

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



# **Análise Dielétrica de Celas de Média Tensão**

**Ricardo Jorge Milheiro Brito**

PARA APRECIÇÃO POR JÚRI

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Co-orientador: Engº Nuno Miguel Almeida Soares

30 de Junho de 2014





# Resumo

Existe, hoje em dia, no fornecimento de energia elétrica uma exigência elevadíssima, sendo necessário proteger o sistema elétrico de energia de várias falhas que possam ocorrer. Tendo em conta a importância no sistema elétrico das celas de média tensão é vital que a sua taxa de avarias seja mínima. Torna-se então imperativo que exista um grande controlo no fabrico e dimensionamento deste tipo de equipamento. De forma a garantir a sua qualidade, é necessário que sejam efetuados um conjunto de ensaios tipos e de rotina, como forma de diagnosticar o correto funcionamento da cela. O Laboratório de Alta Tensão da FEUP, como entidade independente é uma mais-valia na realização destes ensaios. É então pretendido com este estudo identificar todos os procedimentos relativos à realização dos vários tipos de ensaios tendo também em vista o fornecimento de documentação de apoio no Laboratório de Alta Tensão na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



# Abstract

There is, today, a very high electricity demand,so it is necessary to protect the electric power system of multiple failures that may occur. Given the importance of the electrical system of medium voltage Switchgears it is vital that its failure rate is minimal. It is therefore imperative that there is a greater control in the manufacture and design of such equipment. To ensure their quality, there must be made a set of tupes and routine tests as a way to diagnose the correct functioning of the switchgear The High Voltage Laboratory of FEUP, as an independent entity is an asset in these tests. It is then intended with this study to identify all procedures relating to the various types of tests, and to support documentation to the High Voltage Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Porto.



# Agradecimentos

Em primeiro queria agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor António Machado e Moura, por ter proporcionado a oportunidade de trabalhar com ele no Laboratório de Alta Tensão.

Ao Eng. Nuno Soares, por toda a ajuda prestada na realização dos ensaios no LAT e durante a realização da tese. À Radar por me ter acompanhado neste semestre aqui no laboratório.

Ao Eng. Mário Ferreira da EFACEC, pela total disponibilidade e pela cedência da Cella de Média de Tensão tornando possível a realização deste trabalho.

Aos melhores, Tiago, Gomas e Manelas, por todas as çenas que já passamos e pelo que estão para vir num futuro próximo. Parece que vamos a Viseu.

Às grandes amígdas que fiz ao longo deste meu percurso da FEUP de durou mais de 5 anos em especial ao Píkos, Neca, Alheira,EDP, Pessoa, Red , Pedro Eugénio, Diogo, Bailarina , Ivo e José Mourinho.

Aos meus pais que sempre me proporcionaram tudo o que precisei. Uma grande obrigado pelo vosso apoio, amor que demonstraram ao longo destes anos.

A todos vós um muito obrigado.

Ricardo Brito



*“Ninguém cometeu maior erro do que aquele que não fez nada,  
só porque podia fazer muito pouco”*

Edmund Burke





# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Objetivos . . . . .	1
1.2	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Celas de Média Tensão</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução . . . . .	3
2.2	Constituição das Celas . . . . .	3
2.2.1	Disjuntor . . . . .	4
2.2.1.1	Disjuntor a Óleo . . . . .	4
2.2.1.2	Disjuntor a Ar . . . . .	5
2.2.1.3	Disjuntor a SF6 . . . . .	6
2.2.1.4	Disjuntor a Vácuo . . . . .	8
2.2.2	Interruptores e Seccionadores . . . . .	12
2.2.3	Fusíveis . . . . .	12
2.2.4	Sistemas de Terras . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Evolução Tecnológica das Celas de Média Tensão</b>	<b>15</b>
3.1	Introdução . . . . .	15
3.2	Evolução Tecnológica de Disjuntores . . . . .	15
3.3	Evolução dos Esquemas Unifilares . . . . .	17
3.4	Novas Tecnologias Utilizadas . . . . .	20
3.4.1	Diagrama de 3 Posições . . . . .	20
3.4.2	Shielded Solid Insulation System (2SIS) . . . . .	21
3.5	Os Desafios para o futuro das Celas de Média Tensão . . . . .	22
3.5.1	Interesse dos Operadores de Sistema . . . . .	22
3.5.2	O desafio das Smartgrids . . . . .	23
3.6	Conclusão . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Laboratório de Alta Tensão - FEUP</b>	<b>25</b>
4.1	Constituição do LAT . . . . .	25
4.2	Medidas de Proteção Passivas . . . . .	26
4.3	Medidas de Proteção Ativas . . . . .	27
4.4	Equipamentos para Ensaio a Frequência Industrial . . . . .	29
4.5	Equipamentos para Ensaio ao Impulso Atmosférico . . . . .	31
4.5.1	Ensaio ao impulso atmosférico . . . . .	34
4.6	Resumo . . . . .	36

<b>5</b>	<b>Especificações de Ensaios à Cella de Média Tensão</b>	<b>37</b>
5.1	Condições de Serviço . . . . .	37
5.2	Características Estipuladas . . . . .	37
5.2.1	Tensão nominal (Ur) e número de fases . . . . .	38
5.2.2	Nível de isolamento estipulado . . . . .	38
5.3	Ensaios Cella de Média Tensão . . . . .	38
5.3.1	Ensaios Tipo (Type Tests) . . . . .	38
5.3.1.1	Agrupamento de Ensaios . . . . .	39
5.3.1.2	Informações a serem incluídas nos relatórios dos testes tipo . . . . .	39
5.3.1.3	Ensaios Dielétricos . . . . .	40
5.3.2	Ensaios Tipo (Ensaios de Rotina) . . . . .	41
5.3.2.1	Testes nos circuitos auxiliares e de controle . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Implementação dos Ensaios Dielétricos</b>	<b>43</b>
6.1	Descrição da Cella Normafix de 24kV a Ensaiar . . . . .	43
6.2	Ensaios à frequência industrial . . . . .	44
6.2.1	Ensaios Fase-fase . . . . .	46
6.2.2	Ensaios Fase-terra . . . . .	47
6.3	Ensaios ao Impulso atmosférico . . . . .	48
6.3.1	Ensaios Fase-terra . . . . .	49
6.3.1.1	Polaridade Negativa . . . . .	50
6.3.1.2	Polaridade Positiva . . . . .	52
6.3.2	Ensaios Fase-Fase . . . . .	53
6.3.2.1	Polaridade Negativa . . . . .	54
6.3.2.2	Polaridade Positiva . . . . .	55
6.4	Resumo ou Conclusões . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>59</b>
7.1	Considerações Finais . . . . .	59
7.2	Trabalhos Futuro . . . . .	60
	<b>Referências</b>	<b>61</b>

# Lista de Figuras

2.1	Esquema tipico de extinção do arco num disjuntor a óleo . . . . .	5
2.2	Esquema tipico de extinção do arco num disjuntor a ar . . . . .	6
2.3	Comparação rigidez dielétrica do SF6 . . . . .	7
2.4	Princípio de extinção do arco num disjuntor a SF6 . . . . .	8
2.5	Interruptor a Vácuo de 11kV . . . . .	9
2.6	interruptor-seccionador com e sem fusivel . . . . .	12
3.1	Exemplo de Disjuntor a Ar; [9] . . . . .	16
3.2	Disjuntor a Oleo com controlo de arco; [10] . . . . .	16
3.3	Disjuntores Extraiveis; [8] . . . . .	17
3.4	Cúbico com disjuntores com isolamento a ar. [9] . . . . .	17
3.5	AIS Tipico com tecnologia com disjuntor extraível e o seu diagrama unifilar; [9] .	18
3.6	AIS Tipico com tecnologia com disjuntor extraível e o seu diagrama unifilar; [9] .	18
3.7	RMU com disjuntor e proteção de transformador; [10] . . . . .	19
3.8	Relé eletromagnético; [10] . . . . .	20
3.9	Diagrama de 3 posições e a unidade de comando tipica; [10] . . . . .	21
3.10	Aparelho de teste de cabos; [10] . . . . .	21
3.11	Dispositivo tipico de SIS; [10] . . . . .	22
4.1	Áreas do LAT e respetiva localização dos equipamentos. O sistema de gerador de choque e de frequência industrial possuem mobilidade de forma a manter as distâncias de segurança; [11] . . . . .	26
4.2	Terras da sala de ensaio; . . . . .	27
4.3	Interligações ao barramento principal; . . . . .	27
4.4	Gráfico que permite obter a distância mínima D necessária para obter os diferentes níveis de tensão. . . . .	28
4.5	Quadro de comando . . . . .	29
4.6	Transformador existente no LAT . . . . .	30
4.8	Regulador e aparelho de comando respetivamente . . . . .	30
4.7	Divisor de tensão do transformador . . . . .	31
4.9	Gerador de choque . . . . .	32
4.10	Gerador de choque . . . . .	33
4.11	Gerador de choque . . . . .	33
4.12	Gerador de choque . . . . .	34
4.13	Onda de impulso completa com definição do tempo de subida (T1), tempo de cauda (T2) e origem virtual (O1) . . . . .	35
4.14	Onda de impulso cortada na frente e determinação do tempo de corte [14] . . . . .	36
5.1	Diagrama de ligação; . . . . .	41

6.1	desenho . . . . .	45
6.2	Sequencia de comando . . . . .	46
6.3	Esquema de montagem; . . . . .	46
6.4	Esquema de comando para ensaio fase-terra . . . . .	47
6.5	a)Ligação à tomada de Ligação de cabo b) Esquema de montagem; . . . . .	48
6.6	Esquema de comando para ensaio fase-terra para o impulso atmosférico . . . . .	49
6.7	Esquema de montagem para impulso atmosférico fase-terra; . . . . .	50
6.8	Forma de onda obtida apenas com resistência de serie do sistema de Gerador de Impulso; . . . . .	50
6.9	Forma de onda obtida na descarga disruptiva no ensaio fase-terra; . . . . .	52
6.10	Forma de onda positiva obtida ensaio fase-terra; . . . . .	53
6.11	Esquema de comando para ensaio fase-fase impulso atmosférico; . . . . .	54
6.12	Esquema de montagem para ensaio fase-fase impulso atmosférico; . . . . .	54
6.13	Onda Fase-fase Negativa; . . . . .	55
6.14	Forma de onda obtida na descarga disruptiva no ensaio fase-fase; . . . . .	56

# Lista de Tabelas

2.1	Tabela com vantagens e desvantagens na Manutenção das várias tecnologias de extinção do arco . . . . .	10
2.2	Tabela com vantagens e desvantagens nas Operações das várias tecnologias de extinção do arco . . . . .	11
5.1	Tabela de Nivel de isolamento Estipulado . . . . .	38
5.2	Tabela Agrupamento de Ensaio . . . . .	39
6.1	Características gerais da cela de Média Tensão . . . . .	44
6.2	Tabela Correção de Parâmetros . . . . .	45
6.3	Tabela Correção de Parâmetros das condições atmosféricas . . . . .	49
6.4	Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda negativa fase-terra . . . . .	51
6.5	Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda positiva fase-terra . . . . .	53
6.6	Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda negativa fase-fase . . . . .	55
6.7	Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda positiva fase-fase . . . . .	56



# Abreviaturas e Símbolos

AIS	Gas Insulated Switchgear
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
DIAS	Digital Impulse Analyser System
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GIS	Gas Insulated Switchgear
IEC	Internacional Electrotechnical Commission
LAT	ALaboratório de Alta Tensão
LPCT	Lower Power Current Transformer
LPVT	Low Power Voltage Transformer
MT	Média Tensão
PT	Posto de Transformação
RMV	Ring Main Unit
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
SIS	Solid Insulated Switchgear





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento e Objetivos

A evolução tecnológica e demográfica bem como a procura de uma melhor qualidade de vida, conduziram a um muito rápido crescimento do consumo energético a nível mundial. A eletricidade é o motor da vida moderna, daí que a importância no fornecimento de energia elétrica atingiu um nível elevadíssimo, considerando-se necessário proteger o sistema elétrico de energia de diversas falhas que possam ocorrer, garantindo ao máximo o contínuo fornecimento da mesma. Desta forma, foram criados equipamentos que permitem proteger geradores, linhas de transmissão, transformadores e outro equipamento durante falhas do sistema. Durante o funcionamento normal, as celas permitem ligar e desligar geradores ou linhas. Por outro lado, em caso de ocorrência de falhas do sistema, por exemplo de curto circuitos, os equipamentos estariam sujeitos a elevadas correntes, que danificariam os equipamentos e conseqüentemente levaria à interrupção do fornecimento de energia. No entanto, as celas conseguem detetar essas falhas e desligar e proteger os equipamentos. Tendo em conta a importância no sistema elétrico deste tipo de equipamentos é vital que a taxa de avarias seja mínima. Torna-se então imperativo que exista um grande controlo no fabrico e dimensionamento deste tipo de equipamento. De forma a garantir a sua qualidade, é necessário que sejam efetuados um conjunto de ensaios tipos e de rotina, como forma de diagnosticar o correto funcionamento da cela. Este tipo de ensaios são realizados nos fabricantes dos equipamentos ou então em laboratórios especializados. O Laboratório de Alta Tensão da FEUP, como entidade independente seria uma mais-valia na realização destes ensaios. Esta dissertação pretende que o LAT adquira as competências necessárias para se poder efetuar uma análise dielétrica de celas de média tensão, através da realização de ensaios. Estes ensaios estão sujeitos a normas internacionais referentes aos ensaios em alta tensão e aos ensaios a celas de média tensão, pelo que foi necessário realizar-se um estudo aprofundado da cela de média tensão, bem como do modo de operação dos diferentes equipamentos do LAT. Esta dissertação tem então como objetivo averiguar o bom desempenho da cela de média tensão, fornecida pela empresa EFACEC, aos diferentes tipos de ensaios realizados. Pretende-se confirmar se os seus níveis de isolamento são os corretos através da realização de ensaios dielétricos.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em 7 capítulos, sendo que no presente capítulo é efetuado um enquadramento do tema e apresentada a estrutura dos capítulos seguintes. No capítulo 2 faz-se uma descrição dos diferentes componentes das celas de média tensão bem como os seus aspetos construtivos e os seus princípios de funcionamento. Também será feita uma descrição dos diferentes tipos de celas. No capítulo 3 pretende-se dar uma perspetiva histórica das várias tecnologias utilizadas nas celas de média tensão e a sua evolução ao longo dos anos. E ainda que novas tecnologias estão a ser utilizadas hoje em dia e os desafios para o futuro das celas de média tensão. No capítulo 4 é apresentada a estrutura do LAT, sendo dado uma ênfase especial aos aspetos de segurança existentes. Neste capítulo é também efetuada uma descrição do equipamento de ensaio, onde são apresentadas as suas características técnicas. No capítulo 5 são descritas as normas internacionais para a realização dos ensaios dielétricos bem como os procedimentos e montagens a ser realizadas. No capítulo 6 é descrita a cela de média tensão a utilizar, bem como a apresentação e análise crítica dos resultados obtidos. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais desta dissertação bem como propostas algumas sugestões para a realização de futuros trabalhos de investigação.

## Capítulo 2

# Celas de Média Tensão

Neste capítulo será feita uma descrição dos diferentes componentes das celas de média tensão bem os seus aspetos construtivos e os seus princípios de funcionamento. Também será feita uma descrição dos diferentes tipos de celas.

### 2.1 Introdução

O sistema elétrico moderno negocia com uma enorme rede e um elevado número de equipamentos. É necessário que existam equipamentos que meçam, regulem e controlem toda a atividade da rede, daí que os dispositivos de proteção de manobra sejam de vital importância.

### 2.2 Constituição das Celas

Assim como podemos utilizar um interruptor das nossas casas para abrir ou fechar um circuito elétrico, também aí existem fusíveis para proteger o circuito elétrico de falhas de picos de corrente ou curto circuitos. Da mesma forma todo o sistema elétrico desde alta a baixa tensão precisa de dispositivos para interromper e proteger os diferentes elementos que compõem o sistema elétrico de energia. Sendo assim, as celas são necessárias para: [1]

- Isolar equipamentos em falha;
- Para dividir grandes redes em secções, para facilitar reparações;
- Para reconfigurar redes de forma a restaurar o fornecimento de energia;
- Para controlar outros equipamentos.

As celas tomam assim um papel de grande importância no controlo das redes elétricas de energia. As mesmas são compostas por vários componentes conforme se especifica de seguida.

## 2.2.1 Disjuntor

Durante correntes de defeito ou outro tipo de falhas no sistema elétrico, os disjuntores sofrem grandes sobrecargas de corrente que poderão resultar em danos permanentes tanto nos equipamentos como na rede de energia. De forma a poder proteger estes equipamentos a corrente de defeito deve ser extinta o mais rápido possível. Também é necessário que depois de extinta a corrente de defeito, o sistema volte a funcionar normalmente o mais rápido possível, de forma a existir uma boa fiabilidade na rede. Assim, o ligar e o desligar de diferentes partes da rede de proteção e controlo, deve ser assegurada pelos disjuntores que conseguem operar sobre fortes correntes, além de que também devem suportar os arcos que poderão formar-se durante ações de manobra. Existem diferentes critérios para classificar diferentes tipos de disjuntores. De acordo com o modo de extinção do arco o disjuntor podem ser dividido em: [2]

- Disjuntor a Óleo;
- Disjuntor a Ar;
- Disjuntor a SF<sub>6</sub>;
- Disjuntor a Vácuo.

### 2.2.1.1 Disjuntor a Óleo

O Óleo mineral possui boas capacidades dielétricas e boas propriedades térmicas condutoras. O seu nível de isolamento depende, no entanto, da quantidade de impurezas presentes. Por isso, é necessário existirem análises recorrentes ao óleo de forma a assegurar o desempenho ideal do disjuntor. Impurezas de carbono formam-se no óleo (especialmente a seguir à extinção de fortes correntes de curto circuito) devido a formação de arcos elétricos. A instabilidade do oxigénio no óleo, é caracterizada pela formação de ácidos e impurezas, que devem ser minimizadas se queremos manter as propriedades de arrefecimento do óleo. A capacidade de isolação está diretamente dependente da mistura do óleo. O óleo deve ser seco e filtrado antes do uso. O mesmo tem também um coeficiente de expansão de  $0.0008 \text{ } ^\circ \text{C}$  e deve ser tomado em conta para assegurar um nível de óleo correto no equipamento. [5]

As propriedades isolantes do óleo podem ser avaliadas através da medição da rigidez elétrica, pela resistividade volúmica ou pelo ângulo de perdas. Os disjuntores a óleo têm assegurado anos de serviço e não são um meio menos capaz de extinção de arcos elétricos. No entanto, nos dias de hoje este tipo de disjuntores a óleo tornam-se obsoletos uma vez exigem um elevado nível de manutenção de forma a manter o óleo em boas condições. Disjuntores a óleo de pequenas dimensões ainda são hoje em dia usadas na Europa para níveis de corrente de curto-circuito baixas e onde os tempos de curto-circuito não são críticos para o sistema. O sistema de interrupção de arcos a óleo é difícil de modelar visto que o esquema do disjuntor é bastante complexo, pois tem de ter em conta 3 líquidos óleo/gás/plasma. Também a viscosidade do óleo varia bastante com a temperatura e a variação da pressão do gás pode situar-se entre um bar e as centenas de bares. [5]

Um esquema típico da extinção do arco em um disjuntor a óleo é mostrado na Figura 2.1

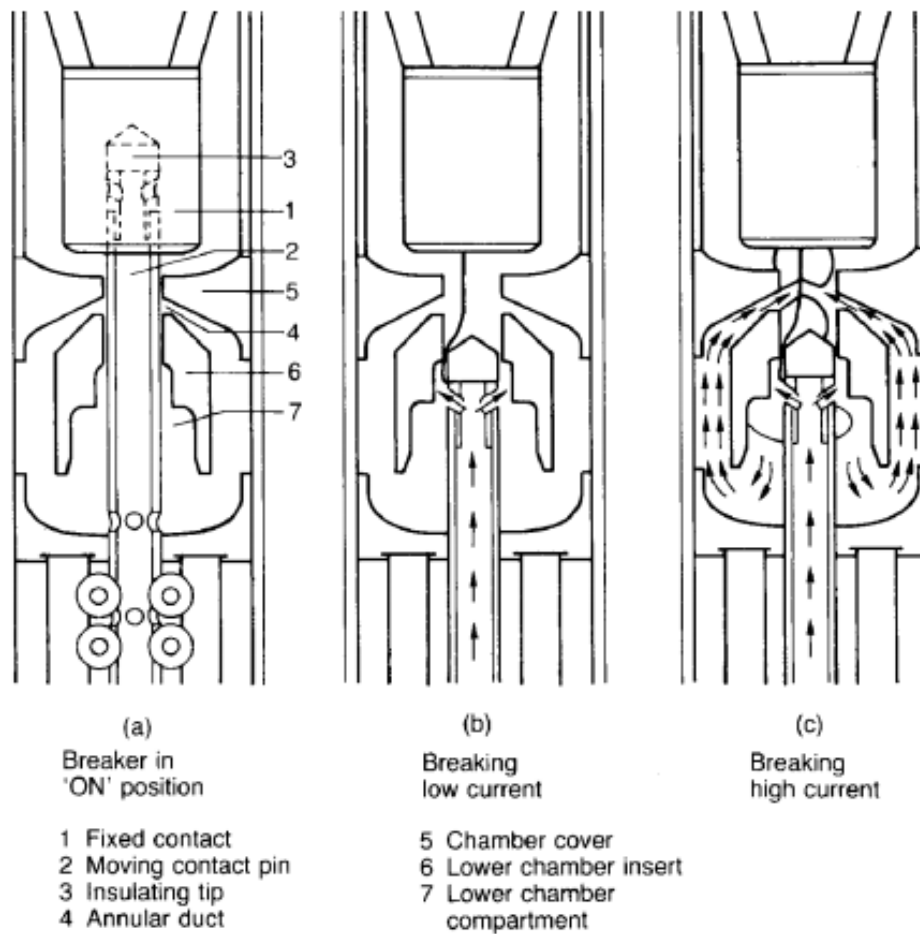


Figura 2.1: Esquema típico de extinção do arco num disjuntor a óleo

### 2.2.1.2 Disjuntor a Ar

Os disjuntores a ar são apenas utilizados normalmente para tensões baixas, mas também estão disponíveis para ser usados em correntes elevadas (até 6000A) e para correntes de curto-circuito de 100KA. A dimensão física destes dispositivos, que contêm grandes câmaras de sopragem, são inviáveis economicamente para tensões superiores a 3.6kV. Apesar de tudo têm uma construção bastante simples uma vez que usam o ar para extinguir os arcos elétricos. Este tipo de equipamentos devem ser cuidadosamente ventilados para fora da principal área de contacto e para fora do invólucro do disjuntor. Estes dispositivos estão apenas dimensionados para interromper as correntes de curto-circuito um número limitado de vezes, daí que seja necessário ter uma manutenção frequente. Os disjuntores de ar comprimido usam o ar comprimido para ajudar os contactos no processo de extinção do arco. Este tipo de disjuntores têm elevadas capacidades de corte de correntes elevadas. São bastante fiáveis e tem uma manutenção bastante reduzida. No entanto,

tendem a ser bastante ruidosos (não são aconselháveis para subestações perto de áreas urbanas) e necessitam também de uma central de armazenamento de ar comprimido fiável. Todos estes fatores aumentam o custo de manutenção em comparação com outro tipo de disjuntores. [1] Um esquema tipo de extinção do arco num disjuntor a ar é mostrado na figura 2.2 .

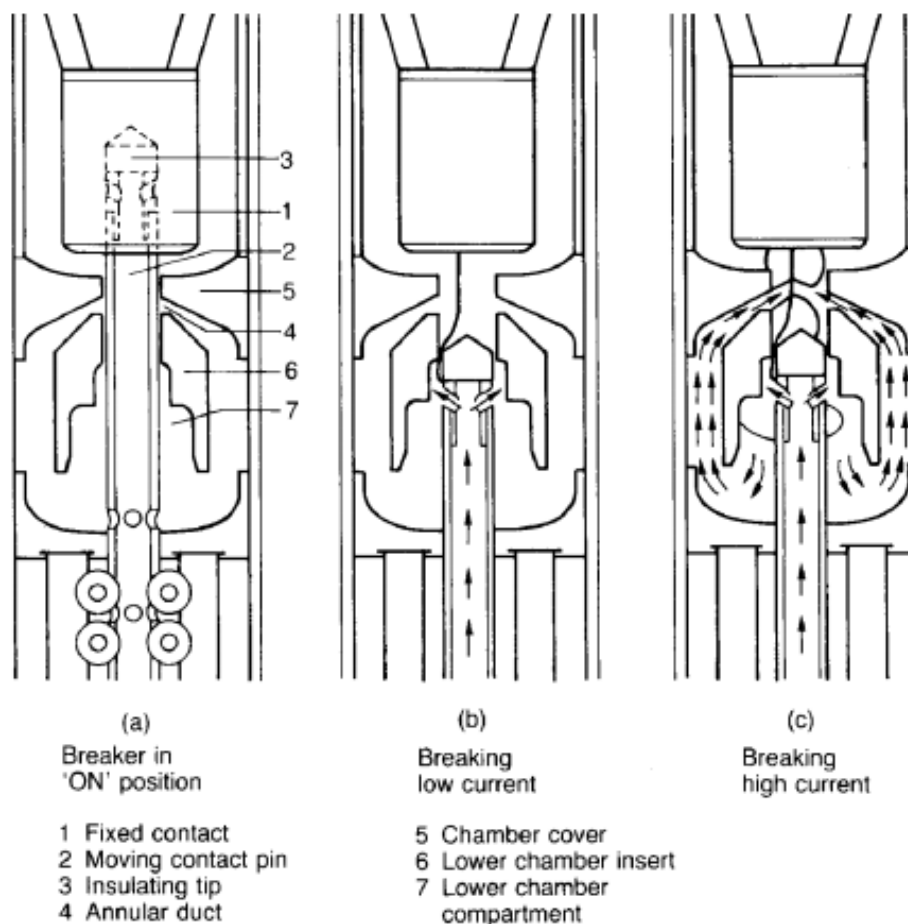


Figura 2.2: Esquema típico de extinção do arco num disjuntor a ar

### 2.2.1.3 Disjuntor a SF6

O Hexafluoreto de Enxofre SF6 é um gás inerte e bastante estável até 50 °C. É incombustível, não tóxico, sem odor e sem cor. A figura 2.3 faz uma comparação da rigidez dielétrica do SF6 em comparação tanto com o ar como o óleo em função da pressão. O SF6 possui excelentes capacidades isolantes entre a pressão de 2 e 6 bar e tem uma rigidez dielétrica 2.5 a 3 vezes maior que o ar à mesma pressão. Este gás é 5 vezes mais pesado que o ar, com um peso molecular de 146 e uma densidade de 6.14 g/l. A densidade normal este gás não passa para o seu estado líquido a não ser que se encontra a temperaturas muito baixas (-40 °C) no entanto o equipamento pode ser construído com aquecedores para prevenir este facto. [3]

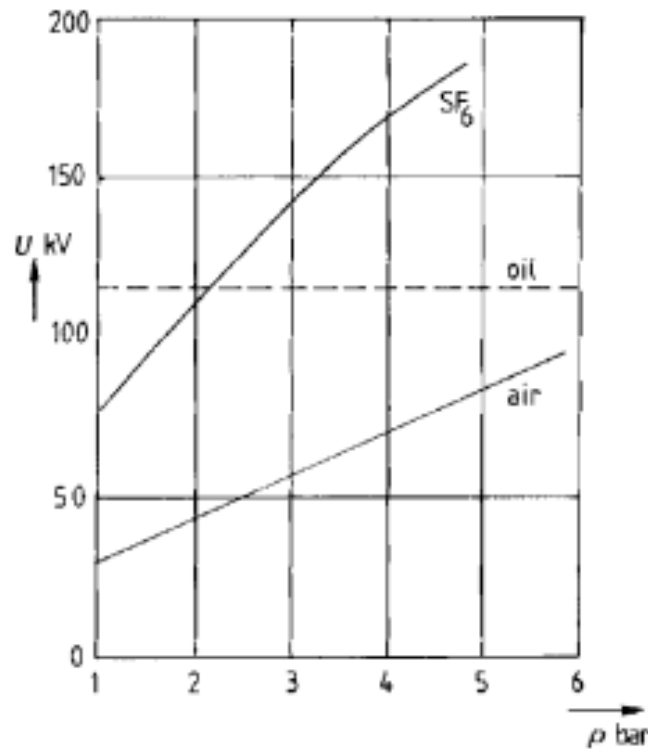


Figura 2.3: Comparação rigidez dielétrica do SF6

Os gases a temperaturas normais são bons isolantes mas as suas moléculas tendem a separar-se a elevadas temperaturas ( 20000K) durante os processos de interrupção de arcos elétricos. O SF6 também se dissocia durante o processo de extinção do arco e é transformado em condutor elétrico mantendo a corrente até que esta se torne nula. Está provado cientificamente que o SF6 é excelente para a extinção de arcos elétricos. Isto advém não só devido à sua estabilidade e rigidez elétrica como também devido ao seu calor específico, condutividade térmica e à sua boa capacidade de agarrar eletrões livres. Tem também uma capacidade de arrefecimento bastante rápida de (alguns  $\mu s$ ) e os iões de enxofre e flúor são combinados rapidamente para formar a capacidade de isolamento do SF6. Todas estas propriedades ajudam na extinção da energia do arco durante o processo de extinção da mesma. Para tensões abaixo dos 36kV o disjuntor nunca será aberto. Para tensões mais elevadas a cela poderá ser aberta para inspeção e manutenção depois de vários milhares de manobras. Produtos secundários poderão formar-se durante o processo de extinção do arco na forma gasosa (principalmente  $SOF_2$  mas também  $SO_2F_2$  e HF) em pequenas concentrações. Sulfitos e Fluoretos não condutores (p. e.  $WF_6$  e  $CuF$  formados a partir da reação com os materiais do disjuntores) podem ser condensados novamente em pequenas quantidades nas paredes dos equipamentos e formar camadas de depósitos. Precauções de higiene e segurança no trabalho devem ser tomadas em conta (luvas, máscaras, óculos de proteção) durante a realização de trabalhos de manutenção. [5]

Para tensões até 15kV e para corte de correntes tanto de disjuntores como contactores pode ser usado o princípio de rotação do arco. Este princípio diz que em vez de se descolar gás frio (ar, SF6 ou óleo) para o arco, o arco é forçado a deslocar-se devido a ação de um campo magnético produzido pela carga ou corrente de curto-circuito. Isto estende e move o arco contra o gás criando um arrefecimento e eventual extinção do arco. As vantagens deste tipo de disjuntores a SF6 podem ser resumidas em: [5]

- Isolamento completo do disjuntor da atmosfera exterior e dos seus contaminantes.
- O facto de não ter óleo reduz o risco de incêndio.
- Normalmente, até 36kV a sela mantém-se selada, sendo que não é necessário efetuar a sua manutenção.
- De um modo geral a manutenção destes equipamentos é reduzida.
- Este tipo de equipamento não necessita de um mecanismo de funcionamento pesado e volumoso, pelo que o seu peso é reduzido.

A figura 2.4 mostra o princípio de extinção do arco num disjuntor a SF6.

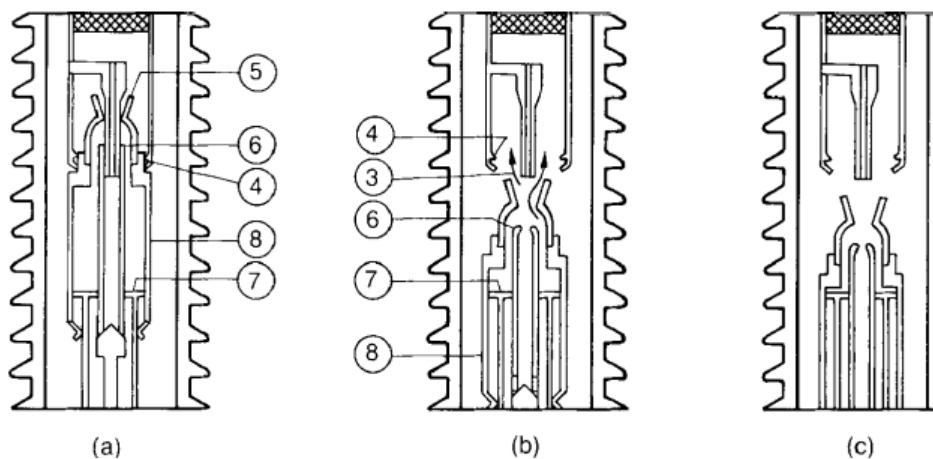


Figura 2.4: Princípio de extinção do arco num disjuntor a SF6

#### 2.2.1.4 Disjuntor a Vácuo

Os tubos dos disjuntores a vácuo com invólucros cerâmicos e metálicos são submetidos a pressões de  $10^{-6}$  até  $10^{-9}$  de forma a atingirem elevada rigidez elétrica. O espaço entre os contactos para estas pressões baixas tem de estar compreendido entre 0 e 20mm e mecanismos de baixo consumo de energia poderão ser utilizados para operar os contactos. A tecnologia necessária para que este disjuntor a vácuo seja fiável está relacionada com os contactos. A interrupção de correntes de curto-circuito envolve a formação de um caminho condutor entre os contactos que se tornam rapidamente isolantes quando a corrente atinge o valor nulo. O arco é extinto quando a corrente atinge o valor nulo. O vapor metálico condutor condensa nas paredes metálicas no interior dos tubos em



vácuo em apenas uns  $\mu\text{s}$  e a rigidez elétrica é restaurada formando-se um circuito aberto. [4] As blindagens previnem que depósitos de vapor metálico provoquem uma redução na rigidez dielétrica do disjuntor de vácuo. Os tempos de formação de arco são de cerca de 10ms a 50Hz. Para evitar um calor excessivo, o sistema está dimensionado para permitir que o arco se desloque para diferentes locais da superfície de contacto, usando para isso o seu próprio campo magnético e usando materiais de contacto especiais. Desta forma, a corrente e as respetivas tensões transitórias são evitadas exceto nos níveis mais baixos de correntes (alguns amperes). O tempo de vida destes dispositivos é bastante longo, (normalmente têm uma vida útil de 20000 interrupções e algumas centenas de operações de curto circuito) até que seja necessário substituir o equipamento. [5] A figura A figura 2.5 mostra um interruptor a vácuo.

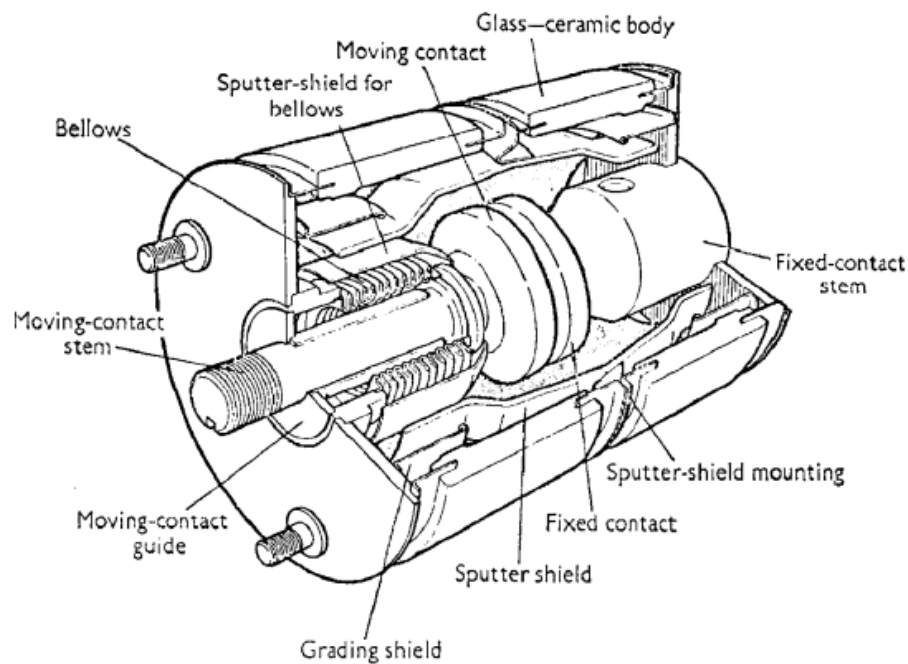


Figura 2.5: Interruptor a Vácuo de 11kV

As vantagens dos disjuntores a vácuo são as seguintes:

- Isolamento completo do disjuntor da atmosfera exterior e dos seus contaminantes.
- O facto de não ter óleo reduz o risco de incêndio.
- De um modo geral a manutenção desde equipamentos é reduzida.
- O equipamento tem um volume reduzido.
- Se necessário também podem incorporar fusíveis para aumentar a capacidade de curto-circuito.

As duas tabelas 2.1 e 2.2 mostram uma comparação com as vantagens e desvantagens das varias tecnologias de extinção de arco elétrico existentes.

Tabela 2.1: Tabela com vantagens e desvantagens na Manutenção das várias tecnologias de extinção do arco

	Pequeno Volume de Óleo (SOV)	SF <sub>6</sub> (GIS)	Vácuo	Ar comprimido	Grande Volume de Óleo (Interior – Aparelhagem em Involucro metálico)	GIS (Interior – Aparelhagem em Involucro metálico)	Vácuo (Interior – Aparelhagem em Involucro metálico)
<b>MANUTENÇÃO</b>	<p><b>Vantagens</b> Pode ser económico para a interrupções até 145kV</p> <p><b>Desvantagens</b> É necessário manutenção após eliminação de um defeito.</p>	<p><b>Vantagens</b> Manutenção Reduzida. Escolhido pela maioria dos fabricantes.</p> <p><b>Desvantagens</b> É necessário ter cuidados especiais no manuseamento do SF<sub>6</sub>.</p>	<p><b>Vantagens</b> Manutenção Reduzida. Ampolas de vácuo facilmente substituíveis.</p> <p><b>Desvantagens</b> Disponibilidade limitada. Podem ser usadas para até 72kV em conjunto com sistema de isolamento a SF<sub>6</sub>. É necessário ampola de vácuo extra.</p>	<p><b>Vantagens</b> Relativamente simples a manutenção do disjuntor. Ainda é encontrado em instalações construídas até 1970 em altas tensões.</p> <p><b>Desvantagens</b> Necessário compressor principal e auxiliar.</p>	<p><b>Vantagens</b> Disponíveis para uso em quadros metálicos até 36kV. Obsoleto para uso exterior. O custo reduzido dos SOV poderá ser aplicado.</p> <p><b>Desvantagens</b> Necessária manutenção regular do óleo. É também necessário um planeamento do espaço antes da sua instalação.</p>	<p><b>Vantagens</b> Manutenção reduzida. Compactos, ocupam um espaço reduzido, disponíveis até aos níveis de tensão mais elevados. Para níveis de tensão abaixo de 36kV, este tipo de construção permite que não seja necessário efetuar manutenções.</p> <p><b>Desvantagens</b> É necessário ter cuidados especiais no manuseamento do SF<sub>6</sub>.</p>	<p><b>Vantagens</b> Manutenção Reduzida. Botijas de vácuo facilmente substituíveis. São muito usados até 36kV especialmente até 12 kV. São bastante leves e de design compacto. Permite construção na vertical ou na horizontal.</p> <p><b>Desvantagens</b> Eventual necessidade de substituição da ampola.</p>

Tabela 2.2: Tabela com vantagens e desvantagens nas Operações das várias tecnologias de extinção do arco

OPERAÇÕES	Pequeno Volume de Óleo (SOV)	SF <sub>6</sub> (GIS)	Vácuo	Ar comprimido	Grande Volume de Óleo (interior – Aparelhagem em Invólucro metálico)	GIS (interior – Aparelhagem em Invólucro metálico)	Vácuo (interior – Aparelhagem em Invólucro metálico)
	<p><b>Vantagens</b></p> <p>Permite ligações aéreas na maioria das configurações. Tem um baixo se as condições ambientais forem as ideais. O eventual alargamento da subestação é independente do fabricante da cela.</p> <p><b>Desvantagens</b></p> <p>Ocupam uma área extensa. São necessários grandes trabalhos nas fundações.</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>Permite ligações aéreas na maioria das configurações. Tem um baixo se as condições ambientais forem as ideais. O eventual alargamento da subestação é independente do fabricante da cela.</p> <p><b>Desvantagens</b></p> <p>Ocupam uma área extensa. São necessários grandes trabalhos nas fundações.</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>Permite ligações aéreas na maioria das configurações. Tem um baixo se as condições ambientais forem as ideais. O eventual alargamento da subestação é independente do fabricante da cela.</p> <p><b>Desvantagens</b></p> <p>Ocupam uma área extensa. São necessários grandes trabalhos nas fundações.</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>-</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>-</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>Boa performance independentemente da condições atmosféricas de poluição quando corretamente protegidos. Disponíveis com proteção com discriminação da fase e sem proteção com discriminação de fase. Proteção completa contra as partes ativas.</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>Bom desempenho independentemente da condições atmosféricas de poluição quando corretamente protegidos. Proteção completa contra as partes ativas.</p>

## 2.2.2 Interruptores e Seccionadores

Os interruptores são dispositivos capazes da interrupção da carga, ou seja, conseguem interromper correntes até ao seu valor nominal. Os seccionadores têm uma capacidade de interrupção de corrente desprezável e são apenas usadas em condições de vazio. Os interruptores de baixa tensão (<1000 V ) são normalmente isolados a ar e os de média tensão podem ser a ar, óleo ou SF6. Os interruptores têm molas que asseguram uma ação rápida. Ambos são dimensionados para serem termicamente estáveis e adequados (por exemplo o elemento de temperatura não pode ser excedido) para que sejam assegurados os regimes contínuos de corrente e os regimes de curta duração (1 a 3s) de correntes de defeito. [5] A figura 2.6 mostra um interruptor-seccionador com e sem fusível.

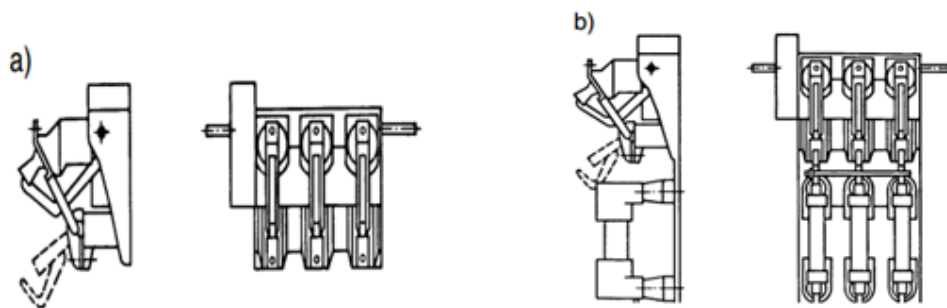


Figura 2.6: interruptor-seccionador com e sem fusível

## 2.2.3 Fusíveis

Os fusíveis devem ser capazes de suportar uma determinada carga sem se deteriorarem e devem ser capazes de interromper a corrente de curto-circuito definida para o disjuntor. A maioria dos fusíveis existem combinados com outros componentes. É bastante comum encontrar componentes como interruptor-fusível ou interruptor-seccionador. Estas combinações cumprem os requisitos técnicos individuais dos elementos ativos destas combinações. [1]

## 2.2.4 Sistemas de Terras

De modo a assegurar a proteção enquanto ocorre a manutenção dos equipamentos, todos os diferentes componentes do circuito principal que estão acessíveis devem estar ligados a terra antes de ser efetuada qualquer manutenção. Isto não é aplicável às partes amovíveis, que se tornam apenas acessíveis após separadas da cela. Este requisito é cumprido através de um condutor que se estende ao longo de todo o comprimento do invólucro metálico da cela. A densidade de corrente do condutor de ligação à terra é feito de cobre e é mantida a cerca de  $200 \text{ A/mm}^2$  sob as condições de defeito à terra especificados; no entanto, a sua secção transversal é sempre mantido a mais de  $30 \text{ mm}^2$ . A terra da cela acaba num terminal adequado, destinado à ligação ao sistema de terras da instalação. O invólucro de cada unidade funcional da cela também está ligado ao condutor

de terra. Todas as partes metálicas e que não pertencem ao circuito principal, também deve estar ligadas diretamente ao condutor terra ou então através da estrutura metálica. Os seccionadores de terra são seccionadores mecânicos capazes de escoar uma determinada corrente de curto-circuito em segurança durante um determinado período de tempo. [7]



## Capítulo 3

# Evolução Tecnológica das Celas de Média Tensão

Neste capítulo pretende-se dar uma perspetiva histórica das várias tecnologias utilizadas nas celas de média tensão e a sua evolução ao longo dos anos. Que novas tecnologias estão a ser utilizadas hoje em dia e os desafios para o futuro das celas de média tensão.

### 3.1 Introdução

Os operadores dos sistemas de transmissão e de distribuição necessitam que a rede sejam estável. Visto que as celas de média e alta tensão têm um tempo de vida de 30 a 40 anos, faz com que os operadores de sistema consigam gerir melhor o sistema, caso não existam mudanças nos hábitos de consumos dos utilizadores. No entanto, as grandes evoluções tecnológicas em celas de média e alta tensão ocorrem a cada 20 ou 30 anos. Nos últimos anos, com o desenvolvimento das Smart Grids fez com que fosse necessário criar equipamentos com novos requisitos em função das novas necessidades. Com a evolução da rede, os operadores de sistema preconizaram que as celas fossem mais flexíveis e com maior automação através mecanismos remotos e que a rede tivesse um maior número de pontos de medição. Preconizaram também que os disjuntores fossem livres de manutenção e que fosse possível serem utilizados em qualquer ambiente com uma grande esperança de vida. [9] De um ponto de vista económico, já não se considera apenas o custo de aquisição mas sim o custo total da vida do equipamento, isto é, inclui o custo de construção, da manutenção e o custo de remoção da cela de serviço. Assim, todos estes fatores devem ser considerados na construção da nova geração de celas no contexto atual das redes elétricas. Vários componentes da cela foram sofrendo evoluções conforme descrevemos de seguida.

### 3.2 Evolução Tecnológica de Disjuntores

A primeira tecnologia a ser utilizada para interrupção de arco foi o ar. Estes disjuntores eram bastante volumosos pois necessitavam de grandes volumes para a expansão do arco e eram bastante

ruidosos na sua extinção. Necessitavam também de uma elevada manutenção e por isso eram extraíveis. A figura 3.1 mostra um disjuntor a ar.



Figura 3.1: Exemplo de Disjuntor a Ar; [9]

Num esforço de reduzir esse volume, foram criados os disjuntores a óleo. No entanto, estes necessitavam de grande manutenção, a troca de óleo após algumas operações. Além disso, os disjuntores a óleo não são seguros de manobrar pois existe o risco de incêndio. Falhas nos disjuntores a óleo podem resultar facilmente em acidentes fatais, tanto para os operadores como para os seus residentes nas imediações. [10]



Figura 3.2: Disjuntor a Oleo com controlo de arco; [10]

No final dos anos 60, começaram a surgir os disjuntores a SF<sub>6</sub> e a vácuo. Ambas as tecnologias trouxeram várias vantagens bastante semelhantes. Eles eram suficientemente compactos em comparação com os disjuntores isolados a ar ou a óleo. Eram muito mais seguros, pois reduziam o risco de incêndios. Ficaram ao longo do tempo cada vez mais fiáveis. A sua *endurance*



elétrica também aumentou, pois estes disjuntores eram capazes de extinguir um maior número de falhas. [9] Como consequência desta melhoria da fiabilidade, a manutenção foi sendo cada vez mais reduzida e podemos considerar que nos modelos mais avançados a sua manutenção é praticamente nula. Normalmente, os disjuntores são removíveis do seu quadro modular devido à forma como são instalados nos diferentes locais. A figura 3.3 mostram disjuntores extraíveis.



Figura 3.3: Disjuntores Extraíveis; [8]

### 3.3 Evolução dos Esquemas Unifilares

De 1930 a 1950, a maioria dos quadros de comutação eram isolados a ar em cubículos de alvenaria. Apenas uma rede simples impedia de aceder às suas partes ativas. [9] Depois, com uma maior consciência a nível de segurança, foram sendo gradualmente substituídas por aparelhagens em invólucro metálico com disjuntor isolado a ar (AIS – Air Insulated Switchgear) com disjuntores extraíveis de ar ou óleo ou de SF6 ou de vácuo. A figura 3.4 mostra um cubículo com disjuntores com isolamento a ar.



Figura 3.4: Cúbico com disjuntores com isolamento a ar. [9]

Os diagramas unifilares com disjuntores extraíveis são os mais antigos e ainda são utilizados em algumas aplicações. A desconexão é feita removendo o módulo onde estão localizados os disjuntores, tornando mais fácil a sua visualização. Para que o acesso seja possível aos cabos ou outros componentes no interior da cela, o módulo extraível deve estar ligado à terra ou então por conectores de terra ligados diretamente aos terminais dos cabos. A manutenção do disjuntor era

então bastante fácil e este tipo de tecnologia era necessária para os disjuntores mais antigos. A figura 3.5 mostra um AIS Típico com tecnologia com disjuntor extraível e o seu diagrama unifilar.



Figura 3.5: AIS Típico com tecnologia com disjuntor extraível e o seu diagrama unifilar; [9]

No entanto é necessário ter em atenção algumas dificuldades no emprego desta tecnologia. O acesso remoto ao interruptor não é prático pois pode desgastar o módulo extraível. Também a ligação do barramento à terra necessita de uma estrutura própria que é difícil de manusear. Para testar os cabos é necessário aceder ao compartimento onde eles se encontram. E finalmente, este equipamento tem de estar instalado em locais com boa qualidade do ar, pois são sensíveis às condições ambientais devido a tecnologia do AIS utilizada. Mais recentemente, a partir dos anos 1990, os disjuntores auto regeneráveis passaram a ser cada vez mais utilizados. Existem algumas variações deste tipo de dispositivos em invólucro metálico, onde os componentes isolados são compostos de epóxi ou outras resinas. Este tipo de painéis são normalmente designados por SIS (Solid Insulated Switchgear). No entanto, tanto os painéis AIS como os SIS também são sensíveis às condições do ambiente (poeiras, humidade, etc) se não forem corretamente instalados em salas protegidas. Devido a isto foram criadas as GIS (Gas insulated Switchgear) nos anos 90 isoladas a SF6. A figura 3.6 mostra um GIS Típico e o seu diagrama unifilar.



Figura 3.6: AIS Típico com tecnologia com disjuntor extraível e o seu diagrama unifilar; [9]

No entanto é preciso ter em conta que as operações não são tão intuitivas, pois o diagrama contém 5 posições, misturando a montante 3 posições seccionador / seccionador de terra e a jusante as duas posições do disjuntor. Isto é importante pois é necessário ter em conta que os cabos

são ligados à terra através do fecho do disjuntor, que deve permanecer fechado enquanto se efetuam as manobras por parte do operador. As celas de distribuição secundária também seguirão uma evolução semelhante, mas com algumas diferenças. As correntes nominais ao nível da distribuição secundária são mais baixas. Foram então utilizados simples interruptores com proteção de fusível de forma a reduzir custos. Uma cela típica deste tipo tem 3 funções, dois interruptores e um interruptor fusível para proteger o transformador de MT/BT. A configuração *Ring Main Unit* (RMU) foi criada nos anos 50. Para que as unidades ficassem mais compactas, estas 3 funções foram incluídas num único módulo. As primeiras RMU foram a óleo, com um inconveniente de terem um risco de incêndio elevado. As RMU mais modernas, utilizam SF6 que proporciona unidades mais compactas e que não afetadas por condições ambientais. Além disso, hoje em dia, as celas necessitam de proteger transformadores MT/BT mais potentes e devem ser mais precisos, daí que estejam também equipados com disjuntores para proteção dos transformadores. No entanto, a vantagem de serem compactos e de terem este tipo de diagrama unifilar com RMU, torna-se um inconveniente quando a cela necessita de ter 4 ou 5 funções. A figura 3.7 mostra um RMU com disjuntor e proteção de transformador.



Figura 3.7: RMU com disjuntor e proteção de transformador; [10]

As tecnologias de sensores e de relés de proteção evoluíram paralelamente pois ambos os componentes estão diretamente relacionados. Os sensores, como transformadores de corrente, devem fornecer constantemente dados sobre a corrente, sendo que estes dados são transmitidos para os relés de proteção. Podemos dizer que o relé é o cérebro, visto que é capaz de receber e analisar os sinais e decidir se o sinal é normal ou se representa uma falha. Em caso de falha, o relé de proteção envia uma mensagem ao mecanismo do disjuntor. Até aos anos 70, os relés de proteção eram fabricados usando tecnologia eletromecânica. Molas e discos faziam parte destes relés e necessitavam de uma elevada potência para operar. Como consequência, os transformadores de corrente tinham de suportar elevadas cargas. Eram também necessário 5A para operar estes relés de proteção. Nos anos 80, os relés eletrónicos de proteção necessitavam cada vez menos da potência dos transformadores de corrente. Eles poderiam operar com transformadores de corrente de 1A. No entanto, o setor de alta tensão é muito conservador e muitos dos seus utilizadores ainda pediam transformadores de corrente de 5A, mesmo não sendo necessários. Mais tarde, nos anos 90, surgiram os primeiros relés digitais. Com esta tecnologia, a necessidade de potência por parte dos transformadores de corrente foi bastante reduzida. Uma nova categoria de transformadores de

corrente foi desenvolvida: os transformadores de corrente de baixa potência. Estes enviavam um sinal que representava a corrente no primário. Apesar das vantagens de redução de espaço e flexibilidade, o seu uso ainda era bastante reduzido em detrimento dos transformadores de corrente de 5A e de 1A. Hoje em dia, a situação é bastante diferente. Os relés digitais são muito comuns e as vantagens dos transformadores de corrente de baixa potência são reconhecidas. Além disso, as normas IEC foram publicadas, sendo mais facilitada a troca de transformadores de corrente de baixa potência. A figura 3.8 mostra um relé eletromagnético.



Figura 3.8: Relé eletromagnético; [10]

## 3.4 Novas Tecnologias Utilizadas

### 3.4.1 Diagrama de 3 Posições

Hoje em dia, mesmo que a tecnologia não tenha sido muito alterada, a tendência é a utilização de disjuntores a vácuo em aplicações secundárias. Desenvolvimentos recentes trouxeram novas combinações, mantendo os mesmos benefícios conhecidos do diagrama de 3 posições de GIS RMU mas usando o vácuo. O novo acordo proposto inclui a montante um interruptor de carga a vácuo ou um disjuntor e um seccionador de terra a jusante, proporcionando isolamento duplo entre os cabos e os barramentos. O esquema de 3 posições, fechado, aberto e à terra, é o modo mais simples e mais seguro para operar a cela. A comutação e desconexão do circuito são feitas em uma única operação dentro de um interruptor de vácuo inovador, que tem uma maior distância de isolamento em relação ao design tradicional e com superfície controlada para os contactos do arco. A jusante o cabo de terra é controlado por ar através da ação rápida do seccionador de terra. A figura 3.9 mostra o diagrama de 3 posições.

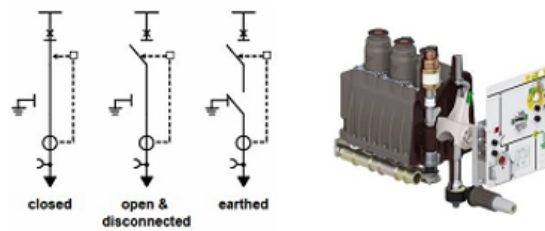


Figura 3.9: Diagrama de 3 posições e a unidade de comando típica; [10]

A segurança do operador é reforçada com um aparelho de teste de cabos com acesso frontal em conformidade com as novas especificações sobre Celas de média tensão para o teste de cabos definidos na norma IEC 62271-200. A figura 3.10 mostra o aparelho de teste de cabos.



Figura 3.10: Aparelho de teste de cabos; [10]

Antes do teste de cabo, abrindo o interruptor de desconexão ou desligando o disjuntor e fechando o seccionador à terra é possível haver um isolamento duplo entre o cabo e o barramento. De seguida, um interruptor de ligação terra poderá ser aberto para dar acesso direto aos cabos. Durante o teste, a caixa dos cabos permanece fechada, as conexões dos cabos permanecem intactas e os principais contactos do seccionador de terra permanecem na mesma posição. Este procedimento de teste recomendado garante a mais alta segurança para operadores de teste e evita qualquer dano no circuito principal ou nas ligações dos cabos.

### 3.4.2 Shielded Solid Insulation System (2SIS)

Os GIS RMU's representam uma grande vantagem. Esta nova disposição de componentes deve estar pronta para variadas condições de ambiente e ser "Livre de manutenção". Isto é assegurado pelo sistema de isolamento blindado (2SIS) envolvendo todo o circuito de média tensão, utilizando tecnologias bem conhecidas (epóxi, EPDM) de uma forma única. Nos barramentos, a cápsula do disjuntor a vácuo e o seccionador de terra estão envolvidos por um isolamento condutor que liga à terra. Enquanto se mantém constante o campo elétrico dentro do isolamento, todas as superfícies estão ao mesmo potencial e ligadas à terra, com um grau de proteção de acordo com a norma IEC 62271-201. A continuidade do barramento de terra é assegurada pela sua superfície plana, que combina a simplicidade de instalação, modularidade e flexibilidade dos conetores convencionais

com o desenho compacto e seguro dos conectores isolados. A figura 3.11 mostra um dispositivo de SIS.

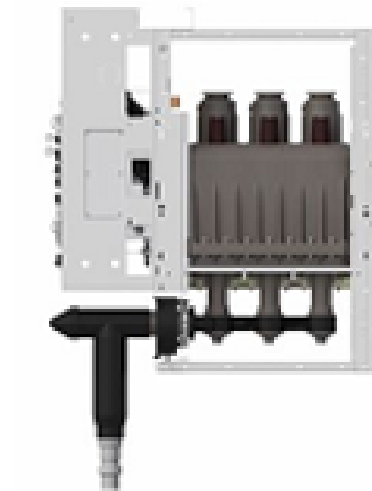


Figura 3.11: Dispositivo típico de SIS; [10]

O sistema 2SIS melhora a segurança pois reduz o risco de arco interno, faz com que a cela seja totalmente insensível a ambientes mais severos e prolonga a vida útil com manutenção reduzida e menor custo total. O sistema 2SIS é aplicável para qualquer função de comutação tais como interruptores de corte em carga ou disjuntores, funções de medição ou transformadores de corrente e tensão. Comparado com o GIS, esta nova geração de celas com tecnologia 2SIS e diagramas de 3 posições oferece muito melhor modularidade. Dispositivos de controle e monitorização modernos e relés de proteção digitais são integrados nas novas celas com a possibilidade de usar LPCTs e LPVTs compactos, tornando as soluções avançadas de gestão muito acessíveis. A modularidade do quadro é estendida até à sua arquitetura, ligando vários dispositivos eletrônicos inteligentes, a fim de alcançar as funções necessárias de controle e monitorização nas formas mais flexíveis. [9]

## 3.5 Os Desafios para o futuro das Celas de Média Tensão

### 3.5.1 Interesse dos Operadores de Sistema

Um grande estudo global foi efetuado para identificar não só quais as necessidades de energia, mas também para antecipar essa necessidade no futuro, em particular nos países que têm um elevado desenvolvimento. Os operadores de distribuição do sistema têm expressado um elevado interesse na segurança, fiabilidade, relação custo-eficácia, e facilidade de evolução da rede. Disjuntores livres de manutenção, capazes de serem usados em qualquer ambiente com longa vida são cada vez mais requisitados. Os operadores do sistema têm cada vez mais e mais atenção ao

custo total de propriedade, incluindo a aquisição, construção, instalação, manutenção e custos do final de vida dos equipamentos.

### 3.5.2 O desafio das Smartgrids

As Smart Grids têm dois objetivos. O primeiro é otimizar a relação entre a procura e a oferta de energia e a segunda é conseguir integrar cada vez mais a geração dispersa com energias renováveis. Alterar o sistema de gestão da rede em que existe uma produção centralizada de produção de energia para um sistema de produção dispersa é um dos grandes desafios. Olhando para as redes existentes e fazendo algumas experiências, é possível realçar algumas mais-valias em que as celas poderão ajudar para atingir este objetivo. Durante alguns anos, testes foram realizados e ficou provado que adicionando disjuntores nas malhas da rede de distribuição é um modo eficiente para diminuir o número de clientes afetados por uma falha de energia e reduz também o tempo que demora a repor energia. A rede de distribuição está dispersa em forma de anel aberto, permitindo uma solução alternativa em caso de falha. Normalmente é equipada com interruptores manuais, com apenas um dispositivo de proteção por linha, localizado na subestação AT / MT. A crescente demanda pela qualidade de serviço levou à implantação de subestações controladas remotamente, levando a um menor tempo de reposição de serviço. No entanto, em caso de avaria, todos os clientes fornecidos por essa linha afetada são desligados. Mas, na realidade, os clientes a montante da falha poderão também ter sido afetados. O uso de disjuntores em vez de interruptores no anel permite desligar apenas os clientes ligados à linha afetada, criando um benefício significativo em relação ao número de clientes afetados em comparação com as soluções tradicionais. Numa perspetiva ideal, as soluções de baixo custo de disjuntores e sensores, sem arquitetura de rede específica e de fácil upgrade, poderão reduzir a interrupção a um nível rentável. Hoje em dia existem respostas economicamente viáveis para as necessidades de subestações MT / BT nas seguintes áreas:

- Disjuntores integrados e otimizados para aplicações nas redes, incluindo transformadores de corrente de baixa potência compactos;
- Adaptação dos sistemas de proteção existentes através da redução do intervalo de tempo de decisões ou a otimização de sistema de decisão de entrada e saída de linhas nas subestações.

Da mesma forma é mais eficiente e preciso usar disjuntores para proteger transformadores de MT/BT. Tradicionalmente, os transformadores de MT/BT têm sido protegidos por interruptores-fusíveis devido ao seu custo reduzido em comparação com os disjuntores extraíveis ou relés. A grande vantagem em usar um RMU com um disjuntor de baixo custo é que assim é garantida uma melhor proteção do transformador num custo de vida equivalente ao disjuntor-fusível, permitindo que desta forma o seu custo seja viável. Um transformador MT/BT tem normalmente uma taxa de avarias baixa. Todas as falhas são falhas internas ou defeitos a terra e são localizadas no primário ou secundário. Apenas os disjuntores conseguem detetar de forma rápida e eficiente as falhas no seu estado inicial. Da mesma maneira, os fusíveis não conseguem extinguir o defeito ou então têm

que esperar que o defeito se torne defeito fase-fase ou fase-fase-fase, de forma a poderem atuar corretamente. As principais vantagens do uso de disjuntores são:

- Um maior desempenho para correntes, sobrecargas, defeitos fase-fase e fase-terra de pequena magnitude;
- Melhor desempenho em diferentes condições ambientais;
- Manutenção reduzida.;

A mudança de disjuntores extraíveis para disjuntores fixos e o uso de vácuo como forma de extinção do arco faz com que estes tenham uma boa relação custo/desempenho. A propagação destes disjuntores mais modernos e fiáveis foi um dos grandes fatores de aceitação dos disjuntores fixos. O controlo remoto será obrigatório para as redes inteligentes. Um dos efeitos é que as celas incluirão dispositivos inteligentes que forneceram uma melhor otimização. O controlo remoto das celas torna-se essencial e deve ser muito fácil. Os consumidores finais não terão interrupções de energia durante longos períodos de tempo. A automação das redes, auto-regeneração usando remoto controlo é a única maneira de reduzir o tempo de interrupção de energia. A otimização das cargas em algumas partes da rede de distribuição, também será possível utilizando o controlo remoto para operar as celas e alterar as configurações de proteção. Naturalmente, o modo de operação manual também será muito fácil. Para isso, não importa a tecnologia, o modo de operação de três posições (linha, aberto / desligado e ligação à terra) é o mais simples, aumentando também a segurança. Uma grande vantagem deste modo de operação com 3 posições é que mantém-se tanto para o controlo remoto como para locais de operação manual. Os Transformadores de corrente de baixa potência (LPCT) e transformadores de baixa tensão de potência (LPVT) serão essenciais para o enorme desenvolvimento do gerenciamento de energia. Os equipamentos de medição terão de ser rentáveis, compactos e fiáveis. A modularidade e flexibilidade são obrigatórios para atender ao número variado de diferentes aplicações.

### **3.6 Conclusão**

A evolução necessária das redes traz a oportunidade de introduzir novos critérios para a escolha de celas de média tensão, tais como flexibilidade, insensibilidade às condições ambientais, redução de volume, otimização de controlos remotos. Há uma grande confiança de que o sistema 2SIS usando o diagrama de 3 posições e interruptores de vácuo estão bem adaptados para a chegada das Smart Grids. Esta arquitetura pode resolver um grande número de aplicações nas redes de distribuição de média tensão, mas graças à sua flexibilidade e modularidade, também desafia algumas aplicações de gama baixa, onde tradicionalmente o equipamento é extraível é utilizado. Combinando a compacticidade e a modularidade através inovações tecnológicas, a nova geração de celas cria um verdadeiro avanço nos hábitos e especificações das celas de média tensão.



## Capítulo 4

# Laboratório de Alta Tensão - FEUP

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve descrição do LAT descrevendo os seus equipamentos e as medidas de segurança implementadas. Este capítulo torna-se importante pois, para efetuar uma correta utilização do laboratório é necessário conhecer os seus equipamentos e o modo de funcionamento destes bem como as medidas de segurança para evitar os riscos elétricos associados a este tipo de atividades laboratoriais. Relativamente à estrutura do LAT serão examinados os seguintes parâmetros:

- Constituição;
- Medidas de proteção ativas;
- Medidas de proteção passivas;

Relativamente aos equipamentos existentes no LAT serão divididos em 2 grupos:

- Constituição;
- Equipamento utilizado para ensaios a frequência industrial;
- Equipamento utilizado para ensaios ao choque;

### 4.1 Constituição do LAT

O Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto está situado no edifício J do departamento de Engenharia Eletrotécnica, sendo composto por uma área aproximada  $147m^2$ , com aproximadamente 11 m de altura. O laboratório encontra-se dividido em 4 quadrantes principais, tal como demonstrado na figura [4.1](#)

- Quadrante de sistema de frequência industrial;
- Quadrante de sistema de choque;
- Entrada

- Material de TET, reserva e armazenamento;

[11]



Figura 4.1: Áreas do LAT e respetiva localização dos equipamentos. O sistema de gerador de choque e de frequência industrial possuem mobilidade de forma a manter as distâncias de segurança; [11]

O laboratório possui uma zona de comando com acesso à sala de ensaios e uma zona de observação. A sala de comando possui os equipamentos de controlo e medição dos sistemas em ensaio, e os mecanismos de acionamento e de proteção localizados no quadro elétrico.

## 4.2 Medidas de Proteção Passivas

A proteção passiva do laboratório, de forma a garantir a segurança durante a realização de ensaios, é assegurada através de um revestimento parcial da sua estrutura. Esta proteção é então assegurada através de uma gaiola de Faraday constituída por chapas metálicas de zinco com uma espessura de 1.5mm à volta de toda a estrutura do edifício, sendo que no pavimento as chapas têm uma espessura de 2.5mm de forma a blindar o edifício. Todas as chapas encontram-se eletricamente interligadas de forma a escoar todas as cargas que se poderão formar durante a realização dos ensaios. [12] Esta blindagem realizada através destas chapas torna-se possível uma vez que estas se encontram ligadas ao barramento, em diversos pontos do edifício de forma a garantir um correto isolamento. Para garantir que todas as partes se encontrem ao mesmo potencial existe um barramento de cobre de secção de 5x50 mm que envolve todo o edifício. Este barramento é considerado o principal, pois a ele estão ligadas todas as terras de proteção encontrando-se ligado à terra em 3 pontos:

- Ligação às fundações do edifício, com uma impedância aproximada de 0,7 Ohm (medidos no verão);
- Ligação exclusiva à terra exterior ao edifício com elétrodo simples;;
- Ligação à terra do posto de transformação que alimenta o laboratório;

As terras da cela de ensaio podem ser vistas na figura 4.2

O barramento secundário encontra-se na estrutura superior do LAT, sendo formado por um cabo de cobre de secção de  $10\text{mm}^2$ . [13]



Figura 4.2: Terras da sala de ensaio;

Este barramento secundário é ligado ao principal através de 4 baixadas, em diversos locais da estrutura. Estas baixadas são realizadas em fio de cobre e tem como objetivo realizar uma correta conexão de forma a obter-se uma impedância global idêntica. As ligações ao barramento principal podem ser vistas na figura 4.3



Figura 4.3: Interligações ao barramento principal;

O portão do laboratório, as janelas e a porta da sala de comando e da sala de observação foram blindadas com uma rede de zinco com um espaçamento de  $5*5\text{cm}$  ligados ao barramento. [11] Devido à área do laboratório não é possível manter as distâncias de segurança de ambos os equipamentos se estes forem mantidos no mesmo local onde são realizados os ensaios. Assim é necessário que aquando da realização de um ensaio, o outro sistema deve ser colocado no canto oposto do laboratório e deverá ser curto circuitado. Tomando como exemplo a capacidade máxima do transformador de  $600\text{kV}$ , a sua colocação no centro do laboratório indica que qualquer outro objeto a um potencial diferente seja colocado a uma distância mínima de  $2,4\text{m}$ , sendo necessário então deslocar o gerador de choque.

### 4.3 Medidas de Proteção Ativas

As medidas de proteção passivas surgem devido a necessidade de evitar que os utilizadores possam tomar ações que os coloquem em perigo de vida, tal como a entrada na sala de ensaios durante a realização de um ensaio em teste. Também devido a área do LAT, existe uma limitação

física em que apenas permite a realização de cada tipo de ensaio de cada vez. Apenas pode ser realizado um ensaio a frequência industrial ou um ensaio ao choque, pois é necessário garantir as distâncias mínimas exigidas para a proteção entre. A figura 4.4 mostra o gráfico que relaciona o pico de tensão aplicada e a distância mínima exigida, conseguido assim saber-se as distâncias necessárias entre os objetos e as estruturas energizadas ou ligadas à terra. Essa distância ao solo depende do tipo de objeto a ensaiar, sendo que estão descritas nos respetivos documentos das normas. [12]

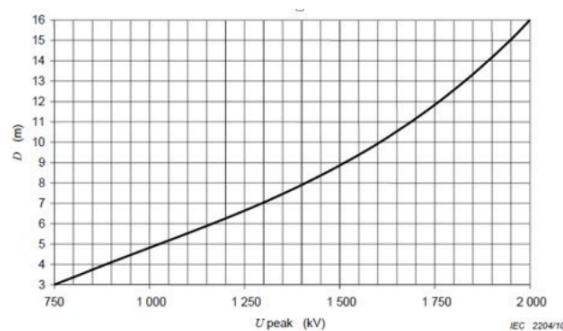


Figura 4.4: Gráfico que permite obter a distância mínima D necessária para obter os diferentes níveis de tensão.

Sendo assim para uma capacidade máxima do transformador de 600kV temos obrigatoriamente de criar uma distância em torno deste de pelo 2,4m em relação as paredes e também de 2,4 metros em relação ao divisor de tensão. No caso do gerador de choque a distância em torno deste seria de 2,4 metros e de 4 metros em relação ao divisor de tensão. Estas distâncias mínimas evitam o aparecimento de descargas disruptivas entre pontos que se encontram a potenciais diferentes. Assim aquando da realização de um ensaio é imprescindível inutilizar os restantes equipamentos. Estas medidas de segurança são implementadas no quadro de comando por ação de relés ou contactores sendo que estas ações estão associadas a condições lógicas. Uma dessas medidas é a interrupção da alimentação dos equipamentos caso ocorra a abertura da gaiola de Faraday, quer seja pela abertura do portão ou porta que dá acesso à sala de ensaio, devido à ação de sensores de fecho. [12] Na figura 4.5, está representado o quadro de comando, sendo que este se encontra dividido em 3 níveis de segurança.



Figura 4.5: Quadro de comando

O primeiro, o nível com menor grau de segurança permite a utilização das tomadas de apoio à sala de ensaio e da iluminação através das armaduras fluorescentes existentes no topo do LAT. Neste nível de segurança existe a possibilidade de tanto o portão de entrada do LAT como a porta para a sala de comando se encontrarem abertas. O segundo nível de segurança permite realizar a alimentação de alguns equipamentos, nomeadamente: o comando do gerador de choque, o comando das esferas de calibração e os projetores de halogénio. Para aceder a este nível, torna-se necessário que o portão de acesso ao LAT se encontre fechado e que os equipamentos sejam ativados no quadro de comando. De salientar que para realizar a alimentação do comando do gerador de choque é necessário ultrapassar um subnível de segurança, que consiste na ativação do mesmo através de uma chave. No terceiro nível de segurança surge a permissão para realizar os ensaios de alta tensão e, é permitido a alimentação do gerador de choque e do transformador. No entanto, é restringida a utilização destes, uma vez que só é permitido a utilização de apenas um dos equipamentos durante cada ensaio, como referido anteriormente. Neste nível de segurança, tanto o portão de acesso ao LAT como a porta da sala de comando têm de estar obrigatoriamente fechadas. Apenas desta forma é que existe permissão para ativar os equipamentos a partir do quadro. [11]

#### 4.4 Equipamentos para Ensaio a Frequência Industrial

O sistema de ensaio à frequência industrial é composto por quatro unidades, sendo estas, o transformador, o divisor de tensão, o regulador e o controlador. O transformador da marca Phenix, visível na figura 4.6, é um equipamento que produz uma potência máxima de 300kVA, atingindo uma tensão máxima de ensaio de 600kV.

Este valor de tensão está dividido pelos dois módulos do transformador, que se encontram interligados através de uma conexão, que permite em caso de necessidade utilizar apenas um módulo e realizar ensaios até 300kV. Outro parâmetro de saída, para além da tensão, que é necessário realçar é o valor da corrente, que para os 600kV tem uma intensidade de 0.5A. [13] O divisor de



Figura 4.6: Transformador existente no LAT

tensão tem como objetivo transformar a tensão aplicada pelo transformador numa tensão que seja passível de realizar uma medição segura, figura 4.7.

Este equipamento apresenta uma potência de 23kVA e uma capacidade ao nível dos seus condensadores de 200 pF, quando sujeito a uma tensão de 600kV e a uma frequência de 50Hz. [12] Na Figura 4.8 a), encontra-se o regulador, de onde sai a alimentação do transformador, sendo o seu funcionamento semelhante ao de um autotransformador. Já na Figura 5.9 4.8 b), é possível observar o controlador, o qual é usado pelo operador para controlar o regulador.



Figura 4.8: Regulador e aparelho de comando respetivamente

Também associados ao sistema estão as esferas de calibração que tem o objetivo de calibração dos valores registados pelo voltímetro do controlador. No entanto, este equipamento só é utilizado



Figura 4.7: Divisor de tensão do transformador

com uma periodicidade de 6 meses, por forma a verificar o estado da calibração e em caso de necessidade realizar a mesma.

## 4.5 Equipamentos para Ensaio ao Impulso Atmosférico

Para se efetuar os ensaios ao choque, o LAT está equipado com um gerador de choque da marca Haefely, com uma tensão máxima de 1200 kV e é composto por cinco elementos distintos, nomeadamente, a torre de gerador de impulsos, a unidade de alimentação da torre, o divisor de tensão, a unidade de comando e a unidade de análise. [12] A torre de gerador de impulso, Figura 4.9, é composta por doze andares, sendo que cada um tem a capacidade de acumular até 100 kV, através de um condensador de 75 mF.

Por andar existe a possibilidade de colocar três resistências, uma resistência de carga e duas resistências de paralelo, as quais apresentam valores diferentes com o intuito de controlar a forma de onda aplicada. Existem também, em cada andar, duas esferas de descarga, denominadas explosores, utilizadas para realizar as descargas de cada andar. No topo da torre existe ainda uma



Figura 4.9: Gerador de choque

resistência que faz a ligação entre a torre e o divisor de tensão. Tal como no caso do sistema de ensaio à frequência industrial, existe um divisor de tensão que tem o objetivo de medir a tensão a que ocorre a descarga. O modelo em causa apresenta uma capacidade ao nível dos seus condensadores internos de 1200 pF, [13] Figura 4.10.

O equipamento que realiza a alimentação da torre, é uma unidade de retificação que é responsável pela geração de alta tensão e, conseqüentemente, pelo carregamento dos condensadores da torre. Esta unidade é alimentada através do quadro de comando do LAT. A unidade de controlo deste equipamento, visível na Figura 4.12 à esquerda, permite estipular a tensão de ensaio pretendida, assim como definir a tempo de carregamento dos condensadores. Esta transmite a informação à unidade de alimentação de forma a ativar o carregamento dos condensadores e a comandar o momento de disparo, que pode ser automático ou manual.



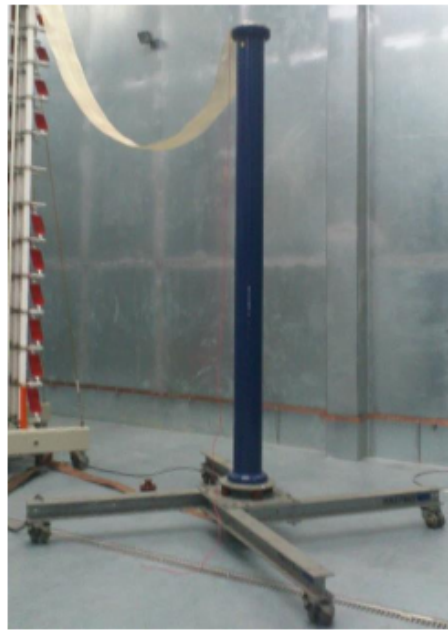


Figura 4.10: Gerador de choque



Figura 4.11: Gerador de choque

Por fim, a unidade de análise, denominada Sistema Digital de Análise do Impulso, apresentada na Figura 4.12 à direita, serve para realizar a análise dos valores obtidos através do divisor de tensão, nomeadamente o valor da tensão máxima, o valor dos tempos de frente e de cauda, a forma de onda da tensão, entre outros parâmetros.



Figura 4.12: Gerador de choque

É de salientar também que a alteração dos valores da tensão na unidade de controlo faz com que o DIAS regule um mecanismo existente na torre, que faz alterar as distâncias entre as esferas explosoras de cada um dos andares.

#### 4.5.1 Ensaio ao impulso atmosférico

A onda de saída tem o intuito de reproduzir o comportamento de uma descarga atmosférica por forma a avaliar o comportamento dos equipamentos a esta ocorrência natural, ou a forma de uma onda de sobretensão com origem em manobras de seccionamento de um circuito do sistema elétrico. A norma IEC 60060-1 define a tensão de impulso como um transitório aperiódico, intencional, que cresce rapidamente até ao seu valor de pico e decresce de forma lenta para o valor nulo. [14] A onda de impulso completa é decomposta em:

- Tempo de Frente  $T_1$  - parâmetro virtual definido pelo intervalo de tempo entre 30 % e 90 % do valor de pico da onda obtida durante o ensaio, pontos A e B da Figura 4.13 respetivamente. . A linearização da curva entre esses pontos permite obter a origem virtual da onda (O1) e o tempo médio de subida da tensão. Para tempos de subida inferiores a 20  $\mu s$  considera -se uma onda de choque atmosférico e para tempos de subida iguais ou superiores a 20  $\mu s$  considera -se uma onda de sobretensão de manobra. [14] ;
- Tempo de Cauda  $T_2$  - parâmetro definido pelo tempo entre a origem virtual (O1) e o ponto onde a tensão atinge 50 % do valor máximo registado [14];

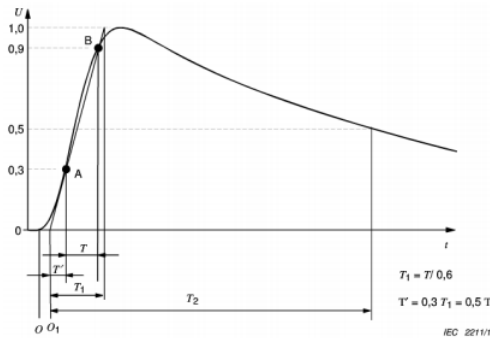


Figura 4.13: Onda de impulso completa com definição do tempo de subida (T1), tempo de cauda (T2) e origem virtual (O1)

Por definição, uma onda de choque atmosférico possui um tempo de frente de  $1,2 \mu\text{s}$  e tempo de cauda de  $50 \mu\text{s}$ , sendo esta vulgarmente representada por  $1,2/50 \mu\text{s}$ . Por sua vez, uma sobretenção de manobra possui declives mais lentos e define-se por uma forma de  $250/2500 \mu\text{s}$ . A forma da onda aplicada ao objeto de ensaio é alcançada através do dimensionamento das resistências em paralelo e em série do gerador de choque. O tempo de frente é controlado pelas resistências em série, enquanto o tempo de cauda é manipulado pelas resistências em paralelo. A norma internacional contempla tolerâncias entre os valores especificados para impulsos normalizados e os valores calculados pela curva de tensão de ensaio de:

- Valor de tensão de teste:  $\pm 3 \%$  ;
- Tempo de Frente :  $\pm 30 \%$  ;
- Tempo de Cauda:  $\pm 30 \%$  ;

Caso não se verifique uma descarga disruptiva no equipamento ensaiado após aplicação de tensão, o impulso obtido tem a forma completa, ou seja, verifica-se nitidamente os valores de frente e cauda segundo o dimensionamento efetuado. No entanto, se ocorrer disrupção, resulta uma onda de impulso cortada, isto é, há um colapso rápido da tensão para valores praticamente nulos. O colapso da onda pode ocorrer durante a ascensão do valor de tensão, no valor máximo ou já na cauda da mesma. Nesta situação define-se tempo de corte ( $T_c$ ) como o intervalo entre a origem virtual e o momento de corte, que por sua vez é determinado pela interseção do valor máximo de tensão obtido com a linearização dos pontos de 70% (ponto C) e 10% (ponto D) dessa tensão máxima. Na Figura 4.14 está representada uma frente de onda cortada e exemplifica a determinação do tempo de corte.

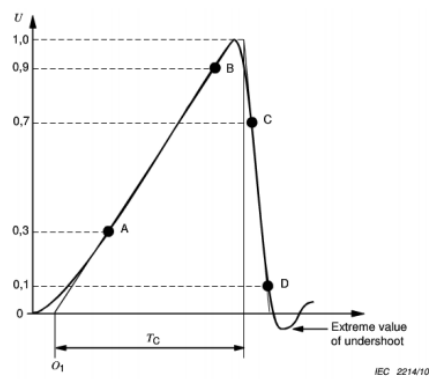


Figura 4.14: Onda de impulso cortada na frente e determinação do tempo de corte [14]

## 4.6 Resumo

Para a utilização do LAT é necessário um conhecimento quer das medidas de segurança passiva como ativas existentes, de forma a poder-se manobrar os diferentes equipamentos da forma mais correta e segura. Para além disso também é necessário conhecer todas as normas que condicionam a realização dos ensaios nomeadamente a norma IEC60060, relativa às distâncias entre equipamentos em função da tensão. Finalmente, tendo em conta os equipamentos existentes e as suas características torna-se então possível a realização dos ensaios dielétricos à cela de média tensão.

## Capítulo 5

# Especificações de Ensaio à Cella de Média Tensão

### 5.1 Condições de Serviço

No caso da cela em ensaio, a Normafix de 24kV, é uma cela com aparelhagem em invólucro metálico para o interior, que trabalha em condições normais de serviço: a) A temperatura ambiente não deve exceder 40 ° C e seu valor médio, medido ao longo de um período de 24 h, não deve exceda 35 ° C. Os valores preferenciais da temperatura mínima do ar ambiente são de -5 ° C, -15 ° C e -25 ° C. b) A influência da radiação solar pode ser ignorada. c) A altitude é não superior a 1 000 m. d) O ar ambiente não é significativamente poluído por poeira, fumaça, gases corrosivos e / ou inflamáveis, vapores ou sal. O fabricante assumirá que, na ausência de algum requisito por parte do usuário, o ambiente é o ideal. e) As condições de humidade são as seguintes: - O valor médio da humidade relativa, medida ao longo de um período de 24 h, não seja superior a 95- O valor médio da pressão do vapor de água, ao longo de um período de 24 h, não deve exceder 2,2 kPa; - O valor médio da humidade relativa, durante um período de um mês, não deve exceder 90- O valor médio da pressão do vapor de água, ao longo de um período de um mês, não deve exceder 1,8 kPa. Para estas condições, a condensação pode ocorrer ocasionalmente. f) Vibrações devido a causas externas à cela e aparelhagem de comando ou a tremores de terra são insignificante em relação às funções normais do equipamento em operação. O fabricante assumirá que, na ausência de algum requisito por parte do usuário, o ambiente é o ideal. [?]

### 5.2 Características Estipuladas

Dependendo da aplicação do equipamento, diferentes características do equipamento deve ser fornecidas tais como disjuntores, circuitos principal e auxiliares, pelo fabricante.

### 5.2.1 Tensão nominal (Ur) e número de fases

A tensão nominal é igual à tensão máxima do sistema para o qual o equipamento projetado. Ele indica o valor máximo da "mais alta tensão do sistema" de redes que o equipamento possa ser utilizado (Cláusula 9 de IEC-60038). O valor padrão de tensão nominal para a cela em estudo é a seguinte: [?] Serie I – 24 kV.

### 5.2.2 Nível de isolamento estipulado

Tabela 5.1: Tabela de Nível de isolamento Estipulado

Tensão Nominal Ur kV (r.m.s)	Tensão Nominal da Frequência Industrial Ud kV (r.m.s)		Tensão Nominal de Choque Atmosférico Up kV (valor de pico)	
	Fase-terra	Fase-fase	Fase-terra	Fase-fase
24	50	60	95	110
			125	145

## 5.3 Ensaios Cella de Média Tensão

De acordo com as normas IEC 62271-1 e 62271-200, existem vários tipos de ensaios a realizar:

- Ensaios de Tipo (Type Tests) – este tipo de testes têm o objetivo de verificar as características estipuladas da cela e aparelhos de comando, os mecanismos de operação e equipamentos auxiliares;
- Ensaios de Rotina (Routine Tests) – Os testes de rotina têm o propósito de revelar falhas no material ou da sua construção. Eles não prejudicam as propriedades e fiabilidade do objeto de teste. Os testes de rotina deve ser feita sempre que possível nas instalações do fabricante de cada aparelho fabricado, para assegurar está em conformidade. Qualquer teste de rotina pode ser feito no local;
- Manutenção reduzida.;

### 5.3.1 Ensaios Tipo (Type Tests)

No caso da cela Normafix de 24kV ensaiada os seguintes testes devem ser obrigatórios para os testes tipo: a) Ensaios para verificar o nível de isolamento do equipamento; b) Ensaios para provar que o aumento de temperatura de qualquer parte do equipamento e medição da resistência dos circuitos; c) Ensaios para demonstrar a capacidade dos circuitos principais e dos de terra aos valores de pico de corrente admissível e de corrente admissível de curta duração; d) Ensaios para comprovar a capacidade dos interruptores; e) Ensaios para comprovar o funcionamento dos dispositivos de comutação incluídos e das partes removíveis; f) Ensaios para verificar o código de proteção IP; g) Ensaios para verificar os circuitos auxiliares e de controlo; (Norma IEC - 62271

-200) Testes obrigatórios se aplicáveis: h) Ensaios para verificar a proteção do equipamento contra choques mecânicos; i) Ensaios para verificar a proteção das pessoas contra os efeitos elétricos perigosos; j) Ensaios para verificar a qualidade do gás nos compartimentos; k) Ensaios para verificar os apertos dos compartimentos cheios de líquido ou gás; l) Os testes para avaliar os efeitos do arco devido a um arco interno; m) Os testes de compatibilidade eletromagnética (EMC); n) Ensaios de radiação x para interruptores a vácuo; o) Ensaios para verificar a proteção do equipamento contra efeitos externos devido às condições climáticas adversas. p) Ensaios dielétricos em circuitos de testes de cabos. Testes opcionais (se requeridos pelos compradores): q) Ensaios para avaliar o isolamento do equipamento através da medição de descargas parciais r) Ensaios de poluição artificiais para isoladores ao ar livre. [?]

### 5.3.1.1 Agrupamento de Ensaios

Tabela 5.2: Tabela Agrupamento de Ensaios

Grupo	Teste Tipo
1	Testes dielétricos nos circuitos principais Tensão de Radio interferência (r.i.v)
2	Medição da resistência no circuito principal Subidas de temperatura
3	Valor de pico de corrente admissível e corrente admissível de curta duração Testes de Esforço
4	Testes para verificar o grau de proteção da estrutura Testes de tensão de aperto Testes Mecânicos Testes Ambientais Testes Dielétricos nos circuitos de controlo e auxiliares

### 5.3.1.2 Informações a serem incluídas nos relatórios dos testes tipo

Os resultados de todos os testes tipo realizados devem ser incluídos nos relatórios teste, que devem conterem informação suficiente para comprovar que as características estipuladas e as normas estejam de acordo. Em particular a seguinte informação devem ser incluída. - Fabricante; - Designação do modelo e número de série da cela e da aparelhagem de comando ensaiadas; - Características da cela e da aparelhagem de comando ensaiadas de acordo com as especificações das normas IEC; - Descrição geral (pelo fabricante) da cela e aparelhagem de comando ensaiadas, incluindo o número de polos; - Fabricante, tipo, número de série e as especificações das partes essenciais, quando aplicável (por exemplo: mecanismos de funcionamento, interruptores, impedâncias shunt); - Detalhes gerais da estrutura de suporte dos dispositivos de comutação ou disjuntores de manobra; - Detalhes gerais do mecanismo de e dispositivos utilizados durante os testes, quando aplicável; - Fotografias para ilustrar a condição da aparelhagem de antes e depois do teste; - Esquemas e datas de ensaio que representam os equipamentos ensaiados. - Os números de referência de todos os esquemas, incluindo os números de revisão submetidos para identificar

as partes essenciais da aparelhagem de teste; - Informações sobre as montagens (incluindo o esquema de circuito de teste); - Apresentação do comportamento da aparelhagem durante os testes, a sua condição após os testes e quaisquer peças renovadas ou reparadas durante os testes; - Registos das quantidades de testes durante todos os direitos de teste ou ensaio, conforme especificado na norma IEC relevante. [16]

### 5.3.1.3 Ensaio Dielétricos

Os ensaios dielétricos das celas de média tensão devem ser realizados de acordo com a norma internacional IEC 60060-1.

**Condições atmosféricas durante os testes** Existem 3 condicionantes atmosféricas para a realização de testes dielétricos, sendo elas:

- Temperatura de referência:  $t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Pressão atmosférica absoluta:  $p_0=1013\text{ mbar}$ .
- Humidade absoluta:  $h_0=11\text{ g/m}^3$

Caso estes parâmetros não sejam correspondidos durante o ensaio é necessário realizar uma correção do valor da tensão a ensaiar. Para o caso da nossa cela onde o isolamento é a ar usa-se o fator de correção  $K_f$ . O fator de correção  $K_f$  é dado pela seguinte expressão:

**Critérios para validar os ensaios** a) Ensaio à frequência industrial Considera-se que a cela de média tensão e os seus componentes passaram ao ensaio se nenhuma descarga disruptiva ocorrer. [16]

b) Ensaio ao impulso atmosférico Seguir o procedimento do ensaio B da norma IEC 60060-1, adaptado para celas e equipamentos de controlo com isolamento autorregeneradora e isolamento não autorregeneradora. Considera-se que as celas e os equipamentos de controlo passaram os ensaios ao choque se as seguintes condições forem cumpridas: [16] - Cada série tem, pelo menos, 15 ensaios; - O número de descargas disruptivas não deve exceder dois por cada série. - Não deverá ocorrer nenhuma descarga disruptiva no isolamento. Isto é confirmado pela realização de 5 impulso consecutivos após a última descarga disruptiva. Este procedimento leva a um número máximo de 25 impulsos por série. [16]

**Condições para a aplicação das tensões de ensaios** Os valores das tensões aplicadas devem estar em conformidade com os valores da tabela de Nível de isolamento estipulado.

- Ensaio a frequência industrial: O ensaio consiste na aplicação de uma tensão que deve ser mantida durante aproximadamente um minuto.

A figura 5.1 seguinte mostra o diagrama de ligações do aparelho a ser testado.



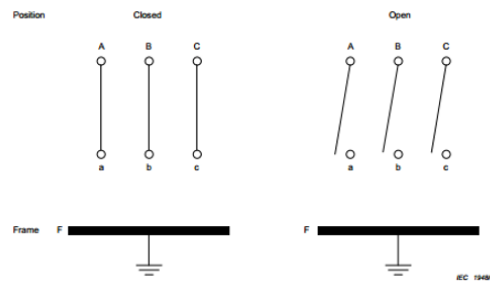


Figura 5.1: Diagrama de ligação;

Para o caso do ensaio fase – terra o disjuntor deve estar na sua posição fechada. O valor total da tensão  $U_t$  é aplicada a uma fase e o terminal oposto é ligado a terra. As outras duas fases são ligadas à terra de ensaio e o invólucro metálico também é ligado à terra de ensaio. No caso do ensaio fase-fase o disjuntor deve estar na posição aberta. O modo de montagem para a aplicação da tensão é idêntico ao da fase-terra.

- Ensaios ao choque: As celas e os seus componentes deve ser sujeitos ao ensaio de choque atmosférico apenas em condições secas. Os ensaios deve serem realizados usando ambas as polaridades de tensão usando a onda de referência de 1,2/50  $\mu$ s presente na norma IEC 60060-1. Para o caso do ensaio fase – terra o disjuntor deve estar na sua posição fechada. O valor total da tensão  $U_t$  é aplicada a uma fase e o terminal oposto é ligado a terra. As outras duas fases são ligadas à terra de ensaio e o invólucro metálico também é ligado à terra de ensaio. No caso do ensaio fase-fase o disjuntor deve estar na posição aberta. O modo de montagem para a aplicação da tensão é idêntico ao da fase-terra.

### 5.3.2 Ensaios Tipo (Ensaios de Rotina)

Um ensaio a frequência industrial de curta duração deve ser aplicado. A tensão de ensaio deve ser realizado a seco e seguir as mesmas normas dos ensaios de tipo. O valor da tensão é de 1kV e tem a duração de 1s.

#### 5.3.2.1 Testes nos circuitos auxiliares e de controlo

A natureza dos materiais, a qualidade de montagem, o acabamento e, se necessário, o isolamento contra a corrosão do invólucro metálico deve ser verificado. Uma inspeção visual também é necessária para garantir o bom isolamento térmico. Todos os componentes dos circuitos auxiliares e principal deve ser revisto para verificar a sua correta montagem e funcionamento.



## Capítulo 6

# Implementação dos Ensaios Dielétricos

### 6.1 Descrição da Cella Normafix de 24kV a Ensaiar

A cela de média tensão usada nesta dissertação é um quadro modular isolado a ar, para colocação em redes de média tensão bem como nas mais variadas indústrias e aplicações. As celas são totalmente concebidas em chapa de aço, estruturadas em unidades modulares e equipadas com diversas funções como sejam a inclusão de interruptores e disjuntores e a sua construção modular permite a incorporação de várias opções.

Tem como características gerais:

- Barramento em cobre;
- Montagem de cabos secos até 240 mm<sup>2</sup>;
- Compartimento suplementar baixa tensão;
- Disjuntores em SF<sub>6</sub>;
- Visualização do Seccionamento;
- Controlo de presença de tensão e de concordância de fases;
- Encravamentos mecânicos e eléctricos;
- Sistema de protecção contra o arco interno;
- Sem manutenção;
- Construção modular;
- Concebido para instalação em PT's de exterior.

As características técnicas são mostradas na tabela [6.1](#)

Tabela 6.1: Características gerais da cela de Média Tensão

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS		
Tensão nominal	kV	24
Nível de isolamento:		
- ao choque (1,2 / 50 $\mu$ s)	kV pico	125
- à frequência industrial (50 Hz / 1 min.)	kV eficaz	50
Corrente nominal do barramento	A	630
Corrente de curta duração admissível	kA eficaz	16 (3 seg)
Grau de protecção dos invólucros		IP3XC
INTERRUPTOR		
Corrente nominal	A	400 ou 630
Corrente de curta duração admissível	kA eficaz	16 (3 s)
Poder de fecho	kA pico	40
SECCIONADOR		
Corrente nominal	A	400 ou 630
Corrente de curta duração admissível	kA eficaz	16 (3 s)
DISJUNTOR		
Corrente nominal	A	400 ou 630
Poder de corte	kA eficaz	16
Poder de fecho	kA pico	40

A figura ?? mostra um esquema dos diferentes componentes da cela de média tensão.

## 6.2 Ensaios à frequência industrial

Foram realizados dois ensaios tipo à frequência industrial de 50kV e de 60kV. Para isto foram aplicadas tensões de 50kV e 60kV durante 60 segundos para verificar se o isolamento da cela era o correto.

Para a implementação dos ensaios dielétricos à frequência industrial para a cela de média tensão é necessário fazer uma correção do valor de tensão atmosférica que no momento da realização dos ensaios apresentava os seguintes parâmetros:

- Temperatura de referência:  $t_0=15$  °C.
- Pressão atmosférica absoluta:  $p_o=1005$  mbar.
- Humidade absoluta:  $h_0=8.73g/m^3$

A tabela 6.2 mostra os parâmetros para a correção da tensão e o seu respetivo valor para os ensaios fase-fase e fase-terra.

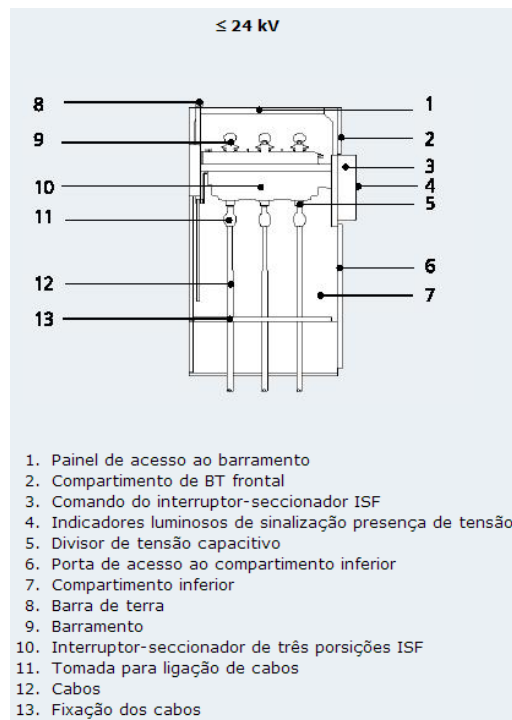


Figura 6.1: desenho

Tabela 6.2: Tabela Correção de Parâmetros

	Fase-Fase	Fase - terra
t (°C)	15	15
h% (%)	68	68
h (g/m <sup>3</sup> )	8,70	8,70
p (mbar)	1005	1005
$\delta$	1,01	1,01
h/ $\delta$	8,62	8,62
k	0,98	0,98
U <sub>0</sub> (kV)	60	50
U <sub>50</sub> (kV)	66	55
L (m)	0,235	0,235
g	0,57	0,48
m	1	1,000
w	1	1,000
k <sub>1</sub>	1,01	1,01
k <sub>2</sub>	0,98	0,98
kt	0,99	0,99
U (kV)	59,12	49,26

### 6.2.1 Ensaios Fase-fase

O ensaio fase-fase consiste em verificar se a distância de isolamento proporcionada pelo dielétrico, sendo neste caso o ar, suporta o valor de tensão estipulado. Desta forma, para a realização do ensaio dielétrico é necessário colocar o interruptor-seccionador na posição fechado. A figura 6.2 mostra a sequência para colocar o interruptor nesta posição usando a chave de desencravamento.



Figura 6.2: Sequencia de comando

No caso do ensaio fase terra, a tensão é aplicada à fase L1 e as outras duas fases L1 e L2, bem como a terra do invólucro metálico são ligadas à terra.

Podemos verificar como foram efetuadas estas ligações nas figura 6.3.



Figura 6.3: Esquema de montagem;

O valor de ensaio previsto é de 60kV que corrigido pelas condições atmosférica é de 59,12kV. O equipamento esteve sujeito a esta tensão durante 60s sendo que não ocorreu nenhuma descarga

disruptiva, sendo assim válido o ensaio. Foram testadas as fases L2 e L3 e verificou-se que também não ocorreram nenhuma descargas disruptivas.

### 6.2.2 Ensaio Fase-terra

O ensaio fase-terra consiste, tal como no ensaio fase-fase, na verificação da rigidez dielétrica do meio, que neste caso é o SF6 (se não estou errado). Desta forma numa primeira fase é necessário proceder a colocação do interruptor-seccionador ligado diretamente à terra como é visível na figura reffig:comandoft



Figura 6.4: Esquema de comando para ensaio fase-terra

Na segunda fase de preparação deste ensaio, são efetuadas as ligações para o ensaio do equipamento. A tensão é aplicada à fase L1, sendo que a tomada da ligação do cabo, isto é o lado secundário/saída da fase L1, é ligada à terra. As outras fases L2 e L3, tanto do lado entrada e de saída da cela, são também ligadas à terra.

Podemos verificar como foram efetuadas estas ligações nas figura [6.5](#)

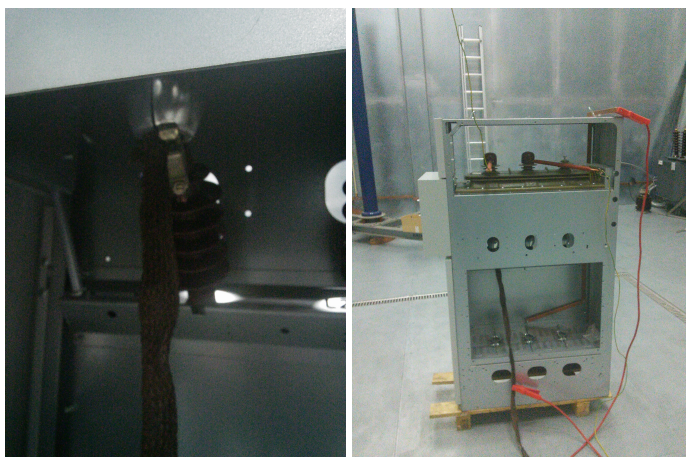


Figura 6.5: a) Ligação à tomada de Ligação de cabo b) Esquema de montagem;

Assim sendo o ensaio consiste na aplicação de uma tensão de 50kV, que devidamente corrigida para o valor das condições atmosféricas presentes na altura do ensaio é de 49,26kV. O ensaio considera-se válido se nenhuma descarga disruptiva ocorrer durante 60 segundos, o que se verificou. Desta forma concluímos que o dielétrico existente entre fase-terra está devidamente dimensionado para os valores pretendidos por parte do fabricante. Analogamente foram testadas as fases L2 e L3 e verificou-se a validade do ensaio, pois também não ocorreu nenhuma descarga disruptiva.

### 6.3 Ensaio ao Impulso atmosférico

No caso dos ensaios ao Impulso Atmosférico, são efetuados 4 ensaios diferentes. São efetuados ensaios para as polaridades negativa e positiva entre as 3 fases e a fase-terra.

Para a implementação dos ensaios dielétricos ao impulso atmosférico da cela de média tensão é necessário fazer uma correção do valor de tensão atmosférica, tal como nos ensaios à frequência industrial, que no momento da realização dos ensaios apresentava os seguintes parâmetros:

- Temperatura de referência:  $t_0=21,3$  °C.
- Pressão atmosférica absoluta:  $p_o=1005$  mbar.
- Humidade absoluta:  $h_0=8,73g/m^3$

A tabela 6.3 mostra os parâmetros para a correção da tensão e o seu respetivo valor de tensão para os ensaios fase-fase e fase-terra tanto da onda positiva como das negativa.



Tabela 6.3: Tabela Correção de Parâmetros das condições atmosféricas

	Onda Negativa Fase Fase	Onda Negativa Fase terra	Onda Positiva Fase Fase	Onda Positiva Fase terra
t (°C)	20,1	21,3	23,5	20,1
h <sub>s</sub> (%)	54	47	55	54
h (g/m <sup>3</sup> )	9,36	8,73	11,59	9,36
p (mbar)	1004	1005	1005	1004
δ	0,99	0,99	0,98	0,99
h/δ	9,45	8,84	11,83	9,45
k	0,98	0,98	1,01	0,98
U <sub>0</sub> (kV)	145	125	110	95
U <sub>50</sub> (kV)	159,5	137,5	121	104,5
L (m)	0,235	0,235	0,235	0,235
g	1,39	1,21	1,04	0,91
m	1	1	1	1
w	1	1	1	1
k <sub>1</sub>	0,99	0,99	0,98	0,99
k <sub>2</sub>	0,98	0,98	1,01	0,98
k <sub>t</sub>	0,98	0,97	0,99	0,97
U (kV)	141,43	120,80	108,91	92,37

De forma a ser atingido os valores de tensão para a onda negativa e negativa foram usados dois andares no Gerador de Marx. O valor máximo da tensão possível com estes dois andares eram de 200kV. O tempo de carregamento dos condensadores utilizado foi de 25 segundos.

### 6.3.1 Ensaio Fase-terra

O modo de montagem para o ensaio fase-terra do impulso atmosférico é idêntico ao ensaio de frequência industrial para a fase terra. Assim é necessário colocar o interruptor diretamente ligado à terra como é visível no comando da figura 6.6



Figura 6.6: Esquema de comando para ensaio fase-terra para o impulso atmosférico

A tensão é aplicada à fase L1, sendo que a tomada da ligação do cabo, isto é o lado secundário/saída, da fase L1 é ligada à terra. As restantes, fases L2 e L3, bem como o invólucro metálico também são ligados a terra. Pode-se verificar como foram efetuadas estas ligações na figura:

Podemos verificar como foram efetuadas estas ligações na figura 6.7.



Figura 6.7: Esquema de montagem para impulso atmosférico fase-terra;

### 6.3.1.1 Polaridade Negativa

Para a polaridade negativa é aplicada uma tensão de 125kV, que depois de corrigida para os valores das condições atmosféricas verificadas a quando do ensaio é de 120,80kV, à fase L1. A forma de onda da tensão obtida está visível na imagem 6.8 :

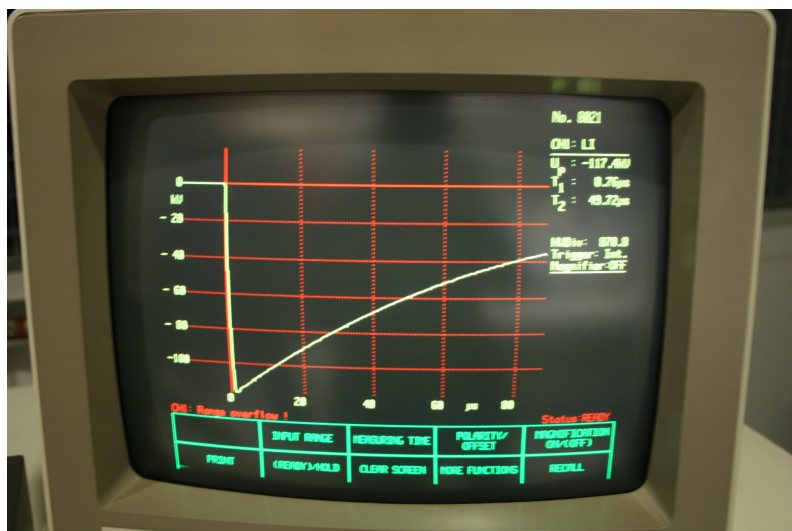


Figura 6.8: Forma de onda obtida apenas com resistência de serie do sistema de Gerador de Impulso;

Como podemos verificar o tempo de frente T1 encontra-se fora da gama de valores normalizada para este tipo de ensaio. Desta forma para obtermos um valor valido foi necessário aumentar a resistência de série do gerador de impulso. Desta forma foi adicionada uma resistência de 115 ohms que permitiu obter os seguintes valores:

- Tensão de pico:  $U_p=117,2\text{kV}$ ;
- Tempo de frente : $T1=0,76\mu\text{s}$ ;
- Tempo de Cauda: $T2=49,72\mu\text{s}$ ;

Como podemos verificar o tempo de frente T1 é muito reduzido foi necessário adicionar uma resistência de  $115\Omega$  à resistência de serie do sistema de Gerador de impulso.

- Tensão de pico:  $U_p=117,4\text{kV}$ ;
- Tempo de frente: $T1=0,85\mu\text{s}$ ;
- Tempo de Cauda: $T2=47,68\mu\text{s}$ ;

Como podemos verificar o tempo de frente e o tempo de cauda já estavam dentro dos valores normalizados que permitem validar o ensaio. Realizaram-se então de seguida uma serie de 15 ensaios para cada uma das fases L1, L2 e L3 e foram obtidos os seguintes resultados da tabela.

#### 6.4 .

Tabela 6.4: Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda negativa fase-terra

Ensaio	Fase L1			Fase L2			Fase L3		
	Up(kV)	T1(μs)	T2(μs)	Up(kV)	T1(μs)	T2(μs)	Up(kV)	T1(μs)	T2(μs)
1	117,4	0,85	47,69	117,3	0,84	47,65	117,4	0,86	47,65
2	117,4	0,84	47,68	117,3	0,89	47,65	117,4	0,84	47,67
3	117,4	0,86	47,62	117,3	0,88	47,63	117,4	0,87	47,64
4	117,4	0,86	47,67	117,3	0,86	47,64	117,4	0,65	3,01
5	117,4	0,86	47,68	117,3	0,84	47,68	117,4	0,85	47,65
6	117,4	0,84	47,65	117,3	0,85	47,68	117,4	0,85	47,66
7	117,4	0,85	47,66	117,3	0,85	47,65	117,4	0,87	47,65
8	117,4	0,85	47,65	117,3	0,85	47,66	117,4	0,86	47,65
9	117,4	0,85	47,68	117,3	0,87	47,65	117,4	0,84	47,68
10	117,4	0,85	47,66	117,3	0,85	47,65	117,4	0,87	47,65
11	117,4	0,86	47,66	117,3	0,86	47,68	117,4	0,85	47,65
12	117,4	0,85	47,65	117,3	0,84	47,65	117,4	0,85	47,67
13	117,4	0,86	47,68	117,3	0,85	47,63	117,4	0,87	47,68
14	117,4	0,85	47,7	117,3	0,85	47,65	117,4	0,86	47,63
15	117,4	0,85	47,65	117,3	0,85	47,66	117,4	0,84	47,67

Como podemos verificar pela tabela ocorreu uma descarga disruptiva no ensaio 4 da serie da fase L3. No entanto esta hipótese de ocorrência de descarga disruptiva é possível até duas vezes em cada série de ensaios realizada, tal como indicado pela Norma IEC - 62271-1. A forma de onda que se verificou durante esta descarga disruptiva é mostrada na imagem 6.9

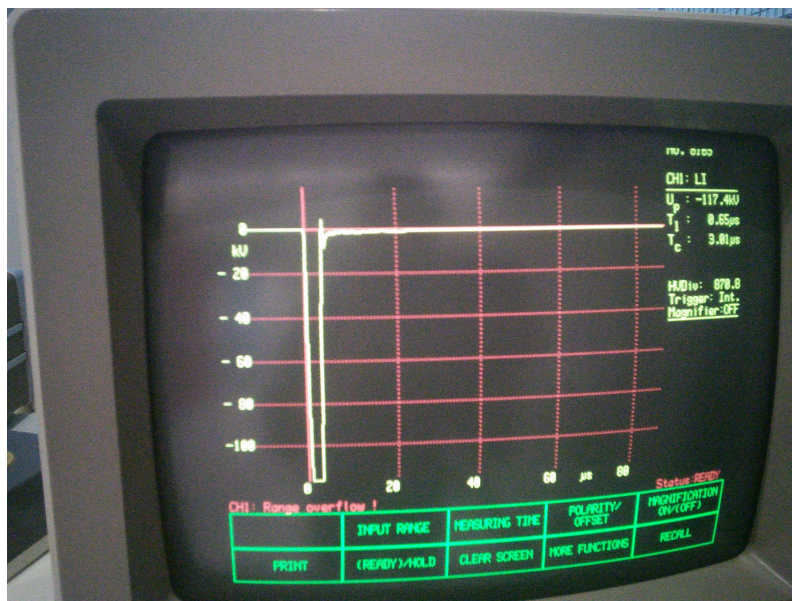


Figura 6.9: Forma de onda obtida na descarga disruptiva no ensaio fase-terra;

Pode-se então concluir que o isolamento que o dielétrico dimensionado para este isolamento foi o correto por parte do fabricante uma vez que foi ultrapassada com sucesso a série realizada.

### 6.3.1.2 Polaridade Positiva

Para a polaridade positiva foi aplicada uma tensão de 95kV, que tal como em todos os restantes ensaios é ajustada de acordo com o parâmetro de correção de tensão obtido para as condições existentes durante a realização do ensaio. A tensão de ensaio obtida após realizada esta correção foi de 92,37kV. Tal como no ensaio anterior e devido a impedância que este circuito, isto é a estrutura da cela, introduz no ensaio foi necessário mais uma vez corrigir o tempo de subida da forma de onda. Os resultados obtidos para a série de ensaios das 3 fases são apresentadas na tabela 6.5 .



Tabela 6.5: Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda positiva fase-terra

Ensaio	Fase L1			Fase L2			Fase L3		
	Up(kV)	T1( $\mu$ s)	T2( $\mu$ s)	Up(kV)	T1( $\mu$ s)	T2( $\mu$ s)	Up(kV)	T1( $\mu$ s)	T2( $\mu$ s)
1	93,6	0,95	45,36	93,6	0,97	45,35	93,6	0,95	45,36
2	93,6	0,97	45,28	93,6	0,97	45,36	94,1	0,96	43,93
3	93,6	0,97	45,38	93,6	0,97	45,37	93,6	0,97	45,37
4	93,6	0,95	45,29	93,6	0,97	45,27	93,6	0,98	45,44
5	93,6	0,98	45,52	93,6	0,96	45,28	93,6	0,97	45,41
6	93,6	0,96	45,28	93,6	0,98	45,35	93,6	0,98	45,42
7	93,6	0,98	45,35	93,6	0,95	45,36	94,1	0,97	44,01
8	93,6	0,95	45,36	93,6	0,98	45,38	93,6	0,97	45,41
9	93,6	0,98	45,38	93,6	0,96	45,36	93,6	0,97	45,36
	93,6	0,98	45,44	93,6	0,97	45,32	93,6	0,97	45,5
11	93,6	0,97	45,41	93,6	0,95	45,36	93,6	0,97	45,43
12	93,6	0,98	45,42	93,6	0,97	45,28	93,6	0,97	45,41
13	94,1	0,97	44,01	93,6	0,97	45,38	94,1	0,97	44,01
14	93,6	0,97	45,41	93,6	0,95	45,29	93,6	0,97	45,36
15	93,6	0,97	45,38	93,6	0,98	45,52	93,6	0,96	45,49



Figura 6.10: Forma de onda positiva obtida ensaio fase-terra;

Como podemos verificar pela tabela e pela forma de onda tensão obtida na fase L2, que não ocorreu qualquer descarga disruptiva pelo que se pode concluir que o dielétrico existente neste circuito está devidamente dimensionado por parte do fabricante.

### 6.3.2 Ensaios Fase-Fase

No caso do ensaio fase-fase, vamos verificar se a distância entre as fases estão corretamente dimensionadas. Neste caso estamos a testar o dieletrico ar.

Da mesma forma que para o ensaio fase-fase da frequência industrial, é necessário locar o interruptor-seccionador na posição fechado, como se pode verificar na figura 6.11

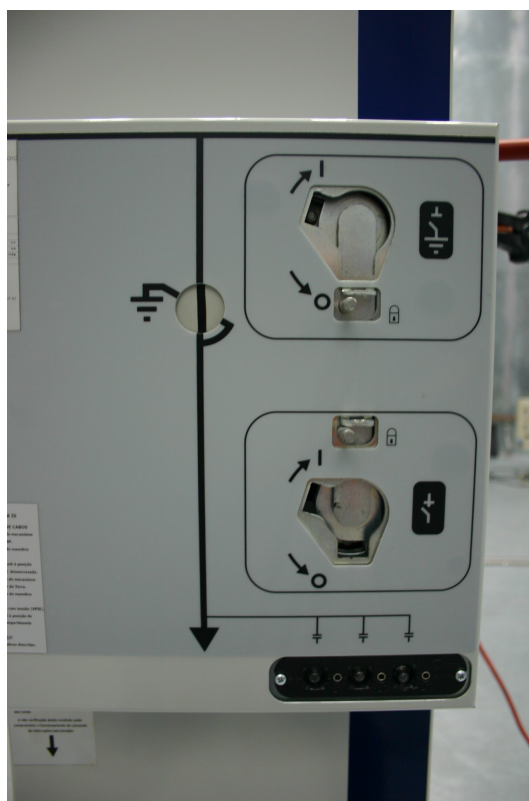


Figura 6.11: Esquema de comando para ensaio fase-fase impulso atmosférico;

Para o ensaio fase-fase aplica-se a tensão do gerador de Marx a uma fase, sendo que as restantes fases e o involucro metálico é ligado à terra. A figura 6.12 mostra as ligações efetuadas.

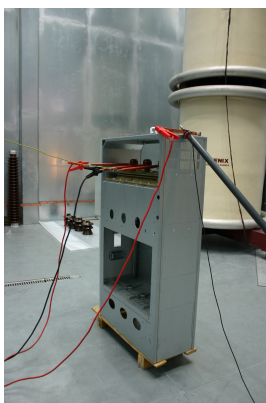


Figura 6.12: Esquema de montagem para ensaio fase-fase impulso atmosférico;

### 6.3.2.1 Polaridade Negativa

Para a polaridade negativa é aplicada uma tensão de 141,43kV à fase L1. Os valores obtidos para as 3 fases estão obtidos na tabela 6.6 .

Tabela 6.6: Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda negativa fase-fase

Ensaio	Fase L1			Fase L2			Fase L3		
	Up(kV)	T1(μs)	T2(μs)	Up(kV)	T1(μs)	T2(μs)	Up(kV)	T1(μs)	T2(μs)
1	117,4	0,91	48,9	94,1	1,01	44,1	117,4	0,89	48,86
2	117,4	0,91	48,9	94,1	1,02	44	117,4	0,89	48,94
3	117,4	0,89	48,8	93,6	1,01	45,23	117,4	0,88	48,94
4	117,4	0,91	49	94,1	1,03	4,07	117,4	0,89	48,89
5	117,4	0,89	49	93,6	1,03	45,19	117,4	0,89	48,92
6	117,4	0,91	48,9	93,6	1,02	45,23	117,4	0,89	48,92
7	117,4	0,91	48,9	93,6	1,01	45,18	117,4	0,89	48,94
8	117,4	0,89	49	94,1	1,02	43,09	117,4	0,89	48,94
9	117,4	0,91	49	93,6	1,02	45,27	117,4	0,89	48,94
10	117,4	0,91	i	94,1	1,03	43,93	117,4	0,89	48,94
11	117,4	0,91	48,9	94,1	1,01	44,12	117,4	0,89	48,92
12	117,4	0,89	49	94,1	1,01	44,1	117,4	0,89	48,94
13	117,4	0,91	48,9	94,1	1,02	43,09	117,4	0,89	48,94
14	117,4	0,91	48,9	93,6	1,01	45,23	117,4	0,89	48,94
15	117,4	0,89	49	93,6	1,03	45,19	117,4	0,89	48,94

No caso da onda negativa do ensaio fase-fase, não foi possível atingir o valor de 141kV em qualquer uma das fases L1,L2 ou L3. Ao valor estipulado de tensão ocorriam descargas disruptivas consecutivas. Isso poderá ser resultado de um mau dimensionamento ou fabrico da cela de média tensão. Visto o dieletrico ser o ar poderá uma pequena variação de milímetros entre as fases pode alterar drasticamente em algumas centenas de kilovolts o valor suportado. As series de ensaios realizadas e presentes no quadro foram para valores de tensão em que não ocorriam mais do que duas descargas disruptivas. Podemos verificar a forma de onda na figura 6.13.

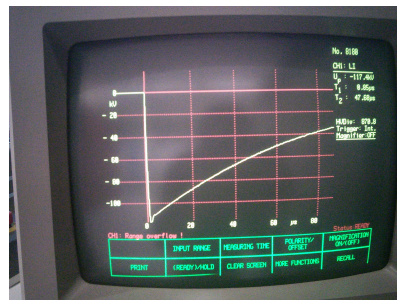


Figura 6.13: Onda Fase-fase Negativa;

### 6.3.2.2 Polaridade Positiva

Para a Polaridade positiva é aplicada uma tensão de 108,91kV. Os valores obtidos para as 3 fases estão obtidos na tabela 6.7.

Tabela 6.7: Tabela de tensões e tempos de subida e tempo de cauda para a onda positiva fase-fase

Ensaio	Fase L1			Fase L2			Fase L3		
	Up(kV)	T1( $\mu$ s)	T2( $\mu$ s)	Up(kV)	T1( $\mu$ s)	T2( $\mu$ s)	Up(kV)	T1( $\mu$ s)	T2( $\mu$ s)
1	109,5	1,02	45,87	109,5	1,03	45,8	109,2	0,96	3,2
2	109,5	1,04	45,86	109,5	1,01	45,83	109,5	1,01	45,61
3	109,5	1,04	45,9	109,5	1,04	45,77	109,5	0,97	3,3
4	109,5	1,03	45,87	109,5	1,02	45,87	109,5	1,02	45,66
5	109,5	1,01	45,91	109,5	1,04	45,86	109,5	1,04	45,7
6	109,5	1,04	45,88	109,5	1,04	45,79	109,5	1,04	45,79
7	109,5	1,02	45,79	109,5	1,03	45,88	109,5	1,03	45,67
8	109,5	1,04	45,87	109,5	1,02	45,79	109,5	1,02	45,66
9	109,5	1,04	45,86	109,5	1,01	45,87	109,5	1,01	45,7
10	111,3	0,99	3,04	109,5	1,02	45,86	109,5	1,02	45,66
11	109,5	1,02	45,87	109,5	1,04	45,87	109,5	1,04	45,7
12	109,5	1,04	45,86	109,5	1,02	45,86	109,5	1,02	45,7
13	109,5	1,04	45,87	109,5	1,02	45,87	109,5	1,02	45,68
14	109,5	1,03	45,86	109,5	1,03	45,86	109,5	1,03	45,7
15	109,5	1,04	45,9	109,5	1,02	45,8	109,5	1,02	45,68

A figura 6.14 mostra a descarga disruptiva ocorrida na fase L1 do ensaio 10.

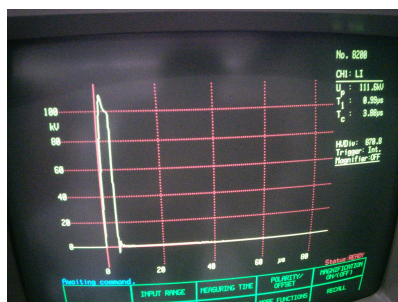


Figura 6.14: Forma de onda obtida na descarga disruptiva no ensaio fase-fase;

Apesar de ter ocorrido duas descargas disruptivas na fase L3, esta serie está em conformidade com a norma, pois não excedeu o numero de 2 descargas por serie de 15 ensaios. Podemos então concluir que os ensaios são validos e o dielétrico está corretamente dimensionado.

## 6.4 Resumo ou Conclusões

Neste capítulo foram descritos os vários procedimentos realizados no LAT-FEUP, em que foram realizados ensaios dielétricos de forma a validar o isolamento, isto é se os dielétricos usados neste equipamento estão devidamente dimensionados para o valor de tensão que o fabricante indica para o funcionamento. O ensaio da cela à frequência industrial decorreu sem problema e os resultados foram os esperados, não se tendo verificado nenhuma descarga disruptiva na realização dos mesmos. Para o ensaio realizado no gerador de impulsos verificou-se que a cela criava uma indutância que não nos permitia obter os tempos normalizados da forma de onda desta forma foi necessário adicionar uma resistência de 115ohms. A ocorrência de algumas descargas disruptivas nas serie de alguns ensaios, foi verificada. No entanto, o numero de descargas disruptivas numa serie nunca excedeu as duas , pelo que esses ensaios são validos. Estas verificaram-se nos ensaios



fase-fase, em que uma pequena variação ao nível dielétrico do ar entre as fases pode provocar uma variação de varias dezenas de kV.

No ensaio fase-fase de onda negativa não foi possível atingir o valor de tensão referido na norma para a cela a ensaiar de 24kV, uma vez que o valor normalizado é de 140kV e o valor máximo suportado por este equipamento neste ensaio específico foi de 117kV. Uma das possibilidades poderá passar pelo mau dimensionamento da distância entre fases ou um erro de construção, isto porque o dielétrico existente neste caso específico é o ar e uma pequena variação de centímetros entre a distância de fases altera drasticamente em algumas dezenas de kilo volts o valor suportado.

De realçar que esta falha não é verificada aquando da construção deste equipamento porque este ensaio neste fabricante específico não é considerado um ensaio de fabrico de série sendo apenas realizado a pedido do cliente ou aquando a criação de novas séries de equipamentos.



## Capítulo 7

# Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo apresentam-se numa primeira parte as conclusões e as considerações finais da presente dissertação e numa segunda parte são apresentadas possibilidades de trabalhos futuros.

### 7.1 Considerações Finais

A presente dissertação teve como objetivo a realização de ensaios de dielétricos a uma cela Normafix de Média Tensão. Estes ensaios tinham o intuito de verificar a sua resposta da cela aos diferentes ensaios dielétricos e verificar que os seus níveis de isolamento eram os corretos. As celas de média tensão permitem uma grande variedade de funções e serviços, como é exigido em sistemas de distribuição de potência modernos. Procura-se aliar a simplicidade de operações com a funcionalidade, conseguindo grandes períodos sem manutenção. Tenta-se assegurar que estes quadros de média tensão tenham a máxima segurança durante as manobras e que tenham uma boa proteção contra a propagação de incêndios. Também é necessário que exista uma boa facilidade nas manobras. Estas manobras são efetuadas na parte frontal do quadro, através de dispositivos simples e funcionais que são acompanhados por uma sinalização mecânica da posição dos vários componentes. Existiu uma grande evolução tecnológica ao longo dos anos. Com a evolução do sistema elétrico de energia, houve um requisito para que as celas se tornam-se cada vez mais flexíveis e com maior automatismo remoto e que a rede tivesse um maior número de pontos de medição. Existiu também um requisito para tornar as celas de média tensão cada vez mais livres de manutenção e que fossem possíveis de serem usadas em qualquer tipo de ambiente. Os componentes que a compõem também tiveram uma grande evolução tecnologia. Inicialmente os disjuntores utilizam o ar para a extinção do arco. No entanto, com uma maior consciência a nível da segurança, foram gradualmente por aparelhagens por involucro metálico. Inicialmente eram usados disjuntores a óleo mas estes necessitavam de grande manutenção e tinham um elevado risco de incêndio. Mais tarde surgiram os disjuntores isolado a ar (AIS) ou então com disjuntores extraíveis de SF<sub>6</sub> ou de vácuo que trouxeram grandes vantagens ao nível da manutenção e da redução de espaço. Com o elevado interesse por parte dos operadores de sistema na segurança, fiabilidade e relação custo-eficácia, disjuntores livres de manutenção, capazes de serem usados em qualquer ambiente

e com uma longa vida útil foram criados. A mudança de disjuntores extraíveis para disjuntores fixos e o uso de vácuo como forma de extinção do arco faz com que estes tenham uma boa relação custo/desempenho. A propagação destes disjuntores mais modernos e fiáveis foi um dos grandes fatores de aceitação dos disjuntores fixos. Hoje em dia com as Smartgrids, é necessário alterar o sistema de gestão da rede em que existe uma produção centralizada de produção de energia para um sistema de produção dispersa é um dos grandes desafios. O controlo remoto será obrigatório para as redes inteligentes. Um dos efeitos é que as celas incluirão dispositivos inteligentes que forneceram uma melhor otimização. Há uma grande confiança de que o sistema 2SIS usando o diagrama de 3 posições e interruptores de vácuo estão bem adaptados para a chegada das Smart Grids. Esta arquitetura pode resolver um grande número de aplicações nas redes de distribuição de média tensão, mas graças à sua flexibilidade e modularidade, também desafia algumas aplicações de gama baixa, onde tradicionalmente o equipamento é extraível é utilizado. Para a realização dos ensaios foi necessário efetuar um estudo prévio, de forma a adquirir todos os conhecimentos técnicos, quer a nível das celas e dos seus princípios de funcionamento, como também ao nível do funcionamento dos diferentes componentes do Laboratório de Alta Tensão da FEUP. Para isso efetuou-se um estudo da norma IEC 60060-1 que regula os parâmetros existentes em ensaios de alta tensão, e das IEC 62271-1 e IEC 62271-200 que regulam os parâmetros para a realização de ensaios de celas de média tensão. Para validar o dimensionamento desta cela específica foram realizados ensaios à frequência industrial e ao Impulso Atmosférico. Foi possível verificar que para as solicitações à rigidez dielétrica que esta cela pode ser sujeita esta encontra-se corretamente dimensionada. Relativamente a solicitações provocadas por descargas atmosféricas no sistema onde esta cela se encontra montada, não foi possível comprovar que o seu dimensionamento, ou fabrico, tal como referido anteriormente, foi devidamente realizado pois este equipamento foi chumbado no que toca ao ensaio fase-fase. Desta forma o fabricante será devidamente informado para poder proceder a correções que sejam necessárias fazer Com este tipo de trabalho e com os resultados obtidos e tendo em conta que estes resultados são validos uma vez que os equipamentos existentes no LAT estão devidamente calibrados confirma-se que o LAT-FEUP poderá desempenhar um importante papel na realização de ensaios como laboratório independente.

## 7.2 Trabalhos Futuro

Relativamente a futuros trabalhos nesta dissertação, estes poderão passar pela comparação de ensaios dielétricos entre uma cela de média de tensão nova e outra num fim de vida, de forma a podermos verificar as diferenças existentes nos esforços elétricos. Outra possibilidade seria a comparação de duas ou mais celas com diferentes tipos isolamento. Por exemplo, efetuar uma comparação entre celas de SF<sub>6</sub> e uma de isolamento a vácuo. O laboratório de Alta tensão não tem capacidade para realizar ensaios de corrente às celas, pelo que seria uma mais valia adquirir equipamentos de realizar ensaios para demonstrar a capacidade dos circuitos principais e dos de terra aos valores de pico de corrente admissível e de corrente admissível de curta duração.

# Referências

- [1] Stan Stewart *Distribution Switchgear* The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2004.
- [2] *Substations and Switchgear* Siemens Energy Sector - Power Engineering Guide, Edition 7.0
- [3] HM Ryan and GR Jones *SF6 Switchgear* Peter Peregrinus Ltd, 1984
- [4] Alan FreenWood *Vacuum Switchgear* Institute of Electrical Engineering, London United Kingdom, 1997
- [5] Colin Bayliss and Brian Hardy *Transmission and Distribution Electrical Engineering, 3rd edition* Elsevier Ltd, 2007.
- [6] Hennig Gremmel *Switchgear Manual, 10th edition* Cornelsen Verlag, Berlin, 2007.
- [7] McGraw-Hill, Tata *Handbook of Switchgear*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.
- [8] Disjuntor Extraível URL:<http://goo.gl/xgkj4q> , ultimo acesso: 20 Junho 2014.
- [9] Canpeng MA, Bertrand CABARET, Gilles MOESCH, Juan TOBIAS *Innovative mv switchgear for today's applications*, China International Conference on Electricity Distribution,Shangai, 2012.
- [10] Jean-Marc Biasse *What will MV Switchgear look like in the future*, Schneider Electric, 2013.
- [11] N. Queirós, J. Soares. *Memória Descritiva do Laboratório de Alta Tensão - Aspectos construtivos, coordenação e operação* 2013.
- [12] N. Soares *Inspeções periódicas em equipamento para trabalhos em tensão (TET) - Ensaios Dielétricos* 2013.
- [13] F. Horta *Desenvolvimento e otimização de seccionadores em redes MT* 2014.
- [14] *ISO/IEC. High voltage test techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements. EC 60060-1*, third edição, 2010.
- [15] *ISO/IEC. High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications. IEC 62271-1* , 2012.

- [16] *ISO/IEC. High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV. IEC 62271-200*, 2011.