam qualquer tipo de dano ao equipamento. A Tabela 3 apresenta as impurezas mais comuns e suas respectivas concentrações máximas admitidas.

Tabela 3 – Grupos de impurezas e métodos de determinação [10]

Impurezas ou grupos de impurezas	Concentrações máximas admitidas (massa / massa)	Métodos de determinação descritos na IEC 370
CF <sub>4</sub>	0.05 %	10
O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> e ar	0.05 %	10
Água	15 ppm	9
Acidez em HF	0.3 ppm	12
Fluoretos hidrolizáveis	1.0 ppm	11
Óleo	Está livre de óleo	13

#### 8.3.4.2. Extinção do arco em disjuntores a SF<sub>6</sub>

Seguem explicações sucintas das diversas técnicas utilizadas para a extinção do arco em disjuntores a SF<sub>6</sub>. O princípio utilizado em todos eles é similar ao utilizado em disjuntores a ar comprimido. O objetivo é soprar o gás a fim de estabelecer um fluxo suficiente sobre o arco elétrico com o objetivo de resfriar o meio ao mesmo tempo em que desioniza o gás que se encontra na região entre os contatos. Desta forma o disjuntor é capaz de extinguir o arco e restabelecer a suportabilidade dielétrica, evitando que o arco elétrico se reinicie.

- Disjuntores a SF<sub>6</sub> de dupla pressão

Esta foi a primeira técnica utilizada para equipamentos desta natureza. Inicialmente, a concepção de disjuntores a SF<sub>6</sub> foi baseada no funcionamento dos disjuntores a ar comprimido. O equipamento, como o próprio nome sugere, era composto por duas câmaras distintas, uma de alta e outra de baixa pressão. No de alta pressão, o gás é armazenado a uma pressão em torno de 16 bar. No momento da interrupção, através de uma válvula de descarga, este gás pressurizado é

liberado, estabelecendo o fluxo de SF<sub>6</sub> necessário sobre o arco elétrico, conforme a técnica utilizada nos disjuntores a ar comprimido.

Diferentemente daqueles, no entanto, neste caso o SF<sub>6</sub> não pode ser descartado diretamente na atmosfera. Ao invés disso, é direcionado a um tanque de baixa pressão para que seja utilizado na manutenção do isolamento entre as partes vivas e a terra. Após a interrupção, o gás é bombeado por um compressor novamente para o reservatório de alta pressão.

- Disjuntores a SF<sub>6</sub> a pressão única

Este método, também é chamado de disjuntor do tipo *puffer* ou tipo impulso, surgiu com o objetivo de contornar problemas enfrentados pela primeira técnica utilizada nesse tipo de disjuntor. Neste caso, o gás é mantido em um sistema fechado a pressão única que pode variar de 3 a 8 bar, conforme especificação. Desta forma, o problema gerado pela liquefação do SF<sub>6</sub> a temperatura ambiente é contornado.

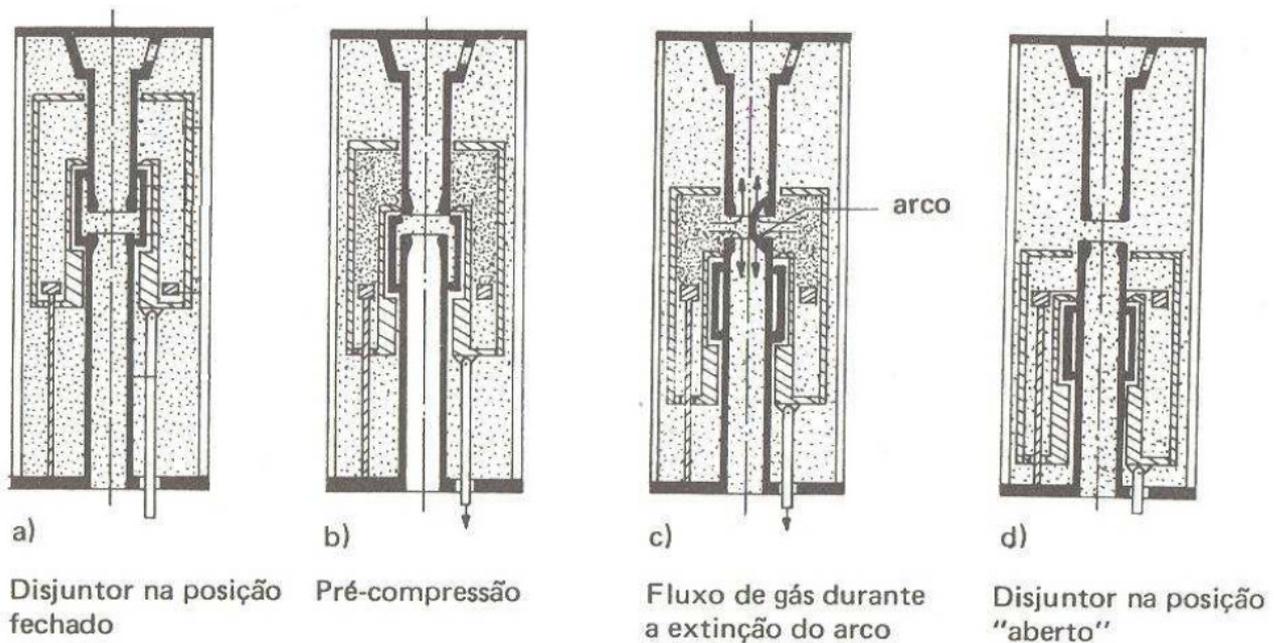


Figura 42 – Sequência de corte em uma câmara a pressão única [11]

Para que seja atingida, então, a pressão necessária para extinguir o arco, foi concebido um dispositivo do tipo *puffer*. Este dispositivo, na verdade, consiste de um pistão e um cilindro que comprime o gás em seu interior ao se mover. Ao se iniciar a manobra de abertura do disjuntor, o contato móvel se movimenta, juntamente com o

cilindro, e o gás é comprimido contra o êmbolo. Conforme seu volume interno diminui, a pressão aumenta. No momento em que os contatos se separam, o arco se estabelece entre os contatos. O gás pressurizado no interior do cilindro é liberado e canalizado para resfriar o meio entre os contatos de forma a extinguir o arco e restabelecer a suportabilidade dielétrica.

Este tipo de projeto é muito mais simples que os de dupla pressão, pois não é preciso instalar aquecedores, sistema de compressor, válvulas, registros, reservatório de alta pressão e outros componentes necessários para geração de alta pressão e injeção temporizada do gás sobre o arco. Neste tipo de construção é possível produzir no interior do cilindro pressões de 2 a 6 vezes a pressão original.

- Disjuntores a SF<sub>6</sub> de dois ciclos

Este tipo de técnica de interrupção é capaz de extinguir o arco em intervalos de tempo muito mais curtos que as anteriores. Como o próprio nome sugere, este tipo de aparelho é capaz de interromper uma corrente de curto-circuito em apenas 2 ciclos. Este tipo de construção é um avanço baseado na técnica de pressão única.

Assim como no caso anterior, durante a manobra de abertura, o cilindro se move contra um êmbolo, que, neste caso, ao invés de ser fixo é, na verdade, um contraêmbolo móvel. Durante o intervalo de abertura em que o gás é comprimido, o contraêmbolo se move em sentido contrário ao do ciclo, aumentando desta forma a quantidade de gás soprada contra o arco elétrico e, conseqüentemente, contribuindo no sentido de resfriar o meio. Ao ser atingido o final da manobra, ele se desloca de volta a sua posição original.

Esta tecnologia surgiu da importância de se interromper rapidamente altas correntes de curto-circuito em redes com tensão nominal superiores a 420 kV. Este requisito é essencial nesses casos devido à necessidade de estabilidade da rede e à existência de geradores que podem vir a alimentar o curto. Nestes tipos de instalações, uma corrente de curto-circuito que leve um intervalo de tempo mais longo para ser cortado pode danificar seriamente os equipamentos a ela ligados, causando sérias conseqüências.

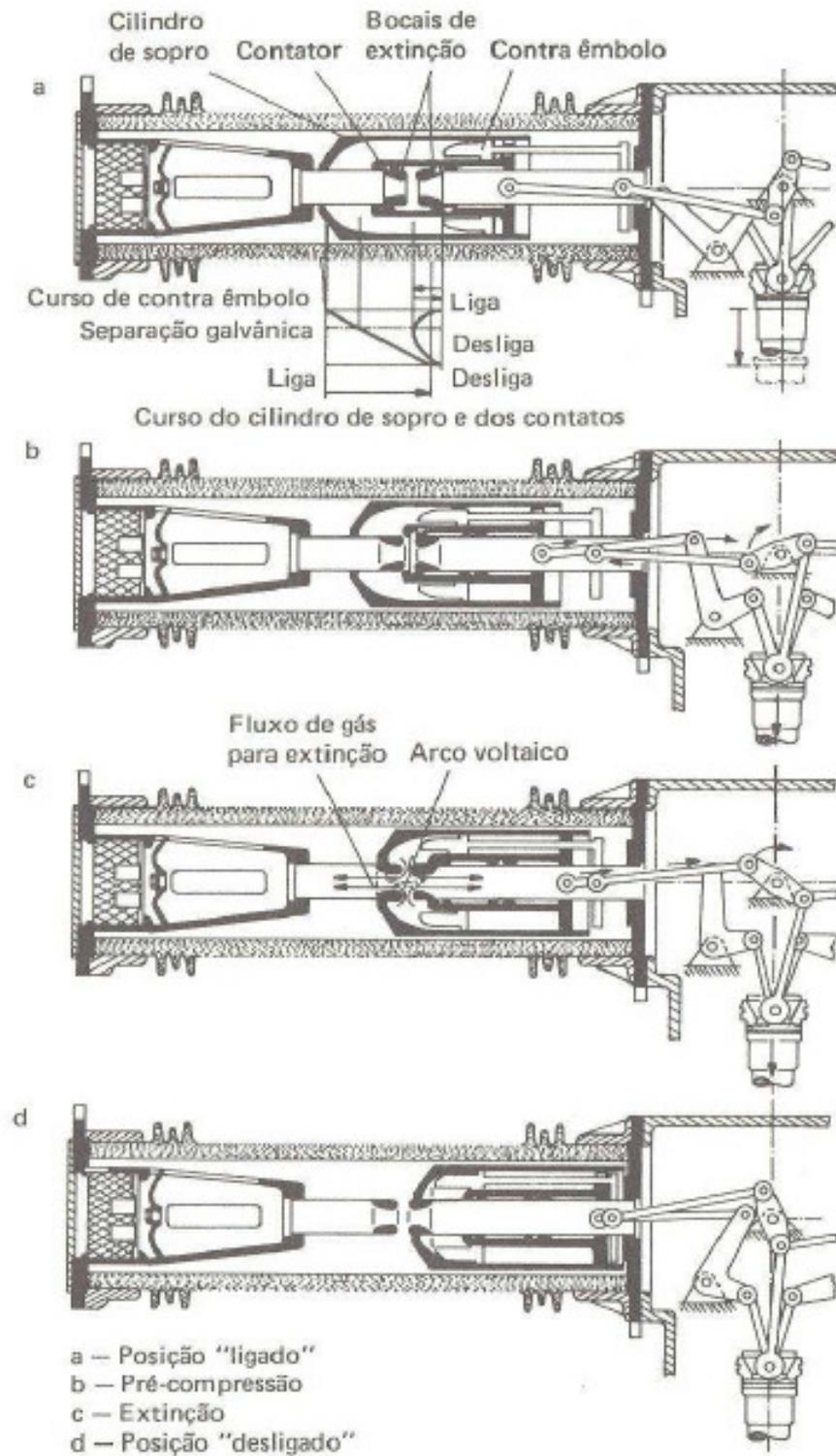


Figura 43 - Sequência de corte em uma câmara de dois ciclos [11]

- *Selfblast*

A idéia principal da técnica de *selfblast* (autossopro, em tradução livre) é de usar a própria energia do arco elétrico para extingui-lo. Trata-se de uma técnica que permite reduzir significativamente a quantidade de energia operacional (mecânica) demandada. No entanto, como depende da energia liberado pelo arco, pode ser aplicada somente para casos de fortes correntes, uma vez que a energia do arco depende diretamente da corrente a ser cortada.

Quando do movimento de abertura do disjuntor para cortar fortes correntes, estabelece-se entre os contatos um arco elétrico que possui uma grande quantidade de energia. A energia desse arco provoca um aumento da temperatura do meio e, conseqüentemente, provoca também um aumento da pressão nesse local.

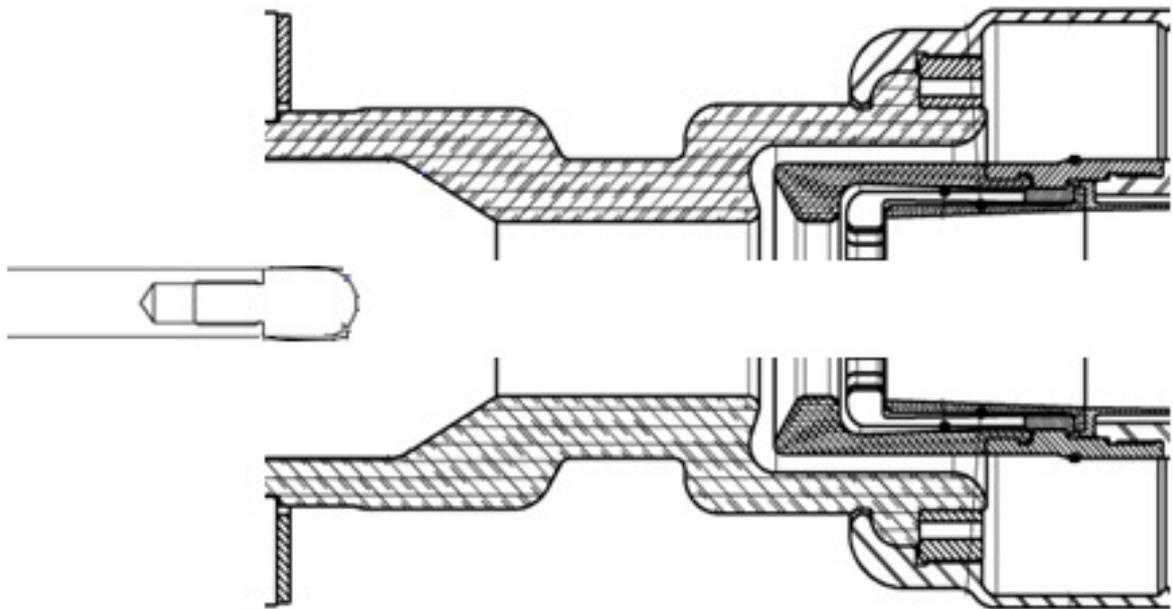


Figura 44 – Câmara de extinção de arco tipo *selfblast* [8]

Uma parte do gás quente soprado devido a essa diferença de pressão entre as regiões é conduzida através de um bocal isolante para o interior de uma câmara denominada volume térmico. Desta forma, uma parte da energia do arco é armazenada no interior desta câmara sob forma de pressão.

Ao aproximar-se do zero de corrente a energia do arco é visivelmente reduzida. No momento do zero a sua energia é muito baixa e, por sobrepressão, o gás situado no interior do volume térmico é soprado para a região intracontatos. A temperatura do gás pressurizado é muito inferior àquela que se encontra na região

entre os contatos de arco. Desta forma, o fluxo de gás criado funcionará para resfriar o meio e, assim, ajudar a extinguir o arco elétrico.

### **8.3.5. Extinção do arco elétrico em disjuntores a sopro magnético**

Disjuntores a sopro magnético diferenciam-se dos outros casos anteriormente apresentados principalmente pelo fato de seus contatos se abrirem no ar. O arco elétrico que se estabelece é então empurrado para o interior da câmara de extinção, onde é posteriormente interrompido.

O princípio de extinção nesse tipo de equipamento é baseado no aumento da resistência do arco no interior da câmara e, conseqüentemente, um aumento também da sua tensão. O processo de aumento da resistência é realizado através de três diferentes modos simultâneos:

- Aumento do comprimento do arco;
- Fragmentação do arco no interior da câmara de extinção em vários arcos menores em série;
- Resfriamento do arco por contato com as paredes da câmara.

Ao passar por uma ou mais bobinas, a própria corrente a ser cortada produz o campo magnético responsável pela condução do arco ao interior da câmara de extinção, por isso a técnica é chamada de sopro magnético. Eventualmente, pode haver também um sopro pneumático para auxiliar neste direcionamento do arco, principalmente nos casos de pequenas correntes, já que, nestes casos, o campo magnético produzido pode não ser suficiente para tal feito.

A Figura 45 a seguir ilustra a extinção de um arco elétrico conduzido ao interior da câmara apenas por um sopro pneumático. Inicialmente, o arco passa dos contatos principais (1) para os contatos auxiliares (2) devido ao sopro pneumático. Em seguida, é conduzido para as inserções metálicas das placas no interior da câmara de extinção (3). O arco é, então, subdividido em diversos arcos menores em série em seu interior (4). Assim, o arco é alongado e resfriado (5), sendo extinto no momento de sua passagem por zero.

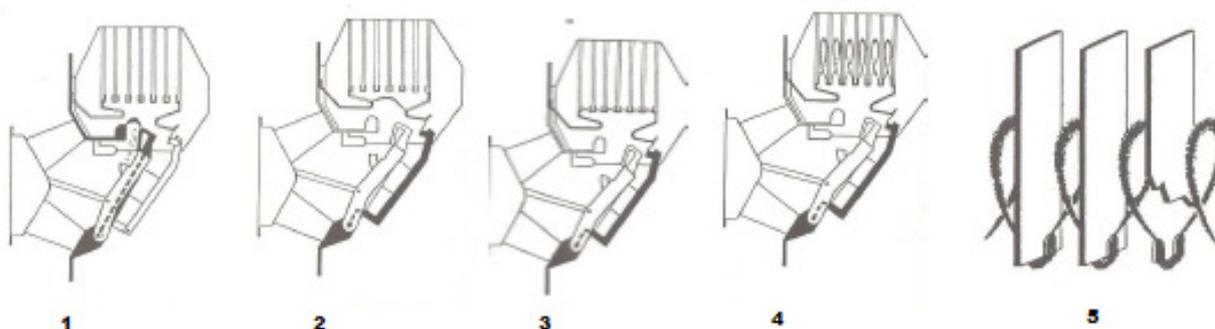


Figura 45 – Sequência de corte de um disjuntor a sopro magnético [11]

### 8.3.6. Extinção do arco elétrico em disjuntores a semicondutores

Por fim, este capítulo não estaria completo se não fosse mencionado o disjuntor a semicondutores. A técnica de interrupção deste tipo de disjuntor é a que mais se aproxima da ideal, principalmente pela ausência de manifestações externas.

A resistência dos semicondutores é caracterizada por passar de um valor muito reduzido para outro consideravelmente superior quase que instantaneamente, quando da passagem da corrente elétrica por zero, exatamente como requerido no caso de um disjuntor ideal. No entanto, nos semicondutor este fenômeno ocorre em temperatura ambiente. Por apresentarem uma inércia térmica extremamente reduzida, esta tecnologia ainda não se mostrou capaz de suportar grandes sobretensões, mesmo sobre curtos intervalos de tempo.

As principais vantagens que esta tecnologia apresenta com relação às outras mais bem conhecidas são:

- Obtenção de condições ideais de interrupção, sem apresentar sobretensões de manobra;
- Ausência de desgastes mecânicos;
- Baixo custo de manutenção;
- Permite determinar previamente o desempenho do equipamento

Existem, entretanto, outros fatores que ainda restringem o uso desta tecnologia. Além do fato de não suportarem grandes sobretensões, outro fator importante é seu custo ainda muito alto de utilização, não sendo ainda economicamente viável substituir as tecnologias mais antigas por esta.

Para solucionar esses problemas, muitos estudos vêm sendo realizados com o objetivo desenvolver dispositivos de sincronização precisos o suficiente, reduzindo as solicitações térmicas a que são submetidos com o objetivo de torná-los mais competitivos.

Pode-se concluir, portanto, que as técnicas de interrupção baseadas em elementos estáticos podem trazer inúmeros benefícios no campo dos disjuntores em um futuro próximo. No entanto, existem ainda alguns avanços necessários para tanto.

## 9. ESPECIFICAÇÃO SEGUNDO AS NORMAS IEC/ABNT

Apesar de algumas grandezas serem definidas de modo diferente conforme a norma utilizada, conceitualmente, essas definições são equivalentes. No caso do Brasil, como a grande maioria dos fabricantes de disjuntores presentes no país é de origem europeia, observa-se uma maior tendência em se utilizar as normas IEC. Seguindo essa linha, a seguir será apresentado um resumo das características definidas pelo conjunto de normas IEC-56.

### 9.1. Tensão nominal

Segundo esta norma, a tensão nominal é definida como a máxima tensão do sistema no qual o disjuntor será instalado.

Para o conjunto de tensões inferiores a 72,5 kV, utilizam-se os seguintes valores:

Tabela 4 – Classes de tensão (kV) – IEC

Série I	3,6; 7,2; 12; 17,5; 24; 36; 52; 72,5
Série II	4,76; 8,25; 15,0; 15,5; 25,8; 38,0; 48,3; 72,5

Série I: 50 Hz; 60 Hz

Série II: 60 Hz baseado nos valores utilizados nos Estados Unidos

A ABNT utiliza os seguintes valores normatizados de tensão, em kV:

Tabela 5 – Classes de tensão (kV) – ABNT

7,2	15,0	24,2	36,2	72,5	145	242	362	460	550	800
-----	------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

### 9.2. Nível de isolamento

Nível de isolamento é definido como o conjunto de tensões que o disjuntor é capaz de suportar baseado nas tensões de impulso e frequência industrial. No caso dos disjuntores que operam acima de 300 kV, são levadas em consideração as tensões de impulso devido a surtos atmosféricos e a surtos de manobra.

Exemplos:

1) Um disjuntor projetado para 145 kV deve ser capaz de suportar uma tensão de impulso atmosférico pleno de 650 kV e uma tensão de frequência industrial (60 Hz) de 275 kV. O modelo aceito pelas normas IEC, ANSI e ABNT é de uma onda com 1,2  $\mu$ s de frente de onda e 50  $\mu$ s de cauda (onda 1,2 x 50  $\mu$ s). Uma onda com essas características está representada na Figura 46.

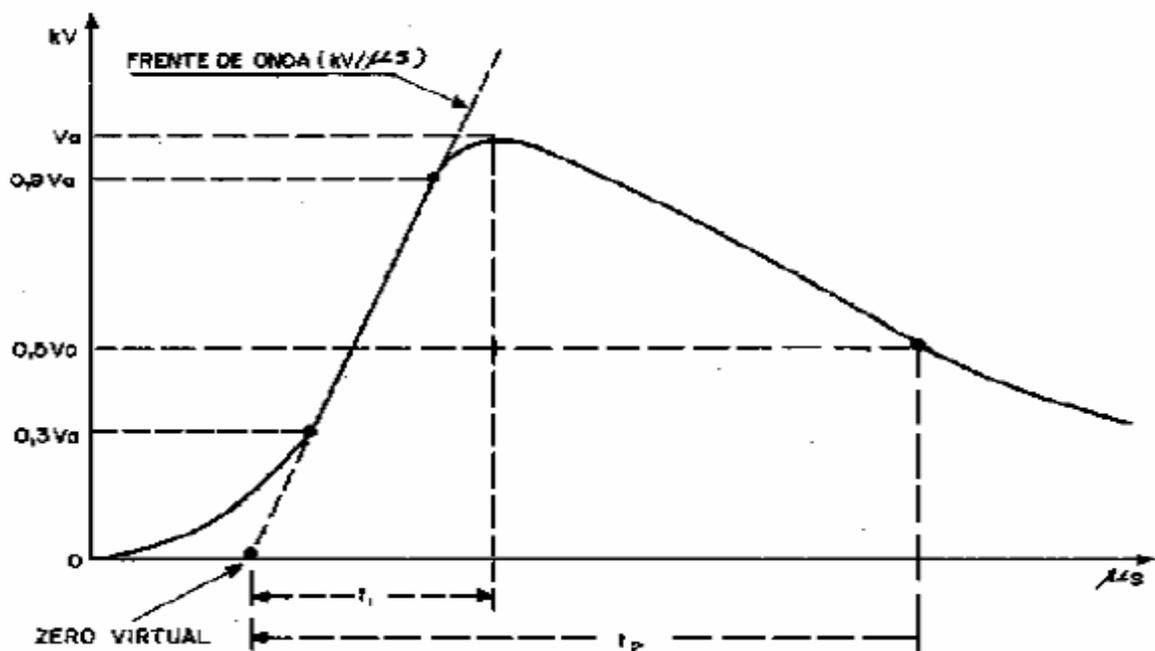


Figura 46 – Impulso elétrico padronizado para ensaio dielétrico (1,2 x 50  $\mu$ s) impulso pleno [10]

2) Um disjuntor projetado para 765 kV deve ser capaz de suportar uma tensão de impulso de 2.100 kV devido a surtos atmosféricos, além de tensões de impulso provocadas por surto de manobra de 1.425 kV para a terra e 1.550 kV através dos terminais do disjuntor aberto.

### 9.3. Frequência nominal

A frequência nominal de um disjuntor é igual à frequência natural do sistema em que ele será utilizado. No caso do Brasil, 60 Hz.

#### 9.4. Corrente nominal

A corrente nominal de um disjuntor é definida como o valor eficaz da corrente que o disjuntor é capaz de conduzir continuamente na frequência nominal e sem exceder os limites de temperatura definidos pela IEC 56-2.

Tanto a ABNT quanto a IEC utilizam os valores normatizados de corrente da Tabela 6.

Tabela 6 – Correntes padronizadas nominais (Ampères) – IEC/ABNT

200	400	630	800	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

#### 9.5. Corrente nominal de interrupção de curto-circuito

De acordo com a definição pela norma IEC, a corrente nominal de interrupção de curto-circuito é a máxima corrente de curto-circuito que um disjuntor é capaz de interromper, quando operando sob as condições de uso e funcionamento previstas. Essas condições se referem a um circuito com tensão de restabelecimento (tensão do sistema) correspondente à tensão nominal do disjuntor e que apresente uma tensão transitória de restabelecimento (tensão de reigitação) específica.

A capacidade de interrupção nominal de curto-circuito por um disjuntor é caracterizada pela definição dos valores de corrente alternada e contínua que são utilizadas em ensaio. A corrente nominal de interrupção de curto-circuito é caracterizada por dois valores, a saber:

- Valor eficaz da componente periódica – de natureza AC e denominada ‘corrente nominal de curto-circuito’ (componente simétrica);
- Percentagem da componente aperiódica – de natureza DC (componente assimétrica).

#### 9.6. Breve estudo da corrente de curto-circuito

Para melhor compreender a natureza da corrente de curto-circuito à qual o disjuntor deve se mostrar capaz de interromper, sua influência no sistema e as consequências que pode causar, será feito a seguir um estudo resumido de suas

características principais. Baseado na corrente de curto-circuito, todos os fatores para os quais o disjuntor especificado para realizar a operação deve responder adequadamente também serão aqui tratados.

Em um sistema de potência qualquer, quando da ocorrência de um curto-circuito, é preciso que todos os equipamentos a ele ligados consigam suportar adequadamente os efeitos dessa corrente até o momento em que o disjuntor consiga atuar para eliminar o defeito, de forma que nenhum deles apresente prejuízos no seu desempenho.

Para tanto, os disjuntores devem estar prontos para atuar o mais rapidamente possível, limitando os efeitos danosos dessa corrente. Além disso, os disjuntores devem se mostrar, também, capazes de suportar as correntes que estabeleçam um curto-circuito que surgirem durante uma manobra de fechamento, no caso do defeito não haver sido devidamente eliminado.

A primeira característica de correntes desta natureza que deve ser destacada é a grande assimetria que apresenta. Essa assimetria depende, dentre outros fatores, do valor da tensão no ponto de ocorrência do curto-circuito no momento em que ele ocorre. Em primeira aproximação, se essa tensão for nula, a assimetria será máxima e vice-versa.

Conforme mencionado há pouco, a componente responsável pela assimetria dessa corrente é de natureza DC. Sendo assim, seu valor é reduzido ao longo do tempo. A componente contínua decai exponencialmente e sua constante de tempo é definida em função da razão  $X/R$  da rede.

Os primeiros fatores que devem ser definidos ao se calcular a corrente de curto-circuito à qual o disjuntor poderá ser submetido são seu valor de pico máximo, o valor eficaz da corrente simétrica e sua duração. Cada um desses fatores terá algum tipo de influência no momento de especificar o disjuntor que deverá ser instalado no sistema.

Para que seja especificada, então, uma corrente de curto-circuito, os seguintes passos devem ser seguidos:

1. Estimar as correntes que fluirão futuramente através dos equipamentos em um horizonte de 30 anos. Os valores devem ser adequados às normas vigentes e, sempre que possível, deve-se padronizar os valores;
2. Determinar a relação  $X/R$  da rede para que se obtenha a constante de tempo da componente contínua da corrente de curto;

3. Determinar o valor de pico máximo que a corrente de curto-circuito pode atingir. Esse valor é importante para que se defina a característica dinâmica dos equipamentos;
4. No caso específico dos disjuntores, determinar o valor da componente contínua no instante da separação dos contatos.

A Figura 47 mostra a evolução de uma corrente de curto-circuito em função do tempo.

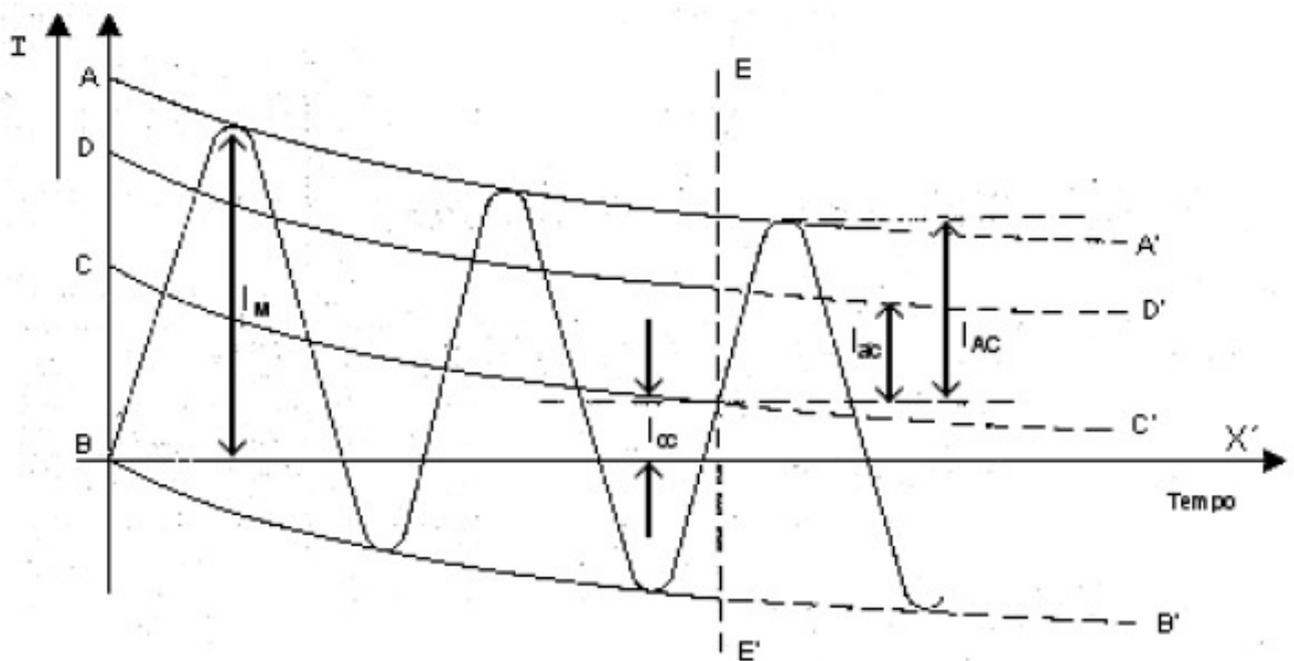


Figura 47 – Curva da corrente de curto-circuito em função do tempo [10]

AA', BB' – Envoltória da onda de corrente;

CC' – Valor de zero da componente alternada da corrente;

DD' – Valor eficaz da componente alternada da corrente;

EE' – Instante da separação dos contatos (início do arco);

$I_M$  – Corrente nominal de pico (ABNT/IEC) ou corrente momentânea (ANSI);

$I_{AC}$  – Valor de pico da componente alternada da corrente no instante EE';

$I_{ca}$  – Valor eficaz da componente alternada no instante EE';

$I_{dc}$  – Componente contínua da corrente no instante EE';

$I_{EE'}$  – Valor eficaz da corrente total (AC e DC) no instante EE'

Dos fatores acima é importante destacar algumas relações matemáticas.

$$I_{ca} = \frac{I_{AC}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{EE'} = \sqrt{\left(\frac{I_{AC}}{\sqrt{2}}\right)^2 + I_{dc}^2} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_{dc}^2}$$

A relação X/R, que determina a constante de tempo da componente contínua da corrente de curto-circuito, idealmente, deve ser obtida a partir da análise de cálculos de transitório eletromagnético em programas computacionais. Quando este tipo de procedimento não pode ser adotado, ou para o caso de uma aproximação menos precisa, essa relação pode ser determinada da seguinte forma:

Para curtos trifásicos:  $\frac{X}{R} = \frac{X_1}{R_1}$

Para curtos monofásicos:  $\frac{X}{R} = \frac{2X_1 + X_0}{2R_1 + R_0}$

Onde:

R1 – Resistência equivalente de sequência positiva

X1 – Reatância equivalente de sequência positiva

R0 – Resistência equivalente de sequência zero

X0 – Reatância equivalente de sequência zero

Embora valores diversos da relação X/R possam ser encontrados na análise de uma mesma subestação, é aconselhável adotar um mesmo valor para efeito de padronização. Obviamente, o valor escolhido deverá ser aquele de maior valor encontrado e, de acordo com as normas vigentes, não pode ser inferior a 17.

Para o caso de um circuito RL, a constante de tempo é definida pela razão L/R.

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{\omega L}{\omega R} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{X_L}{R}, \text{ onde } \omega = 2\pi f$$

Por sua vez, a percentagem da componente de corrente contínua é calculada da seguinte forma:

$$\%I_{dc} = \frac{I_{dc}}{I_{AC}} \cdot 100 = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2} I_{ac}} \cdot 100$$

Em função do tempo, o percentual da componente contínua vale:

$$\%I_{dc} = 100 e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ sendo } t/\tau \text{ em ciclos}$$

Ainda observando a Figura 47, nota-se que o pico máximo da corrente assimétrica ocorre para  $t = 0,5$  ciclo. Esse valor é comprovado quando se analisa a equação matemática a seguir.

$$I_{ass} = I_{ac} F = \frac{I_{CA}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Onde } F = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Substituindo o valor correspondente a meio ciclo na equação, temos:

$t = 8,33$  ms para 60 Hz ou  $t = 10$  ms para 50 Hz, assim:

$$I_{ass} = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{8,33}{53}}) \cdot 40 \cdot 10^3 = 105 \text{ kA}$$

O valor máximo da corrente assimétrica corresponde à capacidade de estabelecimento em curto-circuito dos disjuntores.

Os valores eficazes normatizados tanto pela ABNT quanto pela IEC da componente alternada da corrente de interrupção de curto-circuito ( $I_{ac}$ ) são dados conforme abaixo.

Tabela 7 - Corrente de interrupção de curto-circuito (kA) – ABNT/IEC

8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
---	----	------	----	----	----	------	----	----	----	----	-----

A Tabela 8 relaciona diversos valores do fator F a uma frequência de 60 Hz com os valores da razão X/R correspondentes. Ainda são incluídos na tabela, ainda, a constante de tempo  $\tau$ , a percentagem suportável da deformação do nível CC na corrente de curto-circuito e o tempo de separação dos contatos em número de ciclos.

Tabela 8 – Valores do fator F em função de X/R e  $\tau$  a 60 Hz [10]

<b>X/R</b>	<b><math>\tau</math></b>	<b>F (para t = 8,33 ms)</b>	<b>%CC</b>	<b>Tempo (ciclos)</b>
17	45	2,59	57	1,5
			40	2,5
20	53	2,62	62	1,5
			46	2,5
30	80	2,69	73	1,5
			59	2,5
40	106	2,72	79	1,5
			67	2,5
50	133	2,74	83	1,5
			73	2,5
60	159	2,76	85	1,5
			77	2,5
100	265	2,78	91	1,5
			85	2,5
$\infty$	$\infty$	2,83	100	1,5
			100	2,5

O valor da percentagem da componente contínua apresentado na Tabela 8 depende da constante de tempo  $\tau$ , sendo igual à soma do tempo mínimo de abertura mais meio ciclo na frequência nominal. O valor de  $\tau$  corresponde, portanto, ao tempo total de separação dos contatos. Ou seja, é igual ao tempo total de abertura somado a meio ciclo correspondente à ação dos relés de proteção.

A relação entre os diferentes tempos característicos da abertura de um disjuntor é mais bem explicada com o auxílio da Figura 48. O gráfico representa uma corrente de curto-circuito similar àquela da Figura 47, no entanto, ao invés de serem

destacados os dados com relação à corrente, são destacados dados referentes aos diferentes tempos do disjuntor.

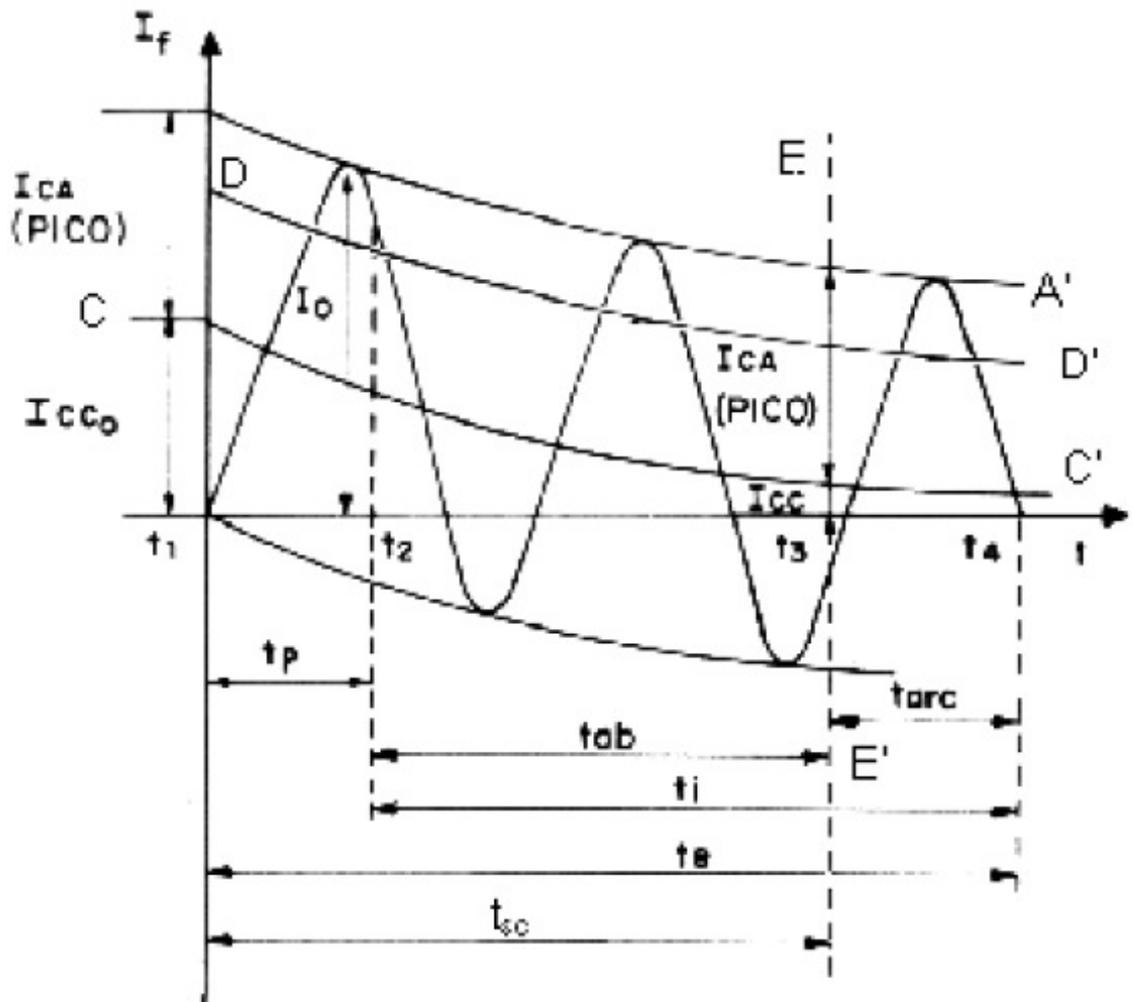


Figura 48 – Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ao longo do tempo [10]

- $t_1$  – instante em que ocorre a falha
- $t_2$  – instante da energização da bobina de abertura do disjuntor
- $t_3$  – instante em que se inicia a separação dos contatos
- $t_4$  – instante de interrupção da corrente
- $t_p$  – tempo de atuação da proteção
- $t_{arc}$  – tempo de duração do arco elétrico
- $t_{ab}$  – tempo de abertura do disjuntor
- $t_{sc}$  – tempo de separação dos contatos

$t_i$  – tempo de interrupção da falta pelo disjuntor

$t_e$  – tempo para eliminação da falta

O gráfico da Figura 49 ilustra a curva de decaimento exponencial da componente contínua da corrente de curto-circuito ( $I_{dc}$ ) em função do tempo  $\tau$  em ms para  $X/R = 17$ , valor mínimo recomendado pela IEC 56-2

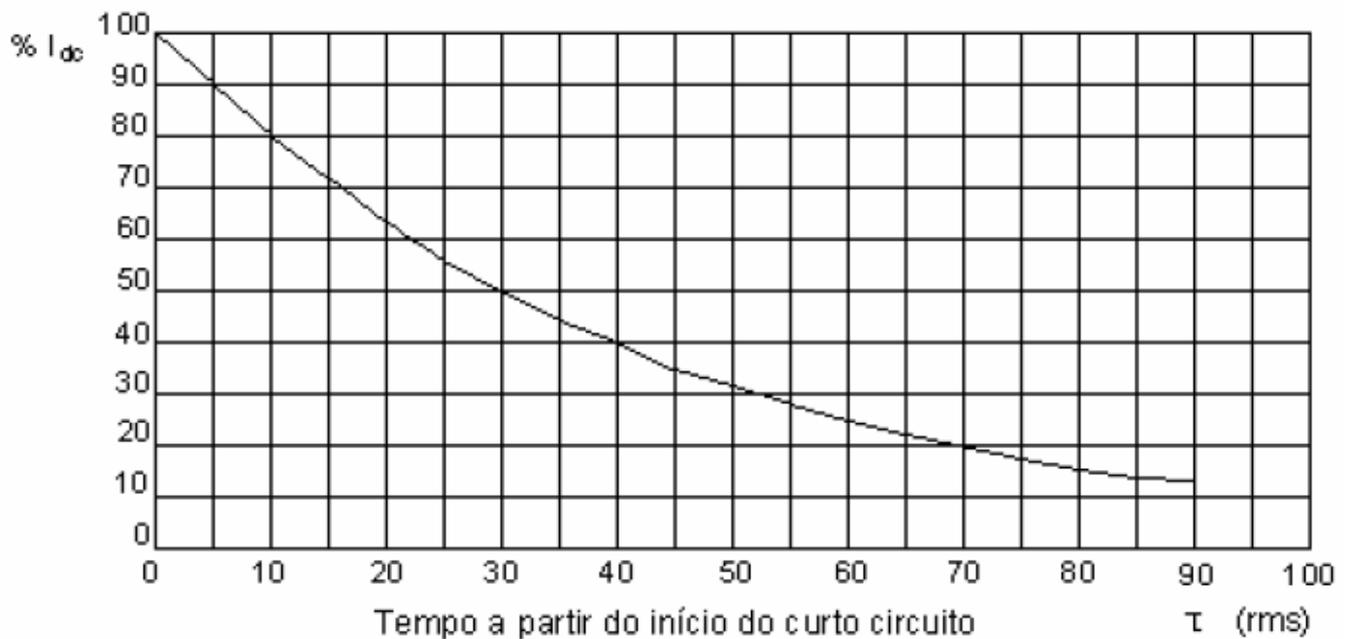


Figura 49 – Tempo para inibição de curto-circuito e componente DC da corrente (% $I_{dc}$ ) [10]

No caso de um disjuntor com tempo de abertura mínimo de 1 ciclo, por exemplo, o tempo a partir do início do curto seria igual a 1,5 ciclos ou, aproximadamente, 25 ms. Com o auxílio da curva, obtém-se um valor de % $I_{dc}$  igual a 58 %.

A norma ANSI segue outro padrão para obter a percentagem da componente contínua da corrente de curto-circuito. Esse valor correspondente à componente assimétrica é calculado multiplicando a corrente de interrupção simétrica por um fator S (assimetria). Para que se obtenha o valor de S, primeiramente, é preciso saber o tempo de separação dos contatos do equipamento.

Segundo essa mesma norma, para os disjuntores que podem ser disparados diretamente pela  $I_{cc}$ , sem a ajuda de qualquer outra forma de energia auxiliar, o tempo total de separação dos contatos é igual ao tempo mínimo de abertura. Já para

o caso de um disjuntor que só pode ser aberto por uma forma de energia auxiliar, o tempo total de separação dos contatos deve ser igual ao tempo mínimo de abertura somado a meio ciclo do tempo de atuação da proteção. A Tabela 9 relaciona os tempos de interrupção, de abertura e de separação dos contatos recomendados. Todos os tempos são indicados em número de ciclos.

Tabela 9 – tempos de interrupção, abertura e separação dos contatos recomendado [10]

$t_i$	$t_{ab}$	$t_{sc}$
2	1	1,5
3	1,5	2,0
5	2,5	3,0
8	3,5	4,0

Tendo sido determinado o tempo de separação dos contatos, o valor de S pode ser obtido a partir da Figura 50.

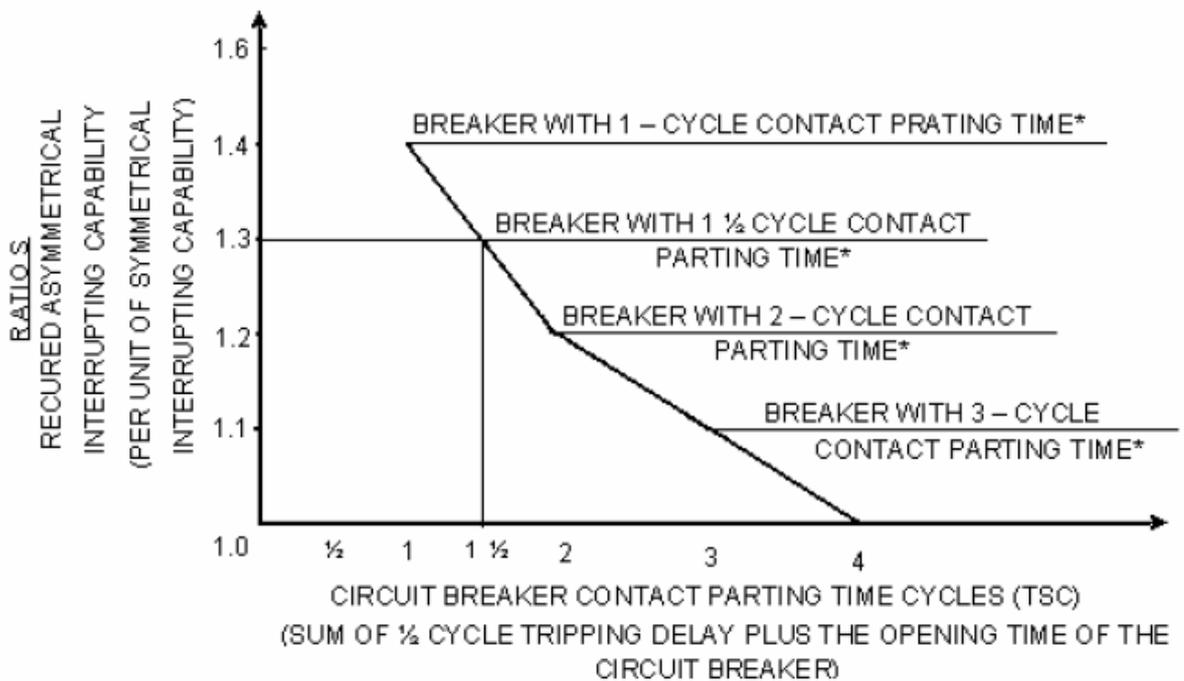


Figura 50 – Curva do tempo de separação dos contatos x Fator de assimetria [10]

A título de comparação, peguemos um disjuntor nas mesmas condições daquele utilizado para calcular a percentagem da componente contínua pela norma IEC.

Sendo o tempo de abertura igual a 1 ciclo, o tempo de interrupção será igual a 2 ciclos e o de separação dos contatos, de 1,5 ciclos. Logo, a partir da curva, obtemos  $S = 1,3$ .

Assim, temos que:

$$I_{assim} = \sqrt{I_{sim}^2 + I_{dc}^2}$$

$$(1,3 \cdot I_{sim})^2 = I_{sim}^2 + I_{dc}^2$$

$$I_{dc} = \sqrt{1,69 \cdot I_{sim}^2 - I_{sim}^2}$$

$$I_{dc} = 0,83 \cdot I_{sim}$$

A partir da equação dada anteriormente,

$$\frac{I_{dc}}{I_{AC}} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2} \cdot I_{ac}} \cdot 100,$$

onde  $I_{ac} = I_{sim}$ , obtemos:

$$\% I_{dc} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2} \cdot I_{sim}} \cdot 100$$

Logo:

$$\% I_{dc} = \frac{0,83 \cdot I_{dc}}{\sqrt{2} \cdot I_{sim}} \cdot 100 = 58,7\%$$

O tempo de interrupção nominal varia de 2 a 5 ciclos de acordo com a faixa de tensão recomendada – ver Tabela 10.

Tabela 10 – tempo de separação dos contatos [11]

Número de ciclos	Tensão (kV)
2	500 a 750
3	138; 230 e 345
5	Menor que 138

O tempo que um disjuntor leva para eliminar uma falta que venha a ocorrer tem relação direta com a estabilidade do sistema ao qual está conectado. A redução do tempo necessário para que isso ocorra aumenta a estabilidade transitória e, conseqüentemente, a capacidade de transmissão de uma interligação.

### 9.7. Corrente de estabelecimento nominal de curto-circuito

Esta corrente é definida como a capacidade de fechamento do disjuntor sob um curto-circuito já estabelecido, operando sob tensão nominal. Corresponde ao maior valor de corrente que o disjuntor é capaz de estabelecer (fechar e travar) quando operado sob tensão nominal.

Assim como pôde ser observado nos gráficos da corrente de curto-circuito, geralmente, o maior valor instantâneo de uma corrente de falta corresponde ao primeiro pico da corrente após a ocorrência do curto-circuito. Esse valor pode ser calculado da seguinte forma:

$$I_{f\text{máx}} = I_{CA(\text{eficaz})} \cdot F$$

onde, como definido anteriormente,  $F = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{t}{\tau}})$

Alguns valores do fator F já foram apresentados anteriormente na Tabela 8.

A IEC adota como valor padrão para a capacidade de estabelecimento de um disjuntor uma de corrente igual a 2,5 vezes o valor eficaz da componente CA da corrente de falta ( $F = 2,5$ ). Considerando a constante de tempo igual a 45 ms, temos, então:

- Para 50 Hz:  $F = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{10}{45}}) = 2,55$
- Para 60 Hz:  $F = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{8,33}{45}}) = 2,59$

Este valor é ligeiramente inferior àquele calculado para a componente CC ao fim do primeiro ciclo. Portanto, recomenda-se adotar o valor fixo de 2,5 para o fator que define a capacidade de estabelecimento do disjuntor somente para os casos em que o resultado de seu cálculo a partir da relação X/R seja inferior a este valor.

### 9.8. Corrente de curta duração admissível

As normas IEC e ABNT definem esta corrente como o valor eficaz da corrente que o disjuntor pode conduzir por um intervalo de tempo determinado, variando de 1 a 3 segundos.

Tabela 11 - Corrente eficaz nominal de curta duração (kA) – ABNT/IEC

8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
---	----	------	----	----	----	------	----	----	----	----	-----

Segundo a ANSI, esta corrente é definida como o valor eficaz da corrente total que o disjuntor pode conduzir por um pequeno intervalo de tempo.

$$I_{eficaz} = \sqrt{I_{CA}^2 + I_{CC}^2}$$

Tabela 12 - Corrente eficaz nominal de curta duração (kA) – ANSI

20	40	61	70	100	120
----	----	----	----	-----	-----

### 9.9. Valor de crista da corrente admissível

Definida pelas normas ABNT e ANSI como o valor de crista da corrente que o aparelho pode conduzir sem que haja qualquer tipo de dano ao seu material. Os valores padronizados adotados para esta corrente são de 2,5 vezes a corrente nominal de duração.

### 9.10. Duração nominal admissível do curto-circuito

Definido como o intervalo de tempo em que o disjuntor, na posição fechada, pode conduzir uma corrente cujo valor é igual ao nominal da corrente de interrupção de curto-circuito nominal. Normalmente o período de tempo adotado é de 1 segundo, podendo ser utilizado, também, um valor igual a 3 segundos.

### 9.11. Sequência nominal de operação

Com o objetivo de reduzir o tempo de interrupção do suprimento, além de preservar a estabilidade do sistema, é muito comum efetuar uma ou duas tentativas

de religamento de disjuntores antes de serem adotados os procedimentos de localização do defeito e identificação de suas causas. Essa sequência de manobras adotada pode ser explicada pela natureza transitória de grande parte das condições que levam à ocorrência de curtos circuitos, pois muitas vezes são defeitos temporários e de curta duração.

Um disjuntor que se encontra aberto, obviamente, pode ser religado de forma manual. No entanto, quando se trata de uma sequência nominal de operação, na maioria dos casos, sua operação de fechamento é feita automaticamente, eximindo o operador de qualquer responsabilidade. A automatização deste tipo de operação se dá pela necessidade de religamento rápido e em intervalos de tempo determinados, reduzindo-se ao máximo o tempo necessário para o restabelecimento da alimentação.

A sequência nominal de operação padronizada pela IEC pode ser de dois tipos diversos, em que O representa uma operação de abertura e CO, uma operação de fechamento seguida por uma operação de abertura imediatamente.

a) O – t – CO – t' – CO

Sendo:

- t = 3 minutos para disjuntores em que é adotado religamento manual, ou 0,3 segundo para disjuntores dotados de religamento automatizado.
- t' = 3 minutos.

Essa sequência adotada se inicia, portanto, com a abertura do disjuntor devido a um defeito qualquer. Após um intervalo de 3 minutos ou 0,3 segundo, dependendo do tipo de religamento adotado, o disjuntor é fechado novamente para tentar restabelecer a alimentação. Se o defeito já tiver sido eliminado, o sistema é restabelecido e o disjuntor não é aberto novamente. Caso contrário, uma nova abertura ocorre imediatamente e, após um intervalo de 3 minutos, uma segunda tentativa de fechamento é realizada. Persistindo o defeito, o disjuntor é aberto e procedimentos para localização e identificação de suas causas devem ser adotados. Caso tenha sido eliminado, o sistema retorna à operação normal.

b) CO – t'' – CO

Sendo:

- t'' = 15 segundos para disjuntores desprovidos de religamento automático rápido.

Esta sequência é mais simples que a anterior e inicialmente o disjuntor já se encontra aberto. Uma primeira tentativa de se restabelecer o sistema é adotada. Caso não ocorra satisfatoriamente, o disjuntor é aberto novamente e uma última tentativa ocorre após intervalo de 15 segundos. Assim como no caso anterior, persistindo o defeito, o disjuntor é aberto e procedimentos para localização e identificação de suas causas devem ser adotados. Caso tenha sido eliminado, o sistema retorna à operação normal.

Os esquemas de religamento automático adotados, de uma maneira geral, são trifásicos. No entanto, esquemas de religamento monofásicos são adotados ocasionalmente, pois oferece vantagens por permitir a utilização das fases não afetadas pelo defeito para transferência de potência. Entretanto, sua coordenação se torna mais complicada.

Quando da elaboração do projeto e da construção de um disjuntor, deve-se atentar para o fato de que o equipamento deve respeitar as especificações de sequência nominal de operação independente do meio de extinção escolhido. Disjuntores a ar comprimido, por exemplo, muitas vezes enfrentam dificuldades para se adequar a essas normas. Essas dificuldades são de natureza mecânica, devido à necessidade de expelir o ar comprimido utilizado para a atmosfera e de dispor de uma reserva suficiente antes de iniciar a operação de ligamento. Conforme visto no capítulo 6 sobre circuitos de controle de disjuntores, o equipamento não pode ser fechado de forma alguma se não dispuser ainda de meios suficientes para a extinção do arco.

Outro caso de disjuntor que pode apresentar problemas para atingir esse tipo de especificação são aqueles que utilizam pequeno volume de óleo. Os problemas apresentados também são de natureza mecânica, já que entre a primeira e o início da segunda abertura, parte do óleo inicialmente armazenado pode se encontrar, ainda, sob a forma de gás no interior do equipamento.

Previendo o aumento da rede no futuro, no momento da escolha de disjuntores para um sistema elétrico, pode-se exigir que todos eles atendam as especificações estabelecidas na primeira sequência apresentada. Mesmo que o religamento rápido não seja adotado inicialmente, evita-se a necessidade de adaptar e ensaiar os disjuntores já em operação quando tal característica se faça necessária.

### 9.12. Fator de primeiro polo

O fator de primeiro polo expressa a elevação da tensão de restabelecimento (tensão da rede a frequência industrial) aplicada ao primeiro polo ao interromper de um disjuntor. Pode ser definido como a relação entre o valor máximo da TTR e o valor máximo da tensão de fase, desconsiderando a parte transitória.

Esse fator expressa a relação, no local onde se encontra o disjuntor, entre a tensão a frequência nominal (em uma fase sem defeito) e a tensão entre as outras duas fases durante um curto-circuito bifásico aterrado ou não.

No caso em que o defeito não envolve a terra, teríamos:

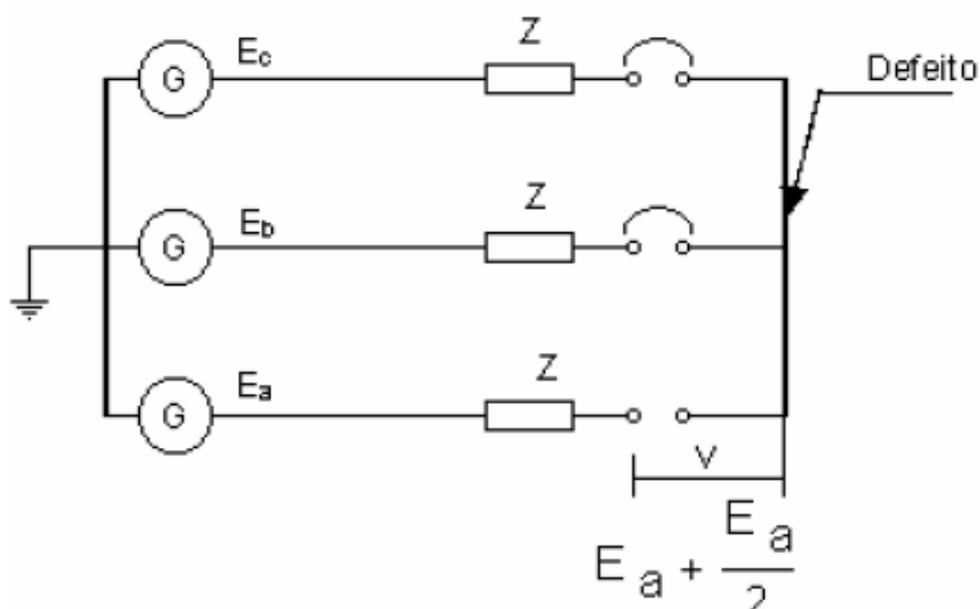


Figura 51 – Abertura do 1º polo de um disjuntor durante falta terminal trifásica não aterrada em um sistema isolado

$$V = E_a - (E_b - I.Z)$$

$$I = \frac{E_b - E_c}{2.Z}$$

$$V = E_a - \frac{E_b}{2} - \frac{E_c}{2} = E_a - \frac{E_b - E_c}{2}$$

$$Eb + Ec = -\frac{Ea}{2}$$

Assim:

$$V = E_a + \frac{E_a}{2},$$

ou:

$$\frac{V}{E_a} = 1,5$$

Onde V é a diferença de potencial, ou seja, a componente de frequência industrial da TTR logo após a abertura do primeiro polo do disjuntor.

Para tensões nominais com valor até 100kV, utiliza-se o fator de primeiro polo igual a 1,5. Já para valores de tensão superiores adota-se o seguinte critério:

1. Fator de primeiro polo igual a 1,3 para sistemas com neutro efetivamente aterrado.
2. Fator de primeiro polo igual a 1,5 para sistemas com neutro isolado.

## 10. ESPECIFICAÇÃO SEGUNDO A NORMA ANSI

Neste capítulo serão definidos e apresentados todos os fatores necessários para realizar a especificação de um disjuntor segundo a norma ANSI. Muitos deles já foram definidos no Capítulo 9 e, por essa razão, não serão aqui repetidos. Os fatores já apresentados são:

- Nível de isolamento
- Corrente permanente
- Corrente de interrupção para tensão máxima de serviço
- Tempo de interrupção
- Frequência nominal
- Corrente nominal
- Ciclos de operação nominal

Todos os outros fatores serão agora apresentados.

### 10.1. Tensão máxima nominal

É definida como o máximo valor de tensão eficaz acima da tensão nominal para a qual o disjuntor é projetado. Este valor constitui o limite de operação do equipamento.

### 10.2. Fator de Faixa de Tensão – FFT

Este fator estabelece a relação entre a máxima tensão nominal e a tensão de operação. A capacidade de interrupção simétrica e assimétrica é inversamente proporcional à tensão de operação.

Usualmente é referido como fator K, e é utilizado também para a determinação de outros fatores.

$$\frac{Cap_{V_{\min}}}{Cap_{V_{\max}}} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

$$V_{\min} \cdot I_{\max} = V_{\max} \cdot I_{\min}$$

$$k = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

A Figura 52 demonstra a curva de tensão de operação em função da capacidade de interrupção e auxilia no entendimento do fator de faixa de tensão.

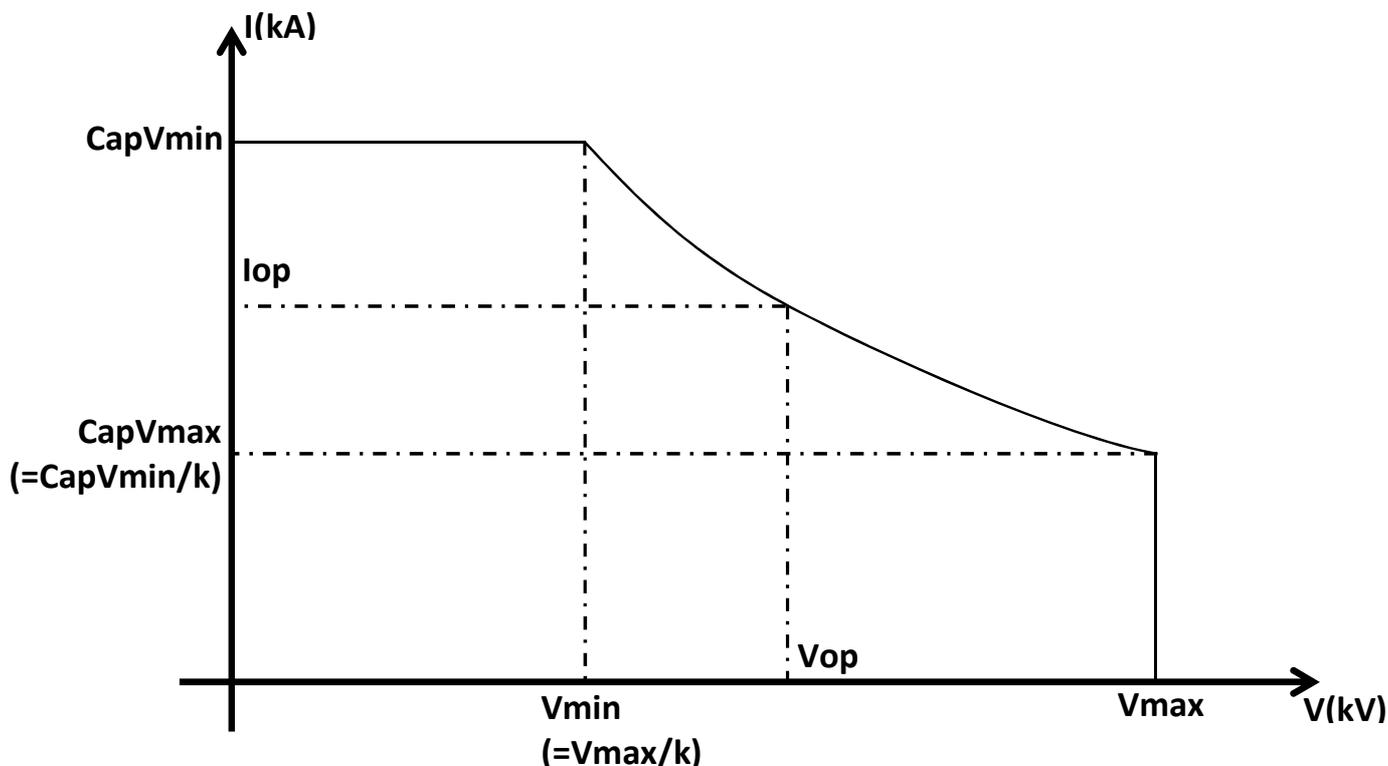


Figura 52 – Gráfico para determinação da tensão e corrente de operação

Para efeitos de aproximação e facilidade de cálculo, a curva do gráfico pode ser considerada uma função linear.

### 10.3. Retardo permissível no desligamento

Conceitualmente, é o intervalo de tempo permitido entre a energização do circuito de desligamento do disjuntor e a interrupção de todos os polos do circuito principal. Pode ser definido como o maior tempo limite, operando sob tensão máxima, em que o disjuntor deve suportar termicamente e interromper uma corrente  $k$  vezes superior à sua corrente de interrupção, após fechar os contatos.

### 10.4. Valores nominais de curto-circuito

É estabelecido a partir da componente simétrica da corrente de curto-circuito e medido em ampères. A este fator estão relacionados os subitens a seguir.

### 10.5. Corrente nominal de curto-circuito

Medida em rms, é a maior corrente simétrica média no envelope de corrente com o disjuntor operando sob máxima tensão, no instante da separação dos contatos.

### 10.6. Capacidades correlatas

As capacidades que serão definidas a seguir são utilizadas para que se determine a corrente máxima de interrupção e a corrente de curta duração.

#### 10.6.1. Capacidade de interrupção simétrica

Definida como a resultante do produto da multiplicação da corrente nominal de curto-circuito pela tensão máxima, dividido pela tensão de operação. Seu valor não pode ser superior a k vezes a corrente nominal de curto-circuito.

#### 10.6.2. Capacidade de interrupção assimétrica

Na norma ANSI, como a corrente assimétrica é calculada multiplicando-se a corrente simétrica pelo fator de assimetria s, analogamente, para que se obtenha a capacidade de interrupção assimétrica, deve-se dividir a capacidade de interrupção simétrica pelo mesmo fator.

Tabela 13 – Fator de assimetria

<b>Tempo total de separação dos contatos</b>	<b>S</b>
1	1,4
1,5	1,3
2	1,2
3	1,1
4	1,0

#### 10.6.3. Capacidades de interrupção de curtos fase-terra

Para curtos desta natureza, a capacidade de interrupção assimétrica é igual a 1,15 vezes a capacidade de interrupção para curtos entre fases não aterrados.

Seu valor não pode ser superior a K vezes as capacidades de interrupção simétrica e assimétrica definidas anteriormente.

#### **10.6.4. Capacidade de fechamento, condução e abertura**

O disjuntor deve apresentar desempenho satisfatório para o ciclo de operação a seguir:

1. Fechar e conduzir qualquer corrente de curto-circuito sem exceder o valor de  $1,6 \cdot k$ . Corrente nominal de curto-circuito;
2. Conduzir a corrente de curto-circuito durante o tempo de retardo de desligamento permitido;
3. Interromper a corrente de curto-circuito, que não deve ser superior à capacidade de interrupção.

#### **10.6.5. Capacidade de condução de curta duração**

Definida como a corrente que o disjuntor deve ser capaz de conduzir durante 3 segundos sem exceder o limite de k vezes a corrente nominal de curto-circuito.

### **10.7. Tensões suportáveis à frequência industrial e a impulsos**

Esta última seção sobre a especificação de disjuntores segundo a norma ANSI consiste em determinar as considerações que devem ser feitas quando do cálculo dos fatores determinantes para escolha de um disjuntor a ser instalado em uma rede elétrica.

Primeiramente, conforme sugere o guia de aplicação desta norma, uma margem de 20 % deve ser aplicada no valor da corrente de curto-circuito calculada para a tensão de operação. Esta margem é utilizada para prever uma possível expansão futura do sistema.

Em seguida, a utilização do método simplificado deve ser abordada. Este método é aplicado para grandes sistemas de distribuição que funcionam para a alimentação de motores.

Como já se sabe, na ocorrência de um curto-circuito em um sistema deste tipo, os motores passam, também, a contribuir com a corrente ao invés de consumi-la. Desta forma, a corrente de curto-circuito inicial é determinada a partir das reatâncias subtransitórias destas máquinas. Inicialmente, para o cálculo da corrente

de curto-circuito, devem-se utilizar os valores de correção da reatância subtransitória que constam na segunda coluna da Tabela 14, que prevêm essa contribuição.

No entanto, caso a contribuição das máquinas acopladas à rede for superior a 10% do valor total da corrente de curto-circuito, deve-se adotar o valor da corrente instantânea. A substituição da corrente utilizada é equivalente ao emprego dos valores de correção da terceira coluna para o cálculo da contribuição dos motores pelas reatâncias de sequência positiva.

Porém, deve-se atentar para o fato de que a corrente instantânea não pode ultrapassar o valor de  $1,6 \cdot k \cdot$  corrente de curto-circuito.

Tabela 14 – Reatâncias subtransitórias em função do tipo de motor e da corrente empregada [10]

<b>Tipo de motor</b>	<b>Corrente de curto-circuito simétrico</b>	<b>Corrente de curto-circuito instantânea</b>
Turbo geradores e hidrogeradores com enrolamentos amortecedores e compensadores síncronos	$X''_d$	$X''_d$
Motores síncronos	$1,5 X''_d$	$X''_d$
Hidrogeradores sem enrolamentos amortecedores	$0,75 X''_d$	$0,75 X''_d$
Motores de indução tipo: - Acima de 100 HP (1800 rpm) - Acima de 250 HP (3600 rpm)	$1,5 X''_d$	$X''_d$
Motores de indução tipo: - De 50 a 1000 HP (até 1800 rpm) - De 50 a 250 HP (3600 rpm)	$3,0 X''_d$	$1,2 X''_d$

No cálculo, motores monofásicos e motores trifásicos com potência inferior a 50 HP devem ser desprezados.

## 11. CONCLUSÃO

Conforme descrito no capítulo 1, o objetivo do presente trabalho é de fornecer aos futuros engenheiros eletricitas um material único e conciso que lhes fornecesse meios suficientes para compreender o funcionamento dos disjuntores e discernimento para julgar se um disjuntor específico é adequado para operar no sistema em que se propõem. Além disso, o trabalho visa mostrar aos estudantes a enorme complexidade da concepção de um equipamento desta natureza.

Dentro deste quadro, o objetivo foi alcançado, levando-se em conta que o trabalho se apoiou em uma vasta bibliografia sobre o tema. Dessa forma, foram fornecidos detalhes de cada um dos fatores a serem atendidos por um disjuntor, particularidades de cada uma das mais importantes técnicas de interrupção de correntes e seus devidos aspectos construtivos. Sempre que possível procurou-se ilustrar através de imagens ou gráficos que facilitassem a didática e permitissem uma melhor compreensão do assunto abordado.

A concepção de um disjuntor consiste na aplicação da engenharia no chamado 'estado da arte'. Não existe uma forma pré-estabelecida sobre como desenvolver um equipamento deste tipo para que se alcance o nível de excelência desejado. Cabe ao projetista, através de inúmeros estudos e ensaios, em projetos que podem durar anos, atingir o grau de perfeição exigido.

Grande parte do conhecimento sobre o assunto que obtive ao longo de minha vida acadêmica se deu pela atuação na área de pesquisa de disjuntores em uma empresa de renome mundial. Sendo assim, me senti extremamente grato e motivado em poder transmitir parte do conhecimento que adquiri a outros estudantes de engenharia elétrica.

Este trabalho deverá ser revisado no futuro de modo a incorporar as novas tecnologias que estão atualmente em estudo ou que ainda serão desenvolvidas. Afinal, assim como no caso dos disjuntores, a melhoria deve ser constante.

## 12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OLIVEIRA, Lorena Banhos de. *Consolidação de Material Didático para a Disciplina de Engenharia do Trabalho Gestão da Produção* - 2008.
- [2] BORGES, José Sétimo de Oliveira. *Circuitos de Controle de Disjuntores de Alta Tensão* - 1976.
- [3] CARVALHO, Antonio Carlos Cavalcanti de; PUENTE, Antonio Perez; FUCHS, Artur; PORTELA, Carlos Medeiros et al. *Disjuntores e Chaves: Aplicação em Sistemas de Potência*. UFF - 1995.
- [4] D'AJUZ, Ary; RESENDE, Fábio M.; CARVALHO, Franciso Manuel Salgado; NUNES, Irapoan G. et al. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. FURNAS/UFF - 1985.
- [5] D'AJUZ, Ary; FONSECA, Claudio dos S.; CARVALHO, Francisco Manuel Salgado; AMON FILHO, Jorge; NORA DIAS, L. E. et al. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão*. FURNAS/UFF - 1987.
- [6] GREENWOOD, Allan. *Electrical Transients in Power System* - 1991.
- [7] IEEE Std. C37.011-2005 *Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers* - 2005.
- [8] LAWSON, André Pedral Sampaio. *Disjuntor de Alta Tensão – Modelagem e Simulação Numérica Dentro da Câmara de Extinção de Arco* - 2009.
- [9] BARBOSA, F. Maciel. *Sobretensões de Manobra*. FEUP - 2005.
- [10] NEMÉSIO SOUSA, Jorge. *Material Didático da Disciplina de Equipamentos Elétricos - Disjuntores*. UFRJ – 2009.
- [11] FERREIRA, José Rui da Rocha Pinto. *Principais Tipos de Disjuntores* - 2006.
- [12] SINDER, Daniel. *Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão* - 2007.
- [13] SILVA JÚNIOR, Gilson Soares da. *Manutenção de Disjuntores a Vácuo* - TCC Engeman Alumar, 2009.
- [14] STEPHAN, Richard M. *Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas* - UFRJ, 2008.

**ANEXOS**

## **ANEXO I – ENSAIOS**

Para a conclusão do projeto de um disjuntor e para que ele possa ser comercializado, é preciso, primeiramente, que ele cumpra uma série de exigências estabelecidas através de ensaios. Outros ensaios também devem ser realizados ao longo da vida do equipamento para verificar seu bom funcionamento. Todos eles devem ser realizados pelo fabricante, na presença ou não de um inspetor, em conformidade com as prescrições contidas nos documentos de aquisição do comprador.

A seguir segue uma lista dos ensaios a serem realizados.

### **1. Ensaio de rotina**

Ensaio de rotina devem ser executados em todas as unidades de produção. Seu objetivo sempre é de averiguar o bom funcionamento do disjuntor.

- Ensaio de tensão suportável a seco a frequência industrial no circuito principal;
- Ensaio de tensão aplicada nos circuitos de comando auxiliar;
- Medida de resistência no circuito principal;
- Ensaio de operação mecânica;
- Ensaio nas buchas;
- Ensaio de vazamento (aplicável para disjuntores a óleo, a ar comprimido e a gás);
- Ensaio de pressão (aplicável para disjuntores a ar comprimido e a gás);
- Ensaio nos ajustes mecânicos;
- Ensaio na operação mecânica;
- Ensaio dos tempos de operação (tanto para fechamento quanto para abertura);
- Ensaio de condutividade nos elementos condutores;
- Ensaio de suportabilidade dos componentes isolantes principais à frequência industrial.

### **2. Ensaio de tipo**

Geralmente, ensaios de tipo são dispensados pelo comprador quando o fabricante exhibe resultados sobre disjuntores fabricados com base no mesmo

projeto. Caso contrário, é conveniente a presença de um inspetor na fábrica durante a realização dos ensaios a seguir.

- Ensaio de comprovação de desempenho mecânico;
- Ensaio de comprovação de operação;
- Ensaio de comprovação de elevação máxima de temperatura;
- Ensaio de impulso de manobra;
- Ensaio de impulso atmosférico;
- Ensaio de tensão aplicada à frequência industrial;
- Ensaio de descarga parcial;
- Ensaio de estabelecimento de correntes de curto-circuito;
- Ensaio de corrente crítica;
- Ensaio de interrupção de falta quilométrica;
- Ensaio de abertura em discordância de fase;
- Ensaio de suportabilidade a corrente de curta duração admissível;
- Ensaio de abertura de linhas a vazio;
- Ensaio de manobra de banco de capacitores (abertura e fechamento);
- Ensaio de abertura de transformadores a vazio;
- Ensaio de interrupção de falta com operação de disjuntores em paralelo.

### **3. Ensaios de recebimento**

Para o recebimento dos disjuntores são considerados os seguintes aspectos:

- Transporte  
O transporte deve ser feito sem causar qualquer tipo de dano ao aparelho. Inclui-se no transporte o embarque (carregamento) e o desembarque (descarregamento).
- Inspeção visual  
Antes do embarque o disjuntor é inspecionado visualmente, levando-se em consideração os seguintes aspectos:
  - Confrontar os dados de placa com os dados da ordem de compra ou outro documento de compra qualquer;
  - Verificar a existência de fissuras ou lascas nas buchas e danos no tanque e nos acessórios;

- Verificar, se for o caso, o nível correto de líquido isolante ou pressão de gás;
- Examinar se há indícios de corrosão;
- Verificar se há vazamento de óleo através de buchas, bujões e soldas;
- Verificar o estado da embalagem.

## ANEXO II – MÉTODO DE CÁLCULO DA TTR SEGUNDO IEEE

O guia que rege as aplicações da TTR para disjuntores de corrente alternada em alta tensão é o IEEE Std. C37.011-2005 [7]. São contemplados neste documento os procedimentos e cálculos para a aplicação da TTR, bem como determinados os limites de capacidade de disjuntores neste quesito.

O método de cálculo utilizado é o de injeção de corrente e será apresentado a seguir. Este modelo é válido desde o início da falta até o momento em que a primeira reflexão retorna ao ponto de partida.

Consideremos um circuito com uma fonte de tensão ligada a um barramento através de uma reatância equivalente. No barramento, estão conectadas a linha em falta e outras  $N$  linhas, cada uma delas representada por sua impedância de surto, além da capacitância do barramento e de equipamentos a ele ligados. A Figura II.1 ilustra o unifilar de um circuito com essa configuração e o curto-circuito considerado é do tipo trifásico não-aterrado no terminal do disjuntor.

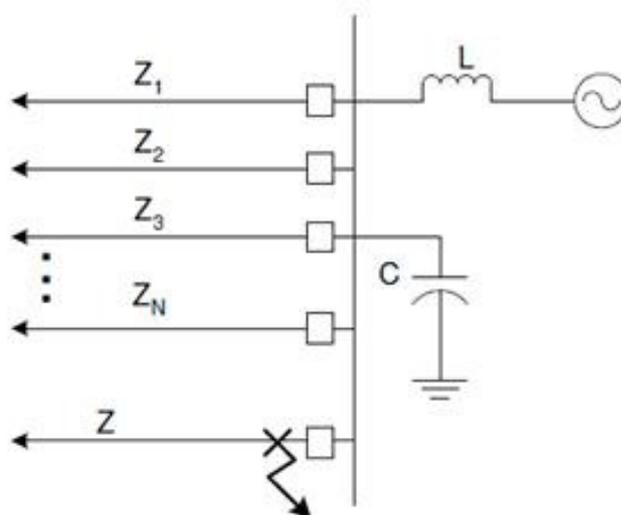


Figura II.1 – Diagrama unifilar do circuito [12]

O circuito pode, então, ser simplificado ao seu equivalente, conforme retratado na Figura II.2.

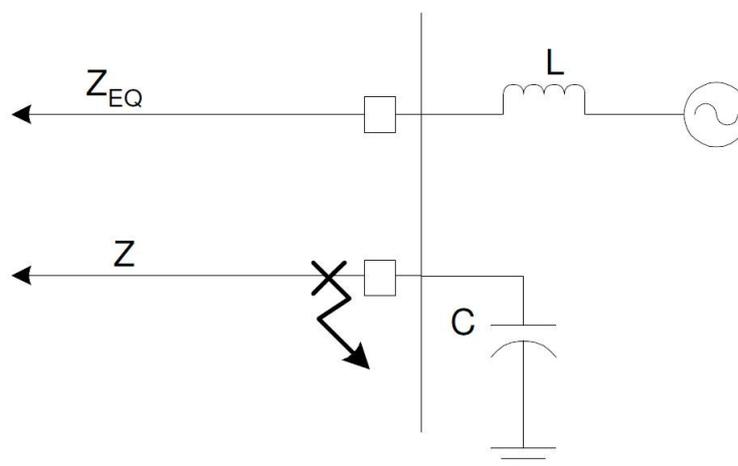


Figura II.2 – Diagrama unifilar do circuito equivalente [12]

A partir deste circuito, aplica-se o método da superposição, que pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Calculam-se as correntes e tensões em condição de falta.
- Substitui-se o primeiro polo a abrir por uma fonte de corrente com a mesma amplitude e sinal inverso ao da corrente de falta.
- Calculam-se as correntes e tensões nestas condições.
- As correntes e tensões resultantes se dão pelo somatório dos resultados das etapas anteriores.

Uma vez que a falta está presente na primeira etapa, a tensão entre os terminais do disjuntor nestas condições é nula. Logo, a TTR resultante é igual à tensão entre os contatos do primeiro polo que deve interromper a corrente calculada na segunda fase do método da superposição.

Em sua forma trifásica, o circuito assume a configuração ilustrada através da Figura II.3.

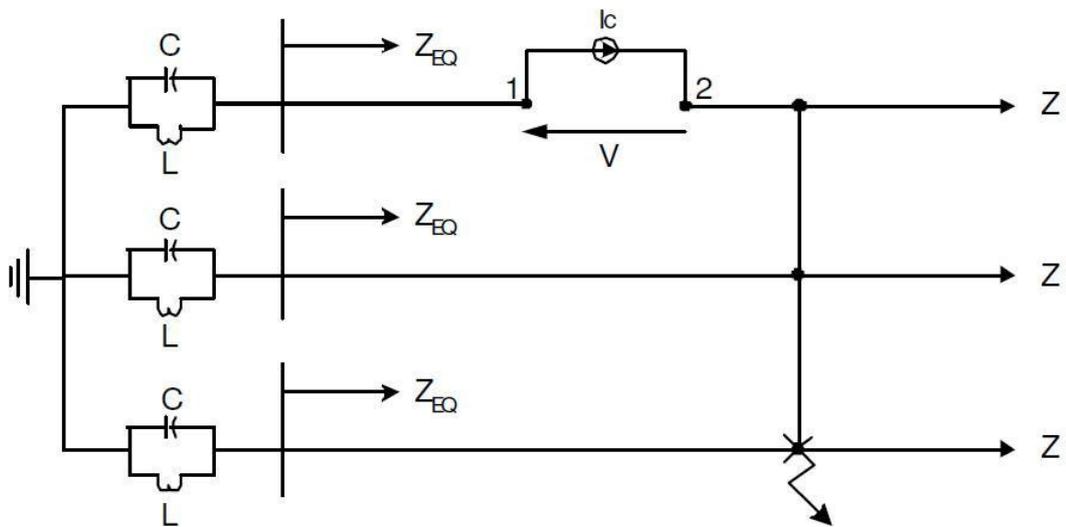


Figura II.3 – Diagrama unifilar do circuito equivalente trifásico [12]

Redesenhando o circuito de modo a simplificá-lo, obtêm-se a configuração da Figura II.4.

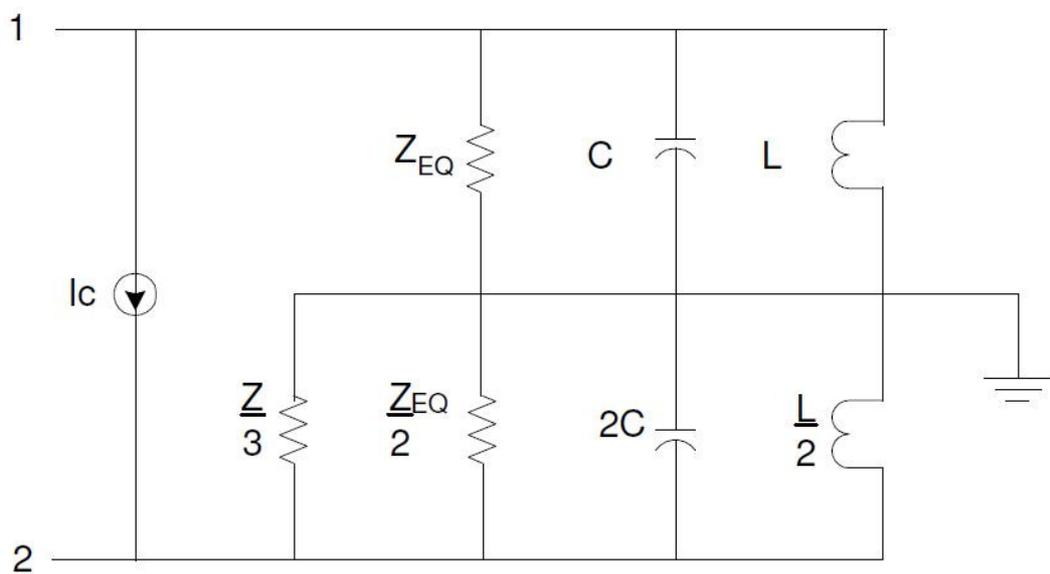


Figura II.4 – Circuito equivalente simplificado [12]

Algumas aproximações podem ser feitas no circuito equivalente de modo a facilitar os cálculos.

- Como  $Z_{EQ} \ll Z$ ,  $Z_{EQ}/2 \parallel Z/3 \approx Z_{EQ}/2$

Assim, a linha de transmissão sob falta é desprezada.

- A capacitância  $C$  do barramento pode ser igualmente desprezada nos instantes iniciais.

O circuito assume, então, a configuração ilustrada na Figura II.5.

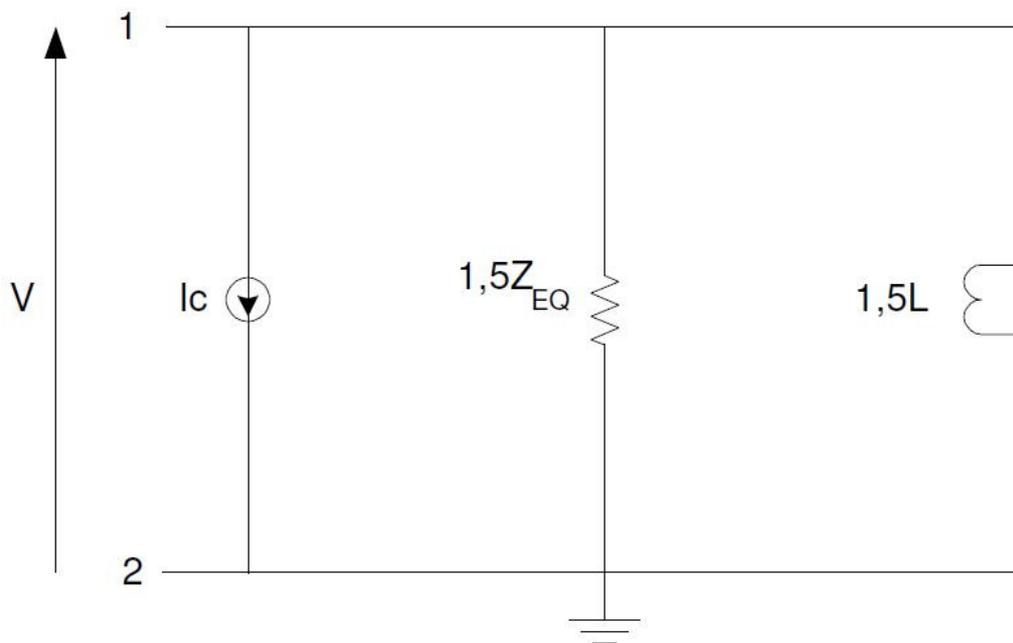


Figura II.5 – Circuito equivalente desprezadas as capacitâncias [12]

Como a corrente  $I_c$  que circula é da forma senoidal, a expressão que a descreve é:

$$I_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(wt)$$

Considerando que o fenômeno da TTR ocorre somente nos primeiros instantes, em um intervalo muito inferior a meio ciclo, a expressão pode ser aproximada para:

$$I_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot (wt)$$

Para o circuito da Figura II.5, a solução no domínio de Laplace é dada por:

$$Z(s) = 1,5 \cdot \frac{sL \cdot Z_{EQ}}{sL + Z_{EQ}}$$

$$I_c(s) = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w}{s^2}$$

$$V(s) = Z(s) \cdot I_c(s) = 1,5 \cdot \frac{sL \cdot Z_{EQ}}{sL + Z_{EQ}} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w}{s^2}$$

$$V(s) = 1,5 \cdot L \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \frac{1}{s \left( s \cdot \frac{L}{Z_{EQ}} + 1 \right)}$$

Já no domínio do tempo, a solução para o sistema é:

$$V(t) = 1,5 \cdot L \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \left( 1 - e^{-\frac{Z_{EQ} t}{L}} \right)$$

Levando-se em conta, também, as capacitâncias fase-terra anteriormente desprezadas, tem-se o circuito equivalente da Figura II.6.

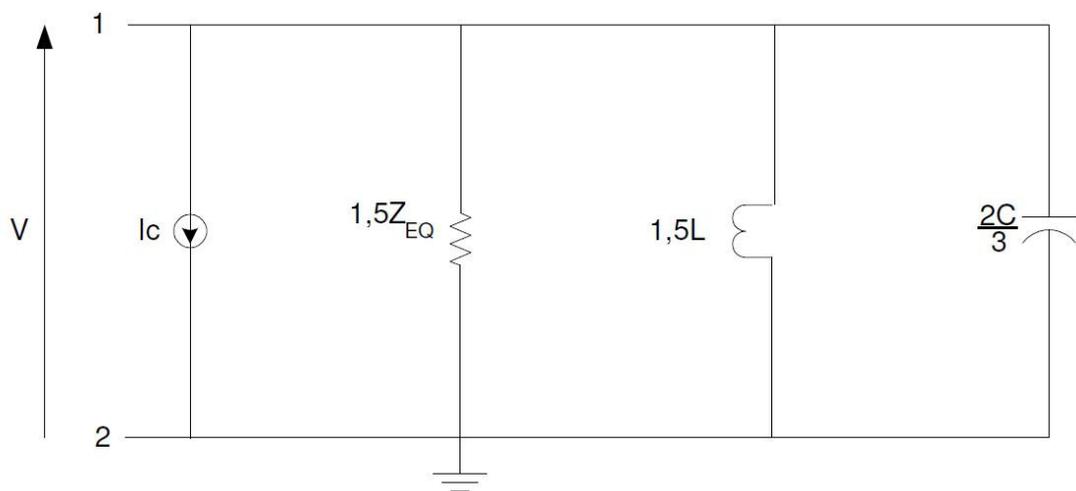


Figura II.6 – Circuito equivalente considerando-se as capacitâncias [12]

E a solução no domínio de Laplace para este circuito é:

$$V(s) = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w}{\frac{2}{3} C} \cdot \frac{1}{s \left( s^2 + \frac{s}{Z_{EQ} \cdot C} + \frac{1}{LC} \right)}$$

No domínio do tempo, são duas as possíveis soluções para este sistema.

- Caso superamortecido, em que  $Z_{EQ} < 0,5 L/C$ .

$$V(t) = 1,5.L.\sqrt{2}.I.w.\left[1 - e^{-\alpha.t}\left(\cosh(\beta.t) + \frac{\alpha}{\beta}\sinh(\beta.t)\right)\right],$$

onde:

$$\alpha = \frac{1}{2.Z_{EQ}.C};$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{LC}}$$

- Caso oscilatório amortecido, em que  $Z_{EQ} \geq 0,5 L/C$ .

$$V(t) = 1,5.L.\sqrt{2}.I.w.\left[1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)\right]$$