

DISJUNTORES DE MUITO ALTA, ALTA E MÉDIA TENSÃO

(Manuel Bolotinha, MSc ^{*i})

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os **disjuntores** são equipamentos de *corte, manobra e protecção*, que são utilizados nas *Subestações (SE) de transporte e distribuição* de energia em *Muito Alta, Alta e Média Tensão (MAT, AT e MT)* e nos *Postos de Transformação MT/BT*, cujo objectivo é realizar a **interrupção das correntes de serviço** (*manual ou automaticamente*) e de **curto-circuito**.

A classificação dos níveis de tensão difere de país para país, razão pela qual devem ser referidos os valores das tensões normalizadas, de acordo com a *Norma IEC 60038 – IEC standard voltages*, que correspondem aos valores máximos de tensão suportados pelos equipamentos e que se indicam na Tabela 1, onde se indicam também os valores mais habituais das *tensões nominais das redes*.

Tabela 1 – Tensões normalizadas

Nível de Tensão	Tensão mais elevada (kV ef ¹)	Tensões nominais habituais das redes (kV ef)	Tensões suportáveis mínimas	
			50Hz, 1m (kV ef)	À onda de choque (kV pico)
<i>Baixa Tensão (BT)</i>	≤ 1 (CA) ≤ 1,5 (CC)	0,11-0,19; 0,127-0,22; 0,23-0,4; 0,5; 0,6; 0,66	≤ 2	≤ 12
<i>Média Tensão (MT)</i>	3,6	3,3	10	40
	7,2	6,6	20	60
	12	10; 11	28	75
	17,5	13,8	38	95
	24	22	50	125
	36	30; 33	70	170
	52	49,5	95	250
<i>Alta Tensão (AT)</i>	72,5	60; 66; 69	140	325
	123	110; 115	230	550

¹ ef designa a **tensão eficaz**, referida na literatura inglesa por **rms** (*root mean square*). $U_{ef} = U_{pico}/\sqrt{2}$.

<i>Muito Alta Tensão (MAT)</i>	170	132; 138	325	750
	245	150; 154	395	950
	300	220; 230	460	1050
	420	345; 400	630	1425
	550	500	740	1675
	800	765	830	2100

Os valores indicados para as *tensões suportáveis mínimas* referem-se aos valores das *tensões de ensaio* dos equipamentos.

O **comando de abertura e fecho** dos *disjuntores* pode ser realizado **manualmente**, por um operador, ou **automaticamente**, por ordens externas que visam a mudança de configuração da rede ou outras situações pré-definidas, enquanto o **disparo** é realizado por acção das *unidades e equipamentos de protecção*, que não estão incorporados neles e que constituem sistemas independentes integrados no designado **SCCP** (*Sistema de Comando, Controlo e Protecção*).

A designação do *tipo dos disjuntores* está normalmente associada ao *método de extinção do arco eléctrico* utilizado (ver Capítulo 2).

As características, dimensionamento, instalação e ensaios dos *disjuntores MAT, AT e MT* obedecem a um conjunto de documentos legais – os *Regulamentos*, devendo em *Portugal* devem ser observado o seguinte:

- *RSSPTS (Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Seccionamento)*
– Decreto nº 42895 de 31 de Março de 1960, alterado pelos Decretos Regulamentares nº 14/77 de 18 de Fevereiro e nº 56/85 de 6 de Setembro.

As *normas* habitualmente utilizadas para a definição das características e ensaios destes equipamentos são:

- *NP e NP EN* (Normas Portuguesas e Normas Portuguesas Harmonizadas com as Normas Europeias)

- *EN* (Normas Europeias)

- *IEC* (International Electrical Commission), designadamente:

- 60038 – IEC standard voltages
- 60060 – High-voltage test techniques
- 61936-1 – Power installations exceeding 1 kV a.c. – Common rules
- 62271 – Standards for high-voltage switchgear and control gear
- 62271-203 – High-voltage switchgear and Controlgear - Gas-insulated metal-enclosed switchgear
- 60694 – Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards

- 61000 – Electromagnetic compatibility (EMC)
- 60529 - Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
- 62262 - Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts (IK code)

2. O ARCO ELÉCTRICO

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O arco eléctrico pode definir-se como a *ruptura dieléctrica* de um gás, produzindo uma descarga eléctrica no **plasma**² e o consequente estabelecimento de uma *corrente eléctrica* através de um **meio físico normalmente não condutor**.

Essa *descarga eléctrica* ocorre quando se verifica a interrupção da corrente eléctrica num circuito, o que acontece quando a corrente eléctrica é interrompida (*de forma voluntária, quando se executa uma manobra de abertura de um circuito, ou de forma automática, quando a interrupção é motivada pela actuação das protecções contra defeitos dos equipamentos ou circuitos, como acontece nos disjuntores*), ou quando a distância de segurança entre dois condutores a *potenciais diferentes*, ou entre um condutor em tensão e uma parte metálica normalmente sem tensão, diminui, o que origina uma **descarga electrostática**³ entre os referidos condutores em tensão ou entre o condutor em tensão e a parte metálica normalmente sem tensão.

O estabelecimento de um circuito eléctrico dá também origem a um arco, devido à diminuição da distância entre dois elementos condutores que se encontram a *potenciais diferentes*.

A Figura 1 mostra um exemplo de um *arco eléctrico*.



Figura 1 – Arco eléctrico

A formação do arco eléctrico, quando se verifica a interrupção de um circuito eléctrico, explica-se pela **lei da conservação da energia electromagnética** (*esta lei verifica-se,*

² O **plasma** é, em Física, um dos quatro estados fundamentais da matéria (os outros são os *sólidos, os líquidos e os gases*), sendo um meio electricamente neutro (*a sua carga eléctrica é nula*). Pode ser criado quer por aquecimento de um gás quer sujeitando-o a um campo electromagnético intenso, o que aumenta ou diminui o número de electrões, criando partículas com carga eléctrica positiva ou negativa (essas partículas designam-se por **iões**). A presença de um número significativo de partículas capazes de conduzir cargas eléctricas torna o *plasma* condutor, dando-lhe a propriedade de responder a um campo electromagnético forte.

³ Define-se **descarga electrostática** como a circulação de uma corrente eléctrica de forma repentina e momentânea entre dois pontos que se encontram a potenciais diferentes.

aliás, para todas as formas de energia). Quando um condutor é percorrido por uma corrente eléctrica cria-se uma energia electromagnética.

Como de acordo com o referido princípio da conservação, a energia electromagnética não pode passar instantaneamente do estado “A” para o estado “zero”, a quando da interrupção de um circuito forma-se um arco eléctrico como resposta do estado energético desse circuito para manter constante o valor da referida energia electromagnética.

2.2. MECANISMOS DE EXTINÇÃO DO ARCO ELÉCTRICO

2.2.1. Generalidades

Para evitar danos causados nos equipamentos provocados pelo *arco eléctrico* que se forma quando o *circuito eléctrico* é **bruscamente interrompido**, particularmente quando as *correntes são elevadas*, como se verifica no **curto-circuito**, é necessário que os *equipamentos eléctricos de corte e protecção* disponham de **mecanismos** para a **rápida extinção do arco eléctrico**. Essa *extinção* é realizada em **câmaras** *construídas especificamente para esse fim*.

2.2.2. Métodos de Extinção do Arco Eléctrico

Os métodos mais habituais de *extinção do arco eléctrico* nos *disjuntores* são:

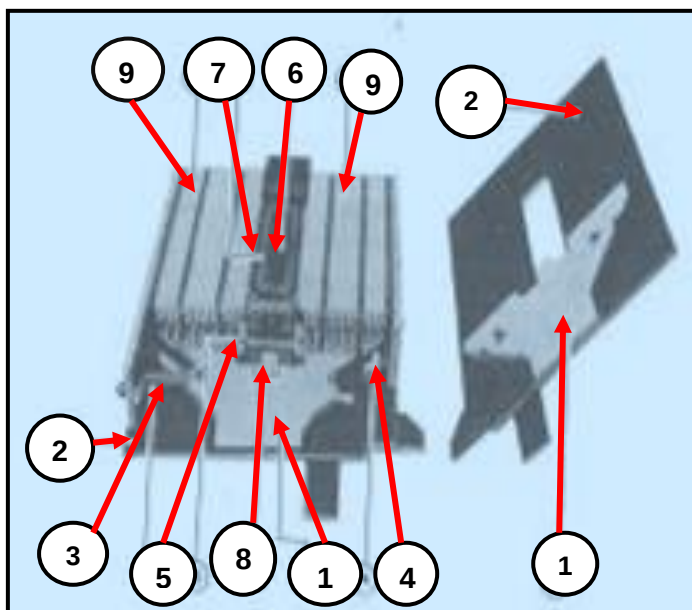
- Aumento da resistência do arco, por sopro magnético.
- Aumento do comprimento do arco, por acção de um fluxo de ar (normalmente ar comprimido).
- Estabelecimento do arco em meios isolantes e seu arrefecimento (*óleo mineral* e *hexafluoreto de enxofre – SF₆*).
- Estabelecimento do arco em meios que não são ionizáveis (*vácuo*)

Actualmente o *SF₆* é utilizado nos *disjuntores MAT* e *AT*, enquanto nos *disjuntores MT* se utiliza o *SF₆* e o *vácuo*. Por **questões ambientais** o *vácuo* tem vindo sucessivamente a conquistar quota de mercado neste nível de tensão.

Existem ainda em serviço diversos *disjuntores* que utilizam a tecnologia do *ar comprimido* e o *óleo* (*disjuntores de pequeno volume de óleo*) para *extinção do arco*.

Nas Figuras 2 a 6 mostram-se exemplos de **câmaras de corte** de *disjuntores MAT*, *AT* e *MT*.

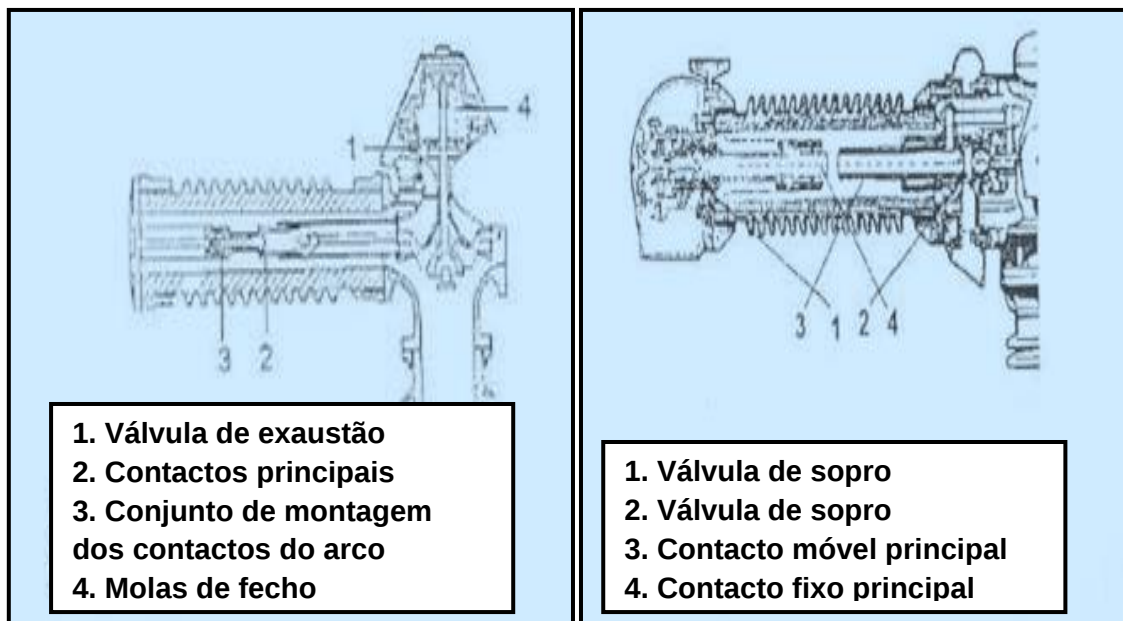
Em instalações de *MAT*, para facilitar a *extinção do arco eléctrico* os *disjuntores* possuem **múltiplas câmaras de corte** (*pelo menos duas*).



Legenda

1. Placa cerâmica de zircónio para guia do arco no início da sua formação
2. Paredes laterais com poliéster em fibra de vidro
3. Alongador anterior do arco
4. Alongador posterior do arco
5. Alongador intermédio ligado à bobina de campo magnético
6. Núcleo magnético
7. Bobina de campo magnético
8. Câmara de extinção para a bobina de campo
9. Paredes da câmara principal

Figura 2 – Câmara de corte de um disjuntor de sopro magnético



1. Válvula de exaustão
2. Contactos principais
3. Conjunto de montagem dos contactos do arco
4. Molas de fecho

1. Válvula de sopro
2. Válvula de sopro
3. Contacto móvel principal
4. Contacto fixo principal

Figura 3 – Câmaras de corte de um disjuntor de ar comprimido

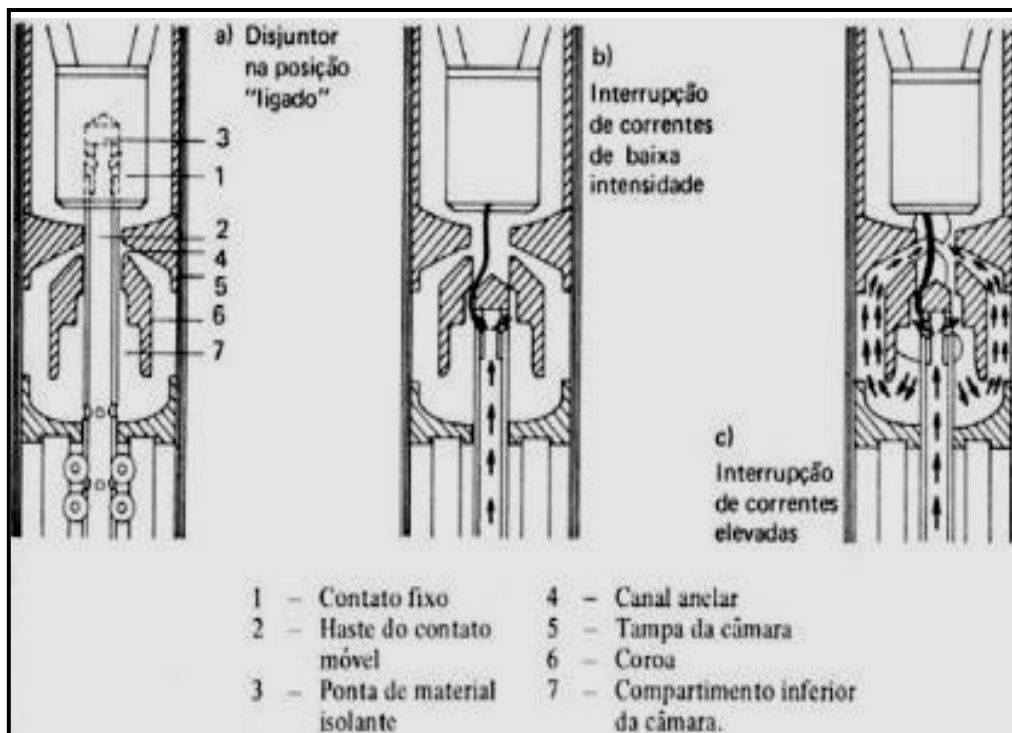


Figura 4 – Câmara de corte de um disjuntor de óleo

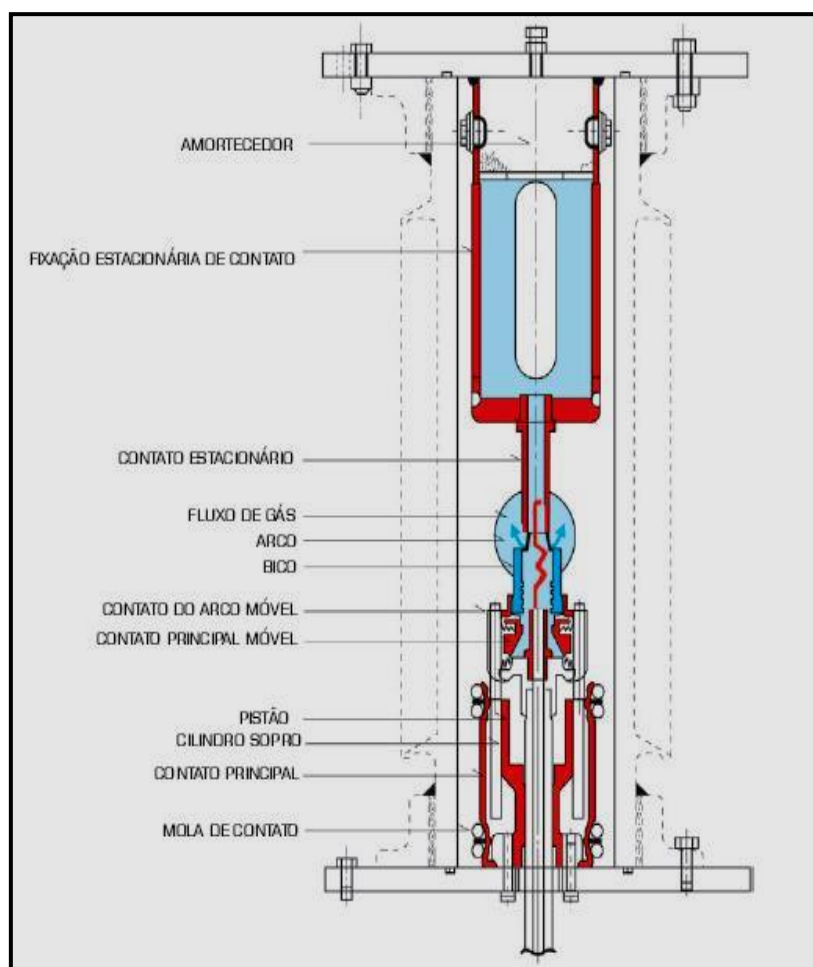


Figura 5 – Câmara de corte de um disjuntor de SF6

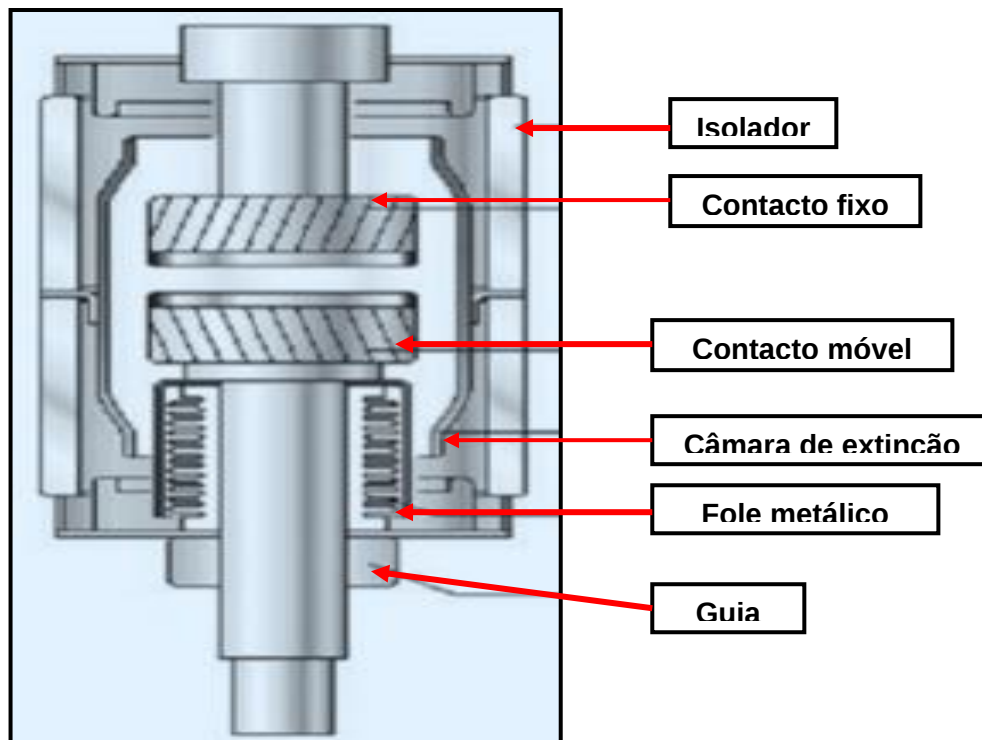


Figura 6 – Câmara de corte de um disjuntor a vácuo

2.2.3. Extinção por Sopros Magnético

Nos disjuntores com extinção por **sopro magnético** os *contactos abrem-se no ar*, empurrando o *arco eléctrico* para as **câmaras de extinção**, onde ocorre a um **aumento na resistência do arco** e consequentemente da sua *tensão*, aumento esse obtido por:

- Aumento do comprimento do arco eléctrico.
- Fragmentação do arco em vários arcos menores, em série, nos vários orifícios da câmara de extinção.
- Arrefecimento do arco em contacto com as múltiplas paredes da câmara.

A força que impele o *arco* para dentro dos *orifícios da câmara* é produzida pelo **campo magnético** da *própria corrente*, passando por *uma ou mais bobinas* (é **desta passagem por bobinas que resulta a designação de sopro magnético**) e, eventualmente, por um **sopro pneumático auxiliar** produzido pelo *mecanismo de accionamento*.

Este *sopro pneumático* é indispensável quando se pretende **interromper correntes com valor baixo** e que **não são capazes de produzir um campo magnético suficiente** para *impelir o arco para dentro da câmara*, o que ocasionaria *tempos de arco muito longos*.

Existem vários tipos de *formatos de câmara de extinção para disjuntores a sopro magnético*. A *câmara de extinção* pode ser construída com **material isolante**, **aço** ou uma **combinação dos dois**. Os *circuitos magnéticos de sopro* também possuem várias configurações, sendo as mais habituais as de tipo de **núcleo externo** (o *campo magnético é produzido pela corrente a ser interrompida circulando através de bobinas*)

ou **interno** (o campo é produzido pelo próprio arco eléctrico através de um circuito magnético formado pela própria câmara).

Uma das principais características do *mecanismo de extinção por sopro magnético* é a **grande resistência do arco eléctrico**, devido ao facto de com este mecanismo que nestes o **arco queima no ar** e é **impelido a alongar-se** consideravelmente, aumentando, como já referido, a sua resistência.

Embora actualmente este método de extinção não seja vulgarmente usado, a sua **utilização típica** é em *disjuntores MT* com tensão estipulada⁴ até **24 kV**.

2.2.4. Extinção por Ar Comprimido

No mecanismo de **extinção por ar comprimido** cria-se um *fluxo de ar sobre o arco* (o fluxo é provocado por um diferencial de pressão). Após a *extinção* o fluxo de ar é descarregado para a atmosfera.

Os modelos mais recentes de *disjuntores a ar comprimido* usam o princípio de **sopro axial**, ou seja, o *arco é distendido e “soprado” axialmente em relação às aberturas de entrada de ar e contactos*. O sistema de extinção pode classificar-se em duas categorias:

- Sopro unidireccional (“*mono blast*”).
- Sopro bidireccional (“*dual blast*”).

No primeiro tipo, apenas um dos contactos é oco, permitindo a saída do ar após a *extinção* somente numa direcção, enquanto no segundo tipo, ambos os contactos, fixo e móvel, são ocos, e o **arco expande-se em ambas as direcções**.

Para que o *ar comprimido* possa cumprir com êxito as suas funções de meio accionador deve ter *características de pureza, ausência de unidade e pressão adequadas* para tal, o que é realizado através de **unidades centrais de ar comprimido** (compostas de compressores, filtros, desumidificadores, etc.).

Vantagens da extinção por ar comprimido

- Disponibilidade total do meio extintor.
- A mobilidade do meio extintor, que é também o meio de accionamento, com alta velocidade de propagação, permite que ele seja canalizado para accionar contactos principais, a abertura e o fecho, com mecanismos relativamente leves, o que torna os disjuntores bastante rápidos.
- É possível ajustar a capacidade de interrupção e propriedades de isolamento por variação da pressão de operação.
- A compressibilidade do meio extintor permite que as estruturas estejam isentas das ondas de choque transitórias, geradas pelo arco eléctrico.

⁴ **Valor estipulado** (para equipamentos): Valor de uma grandeza fixado, em regra, pelo fabricante para um dado funcionamento especificado de um componente, de um dispositivo ou de um equipamento; este valor corresponde ao anteriormente designado por “*valor nominal*”, designação que actualmente é apenas utilizada para redes.

Desvantagens da extinção por ar comprimido

- Custo elevado do sistema de geração de ar comprimido, principalmente em pequenas instalações onde cada disjuntor tem que ter a sua própria unidade geradora, bem como reservatórios de alta pressão.
- A distribuição do ar comprimido em alta pressão por toda a subestação no caso de unidades centrais de geração, além de ter um custo elevado, requer manutenção mais frequente.
- No caso de operação junto a áreas residenciais onde existem limitações de nível de ruído, é obrigatório o uso de silenciadores para os disjuntores.

A Figura 7 mostra um exemplo de um *disjuntor de corte com ar comprimido*.

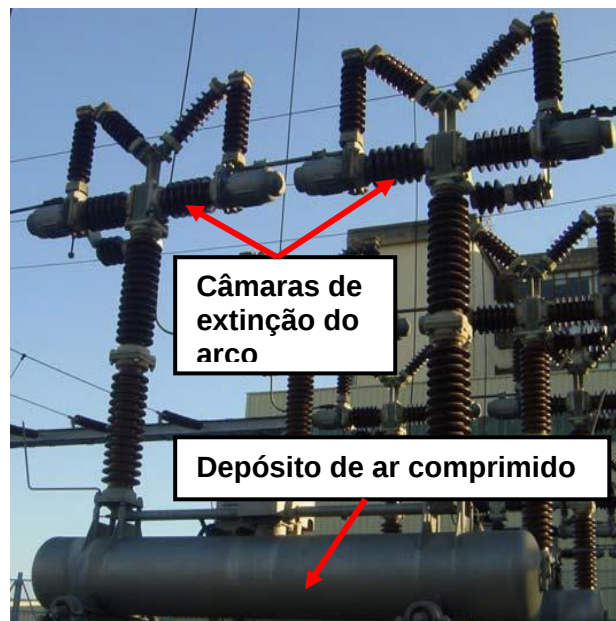


Figura 7 – Disjuntor de ar comprimido

2.2.5. Extinção no Óleo

Os **óleos** utilizados na *extinção do arco eléctrico* são **minerais**, *derivados do petróleo*, actuando por **arrefecimento do arco** (designado por *efeito de fluxo líquido*) e por **saturação de hidrogénio** na *câmara de extinção* (designado por *efeito de hidrogénio*).

No *efeito de hidrogénio* o óleo é decomposto pela alta temperatura do arco, dando origem à libertação de gases, nos quais o hidrogénio predomina; este gás tem uma condutividade térmica bastante elevada o que causa o arrefecimento do arco. No *efeito de fluxo líquido* o óleo frio que é injectado no arco eléctrico dá continuidade ao processo de evaporação do óleo, permitindo que grandes quantidades de calor possam ser retiradas pelos gases resultantes.

As câmaras de extinção podem ser de **sopro axial** (“*axial blast*”) ou de **sopro transversal** (“*cross blast*”).

A Figura 8 mostra um exemplo de um *disjuntor de corte no óleo*.



Figura 8 – Disjuntor de pequeno volume de óleo

2.2.6. Extinção em SF6

O **SF6** é um *gás incombustível, não venenoso, incolor, inodoro* e devido à sua estrutura molecular simétrica é **extremamente estável e inerte até cerca de 5000 °C**; nos equipamentos que utilizam este *mecanismo de extinção* o gás encontra-se num *sistema fechado e praticamente isento de humidade*, a uma pressão entre **6 e 8 bar**⁵.

Nos modelos actuais o *processo de extinção* baseia-se na **injecção de SF6** *transitoriamente em sobrepressão* aquando da *abertura dos contactos* e no consequente **arrefecimento do arco**.

A **grande vantagem** do **SF6** sobre o **óleo** é o de ter uma **constante dielétrica**⁶ superior, o que permite **menores dimensões nos disjuntores** e *capacidade para cortar* correntes de curto-circuito mais elevadas.

A Figura 9 mostra um exemplo de um *disjuntor de corte em SF6*.

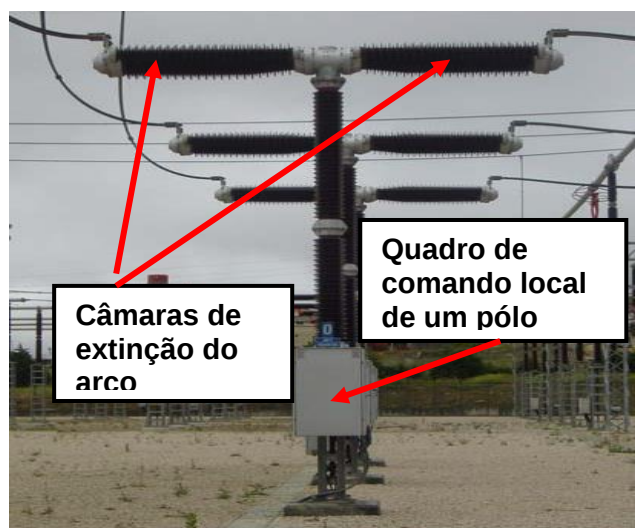


Figura 9 – Disjuntor de SF6

⁵ 1 bar = 100.000 Pa (Pa: pascal – unidade de pressão do Sistema Internacional de Unidades – SI).

⁶ A **constante dielétrica** é uma *propriedade do material isolante* utilizado em condensadores que influi na capacidade total do condensador.

2.2.7. Extinção no Vácuo

No **vácuo** *não existem electrões e protões* que permitam a **condução da corrente eléctrica**, mas o *arco formado quando se interrompe essa corrente* **vaporiza os contactos metálicos** do aparelho de corte, dando origem a *uma nuvem de partículas metálicas* onde se encontram **electrões e protões**.

Após a **interrupção de corrente**, *estas partículas depositam-se rapidamente na superfície dos contactos*, recuperando, assim, a **rigidez dieléctrica** entre os mesmos, o que provoca a **extinção do arco eléctrico**.

O **arco eléctrico no vácuo** pode ser de dois tipos:

- *Arco difuso*: quando se interrompem pequenas correntes, até aproximadamente **10kA**, forma-se um *arco distribuído por toda a superfície dos contactos*.
- *Arco contraído*: a partir de um certo valor de corrente (**> 10kA**) o **arco eléctrico contrai-se**, tornando-se possível localizar um *foco de emissão iónica* sobre os contactos de alguns **milímetros de diâmetro**.

A transição do *arco difuso* para o *arco contraído* é provocada pelo **aumento do campo magnético** dos vários arcos paralelos, com o *aumento de corrente*, cujas **forças de atracção** começam a **superar as forças termodinâmicas do plasma** que sustentavam estes arcos, originando a *deslocação e junção dos focos de emissão iónica* que vão formar um *foco único* e **contrair o arco**.

A acção deste *foco* sobre os **contactos seria prejudicial**, em **termos de extinção**, pois, *um foco destas dimensões, fixo sobre os contactos*, possui uma **constante de tempo de arrefecimento muito grande** (*de alguns milissegundos*) devido à grande quantidade de vapor emitido e uma *redeposição muitíssimo mais lenta das partículas metálicas sobre os contactos*, após o **zero de corrente**, com consequente redução da **capacidade de ruptura para valores incompatíveis com as necessidades de corte**.

Para evitar a *acção prejudicial* do **arco contraído**, usa-se o **efeito do campo magnético gerado pelo próprio arco**, fazendo-o *percorrer todo o contacto* e actuar sempre sobre a *camada de metal frio*, o que elimina o **efeito da erosão** sobre os **contactos** e evita a *formação* de uma **coluna de plasma estável, difícil de extinguir-se**.

Vantagens da extinção por vácuo

- Grande segurança de operação, pois não necessitam de suprimento de gases ou líquidos e não emite chamas ou gases.
- Baixos requisitos de manutenção e tempo de vida útil extremamente longo quer em termos de números de operações a plena carga quer em termos de curto-circuito.
- Excelente relação capacidade de corte/volume.

A Figura 10 mostra um exemplo de um *disjuntor MT de corte no vácuo*.



Figura 10 – Disjuntor MT de corte no vácuo

3. MONTAGEM DE DISJUNTORES

Nas instalações *MAT* e *AT* os **disjuntores** podem ser instalados das seguintes formas:

- No parque exterior das *Subestações (SE)*, apoiados em estruturas metálicas, recticuladas ou tubulares (solução actual) ou de betão (instalações mais antigas), habitualmente designadas pela sigla inglesa **AIS** (*"Air Insulated Substation"*).
- No parque exterior das *SE* num **invólucro pré-montado em fábrica**, isolado a gás (usualmente o **SF6** – hexafluoreto de enxofre) – *SE "híbridas"*.
- Em *SE isoladas a gás (SF6)* no interior ou no exterior (solução menos utilizada), habitualmente designadas pela sigla inglesa **GIS** (*"Gas Insulated Substation"*).
- Em *Blocos extraíveis*, com o equipamento montado num "*charriot*", no parque exterior das *SE* tipo AIS (apenas em *SE AT*).

Um aspecto que é necessário considerar para os disjuntores *MAT* e *AT* montados apoiados em estruturas metálicas em *Subestações do tipo AIS* é **altitude de montagem**.

Se esta for superior a **1000 m** o **nível de isolamento do isolante externo**, definido nas condições atmosféricas de referência normalizadas deve ser multiplicado por um factor **Ka** (para o nível de isolamento interno a questão não se coloca, uma vez que as características do dieléctrico são idênticas, qualquer que seja a altitude), de acordo com o estipulado na Norma IEC 60694 referida no Capítulo 1.

A Figura 11 representa os valores de **Ka** indicados na norma em questão em função da altitude.

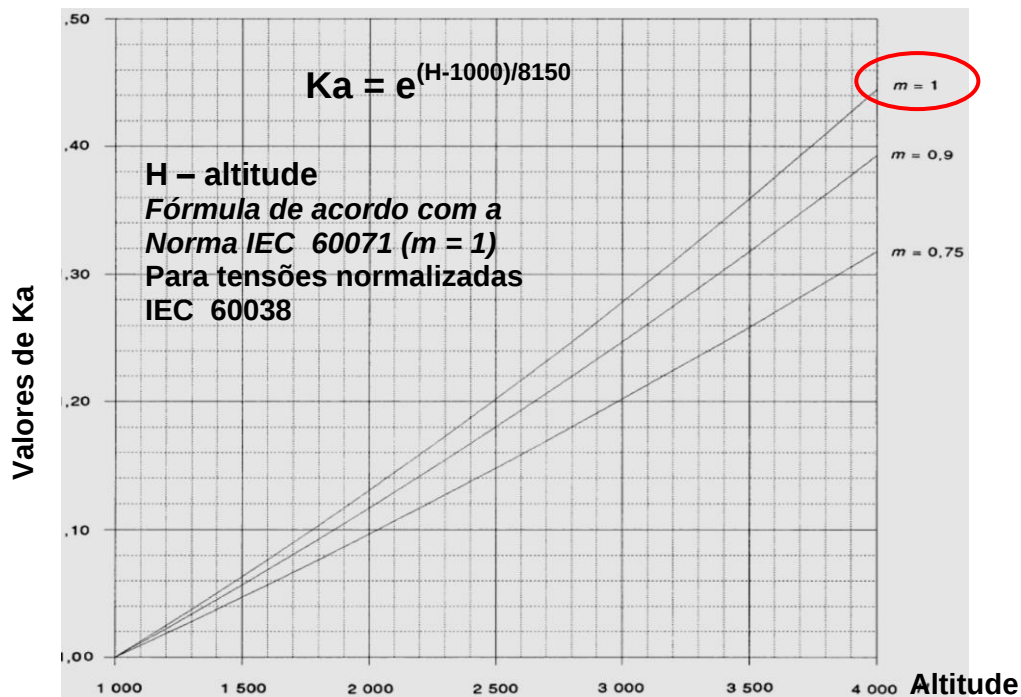


Figura 11 – Valores de Ka em função da altitude

Já nas instalações MT os *disjuntores* são montados em:

- Em *quadros de média tensão (QMT)*, instalados habitualmente no interior de Postos de Transformação e Subestações (solução habitual actualmente), podendo ser *fixos ou extraíveis*.
- Em *Postos de Transformação* em cabina, com isolamento no ar (solução em desuso).
- Em postes de linhas aéreas MT, para operações de automação e telecomando (integrando os designados *órgão de corte de rede – OCR*).

4. CARACTERÍSTICAS DOS DISJUNTORES⁷

4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

As características dos disjuntores são os seguintes:

- Tensão estipulada.
- Intensidade estipulada.
- Poder de corte estipulado.
- Frequência (**50 Hz** ou **60 Hz**)
- Ciclo de religação.

Na Tabela 2 indicam-se, com excepção dos ciclos de religação, os valores normalizados para os *disjuntores* MAT, AT e MT.

⁷ Os ciclos de religação e de abertura-fecho-abertura serão analisados no Capítulo 5.

Tabela 2 – Valores normalizados dos disjuntores MAT, AT e MT

Valores estipulados normalizados	MAT e AT	MT
Tensão (kV)	72,5; 123; 170; 245; 300; 420; 550; 800	7,2; 12; 17,5; 24; 36
Intensidade (A)	2000; 2500; 3150; 4000; 5000	400; 630; 800; 1250; 1600
Poder de corte estipulado (kA)	31,5; 40; 50; 63; 80	12,5; 16; 20; 25

4.2. COMANDO E MECANISMO DE OPERAÇÃO

Os comandos de abertura e fecho dos disjuntores são realizados por **bobinas** (*uma ou duas bobinas de abertura e uma bobina de fecho*), que normalmente actuam por emissão de corrente.

A existência de **duas bobinas de abertura** é uma situação habitual em *disjuntores AT*, particularmente em *MAT*, destinando-se uma *bobina* para **ordens de abertura voluntárias** e uma *bobina* para **disparo através da ordem das protecções** da instalação.

Os **sistemas de comando e controlo** dos *disjuntores* possuem ainda as seguintes características:

- Se uma ordem de abertura estiver presente, nenhuma ordem de fecho deverá ser cumprida.
- Os *disjuntores* podem ter **comando tripolar ou monopolar**, permitindo a *abertura de apenas um pólo* (solução normalmente utilizada em *MAT*), o que é importante para as **manobras de religação**.
- Impedir uma ordem de fecho, após um *ciclo de religação F-A*, enquanto a primitiva ordem de fecho se mantiver (**anti-bombagem**).
- Abertura automática em caso de discordância de pólos, temporizada de modo a permitir a **religação monofásica** (em *MAT*).
- Se o agente extintor for o *SF6* haverá **bloqueio por falta de pressão do dieléctrico na câmara de corte**, com possibilidade do operador optar pela abertura do disjuntor ou por mantê-lo na posição de fechado.

Em caso de *falta ou fuga de gás*, **primeiro** é gerado **um alarme** para informar o operador e *onde a manobra do disjuntor ainda é possível*, até que o *nível de SF6* **desça até um determinado patamar** que provoque o *bloqueio* do mesmo.

- Bloqueio por **insuficiente reserva de energia do mecanismo de operação**, para manobra, com *pelo menos dois níveis de actuação*: **bloqueio de abertura e bloqueio de fecho**.
- Bloqueio por falta de **corrente contínua e/ou força motriz** (*alimentação do sistema de comando e/ou do mecanismo de operação*).
- Bloqueio por *discordância de pólos* (em *MAT*)

- As bobinas de disparo devem dispor de um **circuito de supervisão de defeito** destas ou das **ligações às bobinas**, que fornecerá um *alarme* e **impedirá o fecho do disjuntor enquanto o defeito se mantiver** (habitualmente apenas em AT e MAT):

O fecho do disjuntor pode ser feito *sem tensão na linha e com tensão no barramento* (**dead line-live bar**) ou por recurso a **sincronização**, com *tensão na linha e no barramento* (**live line-live bar**), através de *informação de tensão* fornecida pelos transformadores de medida de tensão da linha e do barramento.

O mecanismo de operação é por **acumulação de energia** (normalmente por mola) com **capacidade para permitir executar três ciclos de fecho-abertura partindo da situação correspondente à de colocação em serviço do dispositivo de reposição**, admitindo-se que, *sendo a reserva de energia assegurada por dispositivos mecânicos*, esta seja **suficiente para apenas um ciclo abertura-fecho-abertura (A-F-A), estando o disjuntor fechado**, na situação em que não haja força motriz para *alimentação do motor de carregamento das molas*.

Se o disjuntor se encontrar na posição de aberto, as molas apenas executam o ciclo F-A.

A energia das molas tem que ser suficiente para que a última manobra do disjuntor seja sempre a de abertura.

Nos disjuntores MT, em caso de **falta de energia das molas** é possível realizar *uma operação manual* de **recurso por manivela**.

No caso dos disjuntores com **extinção por ar comprimido**, este também desempenha a *função de mecanismo de operação*, **não existindo molas**. Tal como na situação anterior a *pressão do ar comprimido* **tem que ser suficiente para que a última manobra do disjuntor seja sempre a de abertura**.

Caso tal não aconteça o disjuntor é bloqueado.

5. DEFEITOS NAS LINHAS AÉREAS E CICLOS DE RELIGAÇÃO

A grande maioria dos defeitos nas linhas aéreas é **assimétrica**, envolvendo geralmente apenas uma fase (*curto-circuito fase-terra*) ou duas fases (*curto-circuito fase-fase*) e **transitórios** (cerca de **90%**), sendo geralmente consequência de:

- Ciclos de sobrecarga severos.
- Sobreensões na rede, designadamente as de manobra.
- Descargas atmosféricas.
- Isoladores contaminados (poluição), partidos ou lascados.
- Descargas parciais (efeito de coroa) não controlado.
- Impacto de aeronaves e veículos automóveis, designadamente gruas móveis.
- Contacto de aves e outros animais.
- Queda de árvores.
- Sobrecargas mecânicas devida ao gelo e à neve.

- Acção do vento.

Nas linhas de transporte de energia MAT e AT, com o objectivo de permitir **restaurar a continuidade do serviço imediatamente após o disparo tripolar do disjuntor** é necessário prever **religações tripolares**⁸ (no caso das linhas MAT é ainda habitual implementar soluções de **disparo e religações monopolares**, o que permite **manter o serviço durante um tempo relativamente curto, apenas com duas fases em serviço**).

O **comando das religações** é realizado por um **relé específico**, devidamente **programado para o ciclo definido**, designado por **religador**.

Os dados estatísticos mostram que a **relição** é normalmente **bem sucedida** após **uma temporização de alguns poucos ciclos**; a Tabela 3 mostra a **taxa de sucesso das religações** na **eliminação do defeito**.

Tabela 3 – Taxa de sucesso das religações

Tentativas de relição	Taxa de sucesso (%)
1	90
2	4
3	1

Por esse motivo os *disjuntores de protecção* daquelas linhas devem ter uma *característica* designada por **ciclo de reliação**, que se pode traduzir pela *capacidade do disjuntor fechar sobre um defeito, após uma temporização, e voltar a abrir, se o defeito se mantiver, sem que o dieléctrico perca as suas propriedades* e possa cumprir a sua função

Os ciclos de reliação habituais característicos dos disjuntores das linhas de transporte de energia são:

- **A-T₁/F-A** (*abertura–temporização T₁/fecho-abertura definitiva*) – **relição única**, utilizada habitualmente nas linhas AT.
- **A-T₁/F-A-T₂/F-A** (*abertura–temporização T₁/fecho-abertura-temporização T₂/fecho-abertura definitiva*) – **relição múltipla**, utilizada habitualmente nas linhas MAT.

Os tempos T₁ e T₂ mais vulgarmente utilizados são, respectivamente, **0,3 s** e **3 m**, representando um *compromisso* entre os *tempos mínimos estatísticos* necessários para **eliminação do defeito** e o *tempo necessário* para que o **dieléctrico recupere as suas propriedades**.

Quando se realizam *trabalhos em tensão (TET)* numa linha aérea os **religadores** devem ser **obrigatoriamente postos fora de serviço**.

⁸ Nalguns países a **relição** é também utilizada em *linhas MT*, designadamente no nível de tensão de **36 kV**.

6. DISJUNTORES E SOBRETENSÕES DE MANOBRA

6.1. SOBRETENSÕES DE MANOBRA

As manobras das redes e equipamentos eléctricas, (habitualmente abertura e fecho dos *disjuntores das subestações*), particularmente *nas instalações AT e MAT*, dão origem a **fenómenos transitórios** que podem causar *importantes perturbações na rede eléctrica*, designadamente *oscilações do sistema de potência, distorção harmónica de tensões e correntes* e **sobretensões**.

Estas **sobretensões**, que são designadas por **sobretensões de manobra**, contrariamente às *sobretensões de origem atmosférica*, cujo valor tem apenas uma pequena variação com a tensão de serviço da rede, têm valores que são comparativamente maiores quando o valor **de pico da tensão de serviço aumenta**⁹.

As *sobretensões de manobra*, causadas pela propagação de *ondas electromagnéticas* ao longo do sistema de energia e cujos efeitos são mais sensíveis em redes com **tensões de serviço iguais ou superiores a 400 kV (420 kV**, de acordo com a *Norma IEC 60038*), afectam a **coordenação de isolamento** da rede eléctrica e *podem causar danos nos principais equipamentos*, influenciando a **fiabilidade da rede** e, consequentemente, a **qualidade e continuidade de serviço**.

Nas *redes AT e nas redes MAT* com *tensões de serviço não superiores a 245 kV* (tensão normalizada – *Norma IEC 60038*) a utilização de *descarregadores de sobretensões (DST)*, utilizados também no estudo da *coordenação de isolamento* e na correspondente selecção das *tensões máximas suportáveis* (*Norma IEC 60071*), têm-se revelado usualmente eficazes na protecção contra *sobretensões de manobra* das instalações, o que frequentemente não acontece nas redes com tensões de serviço iguais ou superiores a 400 kV.

Nestes níveis de tensão as habituais soluções, para limitar as sobretensões de manobra são:

- Utilização de disjuntores com **resistência de pré-inserção**, associados a **DST**.
- **Fecho controlado de disjuntores**, associado a **DST**.

6.2. UTILIZAÇÃO DE DISJUNTORES COM RESISTÊNCIA DE PRÉ-INSERÇÃO

Este método baseia-se na utilização de disjuntores com **resistência de pré-inserção** (valores típicos: 400 a 800 Ω por fase).

A resistência é inserida no circuito no momento do fecho do circuito, em série com a fonte de energia e o equipamento a energizar, dividindo a sobretensão de manobra aplicada, e curto-circuitando-o após um tempo pré-determinado, representando-se na Figura 12 o esquema deste método.

⁹ A relação entre a *tensão de pico* (U_{pico}) e o valor da *tensão eficaz* (U_{ef}) é dada pela expressão $U_{pico} = \sqrt{2} \times U_{ef}$.

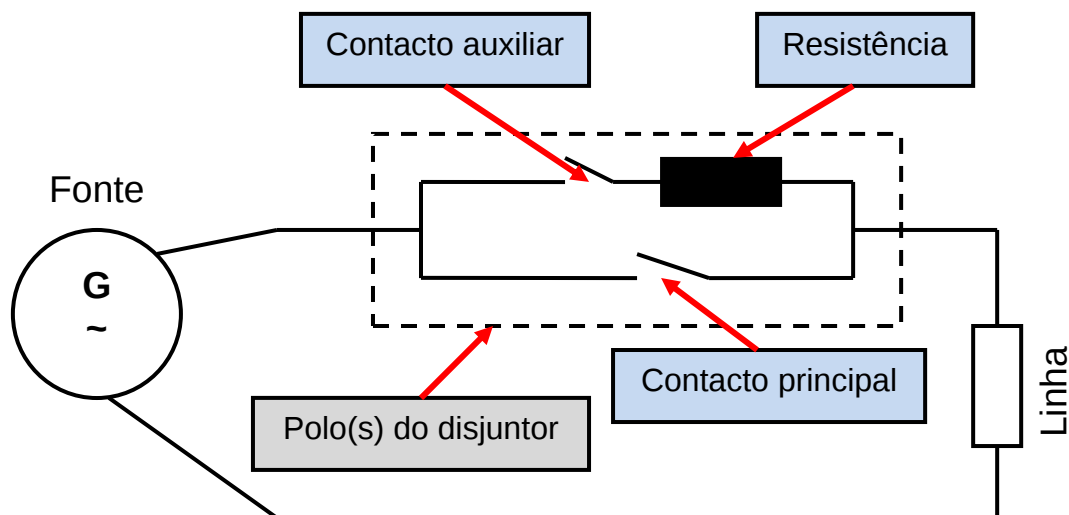


Figura 12 – Esquema de um disjuntor com resistência com pré-inserção

A experiência mostra que para linhas cujo comprimento é **inferior a 1/4 do comprimento de onda** o valor da *sobretensão de manobra* não se mostra sensível ao tempo em que a *resistência de pré-inserção* se encontra em serviço, pelo que para limitar o aquecimento por *efeito de Joule* se limita o tempo de utilização da resistência a valores compreendidos entre **6 e 15 ms**. De qualquer forma a resistência deve manter-se em serviço até que a *primeira reflexão das ondas de tensão e de corrente* na extremidade aberta da linha **regresse** à outra extremidade, onde se realizou a manobra de energização da linha.

Este facto tem como consequência que o tempo de serviço da *resistência de pré-inserção* deve ser **superior ao dobro** do *tempo de trânsito* na linha.

O equipamento é assim **energizado em duas fases**, cada uma das quais produz uma determinada *sobretensão*; uma delas é devida à energização através da resistência e a outra resulta do *seu curto-circuito*. Apesar de a *sobretensão de manobra* não ser eliminada, a sua amplitude é menor do que a que se verificaria sem a resistência.

A Figura 13 ilustra um disjuntor com resistência de pré-inserção.

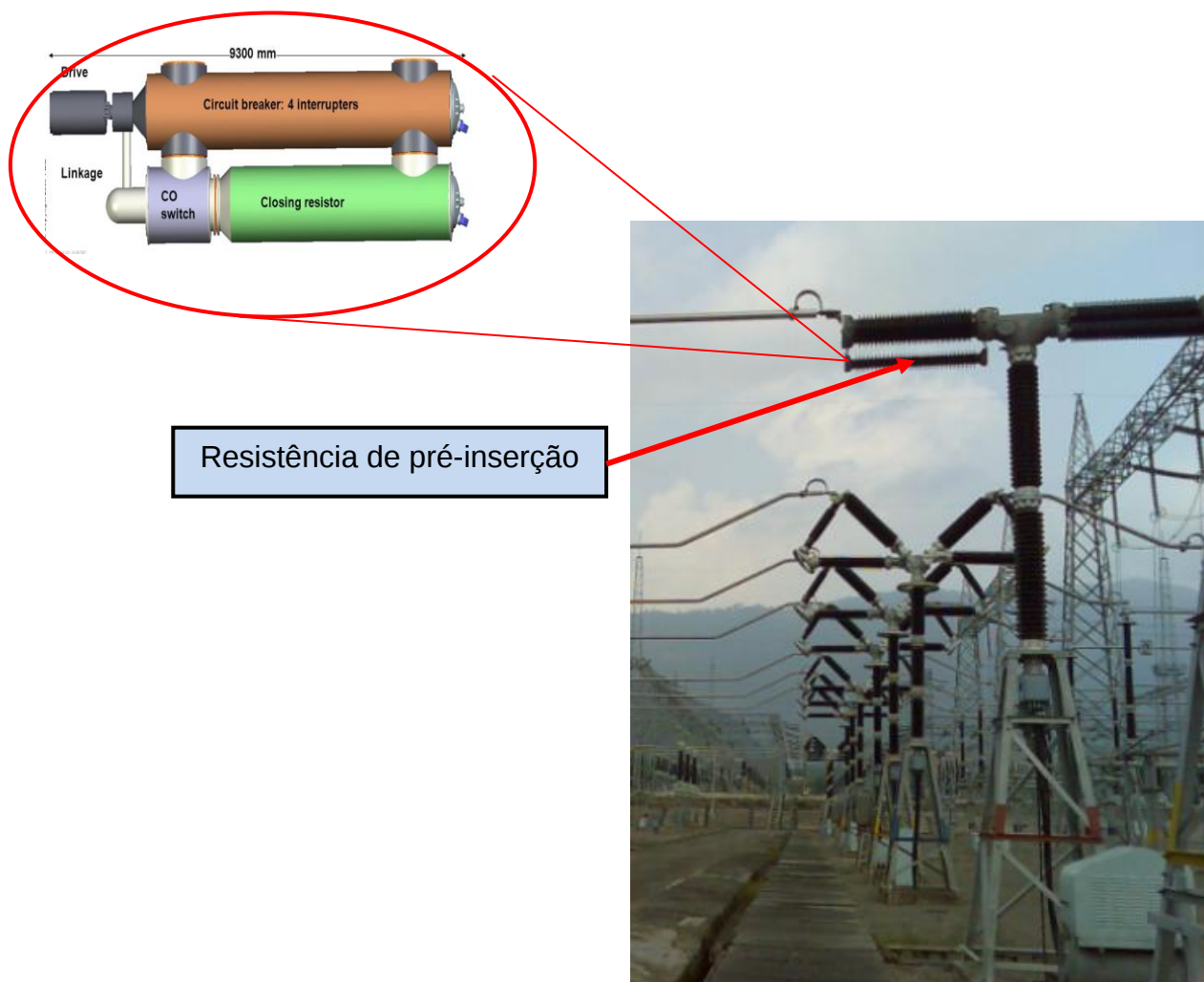


Figura 13 – Disjuntor com resistência de pré-inserção

A corrente através da resistência é calculada pela expressão $I = U/Z$, em que U é a *tensão fase-terra* da instalação e Z a *soma vectorial da resistência de pré-inserção com a impedância de pico dos elementos indutivos e capacitivos da instalação*.

6.3. FECHO CONTROLADO DOS DISJUNTORES

Os inconvenientes referidos no Capítulo 6.2 para o método de *disjuntores com resistências de pré-inserção*, uma parte significativa das empresas de transporte de energia tem optado, recentemente, por uma outra tecnologia para a redução das *sobretensões de manobra*: o **fecho controlado dos disjuntores**.

Embora a manobra de fecho dos disjuntores da rede eléctrica possa ser previamente programado, em função da carga e do modo pretendido para a exploração da rede, a verdade é que quer nestas situações quer nos casos em que há religação, a ordem de fecho (*tempo de comando*) é dada num **momento aleatório** em relação à *forma da onda*, e consequentemente ao *valor da tensão instantânea, entre os contactos principais do disjuntor* (contacto fixo e contacto móvel).

O *tempo de fecho* do disjuntor (que designaremos por t_f) resulta da soma entre o tempo de comando (que designaremos por t_c) e o *tempo de operação*, o necessário

para a energização do circuito de comando e o fecho dos contactos do disjuntor (que designaremos por t_o , tipicamente da ordem dos **50 ms**), ou seja:

$$t_o = t_f + t_c$$

A propagação das *ondas electromagnéticas* inicia-se no instante em que a corrente começa a circular no disjuntor, sendo o *valor inicial da onda de tensão* a **tensão de pré-arco**, que ao ser reduzida permite reduzir o valor *da sobretensão de manobra*.

É este conceito que está na base do método de fecho controlado de disjuntores, onde se procura fechar o disjuntor num tempo que convencionalmente se designa por **tempo óptimo** (que designaremos por t_{op}), que idealmente se verifica quando o *valor instantâneo da onda de tensão* entre os contactos principais do disjuntor é **igual a zero** ($u = 0$).

Este método introduz uma *temporização/atraso* (que designaremos por t_a) no *tempo de operação* para alcançar o *tempo óptimo*, isto é:

$$t_{op} = t_o + t_a$$

Este método de redução **de sobretensões de manobra** utiliza uma unidade de controlo microprocessada que através da *medida de tensão* no **barramento** tem a capacidade de estimar os *sinais de referência em instantes futuros* baseando-se nos *últimos valores determinados para os períodos, amplitudes e passagens por zero dos sinais sinusoidais*, definindo assim o **tempo de atraso** necessário para alcançar o **tempo óptimo**.

A Figura 14 apresenta o princípio de funcionamento do equipamento, bem como o *gráfico de tensões* durante a actuação da unidade.

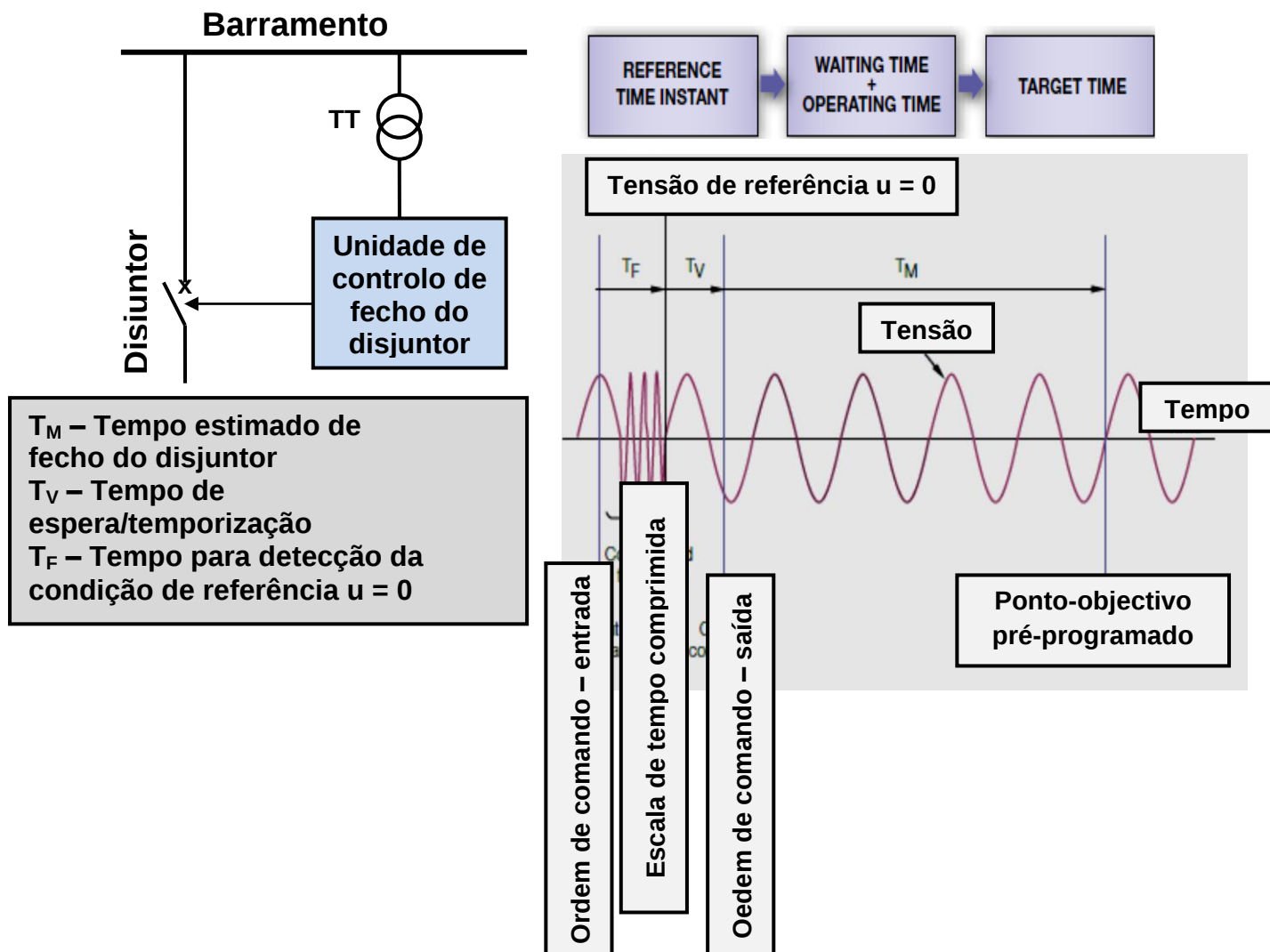


Figura 13 – Funcionamento da unidade de controlo de fecho de disjuntor

O equipamento em questão deve obedecer aos estipulados nas *Normas IEC 60068, 60255, 60801 e 61000 e EN 50081, 50082, 55011A e 61000*.

Quando se utiliza o método de *fecho controlado de disjuntores* é **indispensável** garantir que **todas as ordens de disparo das protecções se sobrepõem** à actuação da *unidade de controlo*; o *tempo óptimo aproximado* deve ser, para tal, **120 ms superior** ao *tempo final de abertura* do disjuntor por *actuação das protecções*.

A mais importante vantagem deste método é a redução dos fenómenos transitórios originados pelas manobras, o que reduz o desgaste e os esforços nos equipamentos e na rede. Esta redução do desgaste e dos esforços traduz-se no retardamento do envelhecimento dos equipamentos e, consequentemente, no aumento da sua vida útil.

¹Engenheiro Electrotécnico – Energia e Sistemas de Potência (IST – 1974)
 Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (FCT-UNL – 2017)
 Consultor em Subestações e Formador Profissional

O Autor não utiliza o Novo Acordo Ortográfico