

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Estudo das Técnicas de Detecção de Avarias em
Equipamentos Elétricos por Recurso à Medição de
Descargas Parciais**

Samuel da Silva Valente

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Machado e Moura
Coorientador: Eng.º Paulo Ribeiro

Porto, junho 2019

© Samuel Valente, 2019

Resumo

A transmissão de energia elétrica em alta e muito alta tensão, através da utilização de cabos elétricos isolados em instalação subterrânea, tem vindo a aumentar nas últimas décadas. Este aumento deve-se ao aumento do consumo e à impossibilidade de, em muitas situações, se estabelecerem linhas aéreas de condutores nus, além de que, de um modo geral, a opinião pública, apoiada pelos media, é contra a construção de linhas aéreas. Por isso é fundamental que os cabos garantam uma elevada fiabilidade, ou seja, que funcionem durante muito tempo para garantir que a energia elétrica seja transmitida.

Existem dois tipos de perturbações que podem colocar um cabo fora de serviço, perturbações internas e externas. As internas resultam de defeitos provenientes do próprio cabo e as externas são provocadas por fatores externos, como por exemplo uma ação de uma máquina retroescavadora que acaba perfurando um cabo. Mesmo que esta rutura possa ser ligeira, terá como consequência um fenómeno de descargas parciais.

A principal causa para a avaria nos cabos é a rutura elétrica da sua isolamento, podendo esta ser total ou parcial. Esta rutura da isolamento irá fazer com que se comece a verificar o fenómeno elétrico das descargas parciais.

Uma descarga parcial consiste numa sucessão de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes na ordem dos nanossegundos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras sujeitas a um elevado campo elétrico.

Através da medição do nível de descargas parciais é possível avaliar o estado da isolamento do respetivo cabo, estando este valor relacionado com o seu tempo de vida restante. Por isso, este ensaio é uma das principais ferramentas de diagnóstico para avaliar a qualidade dos cabos, permitindo detetar defeitos que levarão à sua destruição antes desta ocorrer.

O objetivo principal deste trabalho foi aprofundar os conhecimentos sobre o fenómeno das descargas parciais, assim como, sobre o procedimento para a respetiva medição. Efetuou-se também um estudo sobre a influência do intervalo de integração no valor medido do nível de descargas parciais.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da CABELTE - Cabos Elétricos e Telefónicos, tendo este sido desenvolvido ao longo do semestre nas suas instalações, em Arcozelo, entre 11 de fevereiro e 31 de maio.

Palavras chave:

- Cabos isolados de energia;
- Descargas parciais;
- Ensaio laboratoriais;
- Laboratório de Alta Tensão.

Abstract

The transmission of electric energy in high and very high voltage using isolated electric cables in underground installation increased in the last decades. This increase is due to the increase in consumption and the impossibility of establishing, in many situations, overhead lines and, in general, the public opinion, supported by the media, is against the construction of overhead lines. It is therefore essential that the cables ensure a high reliability, that is, that they work for a long time to ensure that the electrical energy is transmitted.

There are two types of disturbances that can put a cable out of service, internal and external disturbances. The internal ones result from defects coming from the cable itself and the external ones are caused by external factors, such as an action of a backhoe machine that ends up drilling a cable. Even if this rupture may be slight, it will result in a partial discharge phenomenon.

The main cause for the failure of the cables is the electrical breakage of their insulation, which may be total or partial. This rupture of insulation will cause the beginning of the phenomenon of partial discharges.

A partial discharge consists of a succession of incomplete, rapid and intermittent electric discharges in the order of the nanoseconds, which occur by the proximity between two conducting parts subjects to a high electric field.

By measuring the level of partial discharges, it is possible to evaluate the state of the insulation of its cable, this value being related to its remaining life time. Therefore, this test is one of the main diagnostic tools that evaluates the quality of the cables, allowing to detect a defect that will lead to its destruction before it occurs.

The main objective of this work is to deepen the knowledge about the phenomenon of partial discharges, as well as how its measurement is performed. A study was also carried out on the influence of the integration interval on the value obtained during the measurement of the level of partial discharges.

This thesis was developed with the support of CABELTE - Cabos Elétricos e Telefónicos and the work developed during the semester at its facilities in Arcozelo, between 11 of February and 31 of May.

Keywords:

- Isolated power cables;
- Partial discharges;
- Laboratory tests;
- High Voltage Laboratory.

Agradecimentos

A conceção desta dissertação não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas, por isso lhes quero demonstrar o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor António Machado e Moura. O meu muito obrigado por toda a disponibilidade, conselhos, orientações e motivação que forneceu durante este período.

Ao meu orientador na empresa, Sr. Engenheiro Paulo Ribeiro, da CABELTE, agradeço a disponibilidade de me receber na empresa, a documentação fornecida e as orientações dadas.

Aos colaboradores do Departamento de Investigação e Desenvolvimento da CABELTE, em especial ao Engenheiro António Manuel, por todos os conselhos e apoio que recebi ao longo deste semestre.

Aos colaboradores do Controlo de Qualidade da CABELTE pelo apoio e disponibilidade fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos colaboradores do Laboratório de AT da FEUP, em especial ao Engenheiro Fábio Branco pela disponibilidade e pelo apoio prestado.

À minha namorada, Ana Reis, agradeço toda a motivação, incentivo e ajuda durante todo o meu percurso académico e ao longo da vida.

A todos os meus amigos, que não só no desenvolvimento desta dissertação, mas também durante todo o percurso académico estiveram presentes nos bons e maus momentos, sempre com palavras de consolo e motivação e sem os quais certos obstáculos teriam sido mais difíceis de ultrapassar. Em especial aos Bruno Costa, Miguel Loureiro, Luís Costa, Verónica Meneses, Bruno Rafael, Tiago Campos, João Pinheiro e Eduarda Coelho, pelo apoio incondicional que me deram nesta fase tão crucial da minha vida.

Por fim, mas não menos importante, à minha mãe, aos meus avós, aos meus padrinhos e à minha prima agradeço tudo o que me proporcionaram ao longo da vida.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Motivação e Objetivos	3
1.3 - Estrutura	4
Capítulo 2	5
Cabos Isolados	5
2.1 - Características construtivas.....	5
2.1.1. Alma Condutora.....	6
2.1.2. Camada Isolante	8
2.1.3. Camadas Semicondutoras Interior e Exterior	9
2.1.4. Blindagem.....	10
2.1.4.1. Ligações da Blindagem à Terra	10
2.1.5. Bainhas	13
2.1.6. Casos especiais.....	13
2.1.7. Etapas do Processo de Fabrico	13
2.1.7.1. Fabrico da Alma Condutora	14
2.1.7.2. Extrusão da Camada Isolante	14
2.1.7.3. Cableamento dos Condutores	16
2.1.7.4. Aplicação da Blindagem.....	16
2.1.7.5. Aplicação da Bainha Exterior.....	17
2.2 - Parâmetros Elétricos	17
2.2.1. Tensão Estipulada dos Cabos de Energia	17
2.2.2. Resistência do Condutor	17
2.2.2.1. Resistência em Corrente Contínua	17
2.2.2.2. Resistência em Corrente Alternada	18

2.2.3.	Indutância	21
2.2.4.	Reatância	22
2.2.5.	Capacidade	22
2.2.6.	Corrente Capacitiva.....	23
2.2.7.	Impedância	23
2.2.8.	Resistência de Isolamento	24
2.2.9.	Gradiente de Potencial.....	24
2.2.10.	Fator de Potência do Dielétrico	25
2.2.11.	Perdas nos Cabos	26
2.2.11.1.	Perdas Joule	26
2.2.11.2.	Perdas nos Revestimentos Metálicos	26
2.2.11.3.	Perdas Dielétricas.....	26
2.2.12.	Intensidade Máxima Admissível em Regime Permanente	27
2.2.13.	Intensidade Máxima Admissível em Curto-circuito	27
Capítulo 3	29	
Controlo de Qualidade	29	
3.1 - Ensaaios Laboratoriais.....	29	
3.1.1. Condições Gerais de Ensaio.....	30	
3.1.2. Ensaaios de Rotina.....	31	
3.1.2.1. Medição de Descargas Parciais.....	31	
3.1.2.2. Ensaio de Tensão	31	
3.1.2.3. Ensaio de Rigidez Dielétrica à Bainha Exterior	31	
3.1.3. Ensaaios por Amostragem	31	
3.1.3.1. Medição da Resistência Elétrica	32	
3.1.3.2. Medição da Capacidade	32	
3.1.3.3. Ensaio de Choque Atmosférico.....	32	
3.1.4. Ensaaios de Tipo	33	
3.1.4.1. Ensaio de Enrolamento.....	33	
3.1.4.2. Medição de Descargas Parciais.....	34	
3.1.4.3. Medição das Perdas Dielétricas.....	34	
3.1.4.4. Ensaio de Ciclos de Aquecimento	35	
3.1.4.5. Ensaio de Choque Atmosférico.....	35	
3.1.4.6. Ensaio de Tensão.....	35	
3.2 - Laboratório de Alta Tensão.....	36	
3.2.1. Equipamentos Gerais	36	
3.2.1.1. Equipamento do Ensaio à Frequência Industrial.....	36	
3.2.1.2. Equipamento do Ensaio de Choque	38	
3.2.2. Equipamentos Específicos.....	42	
Capítulo 4	51	
Descargas Parciais	51	
4.1 - Definição	51	
4.2 - Mecanismo das Descargas Parciais	52	
4.3 - Tipos de Descargas Parciais	53	
4.3.1. Descargas Internas	54	
4.3.2. Descargas Superficiais	55	
4.3.3. Descargas Por Efeito de Coroa	55	
4.4 - Consequências das Descargas Parciais	56	
4.5 - Representação das Descargas Parciais	57	
Capítulo 5	61	
Medição e Localização de Descargas Parciais.....	61	
5.1 - Tipos de Detecção	62	
5.1.1. Métodos Não Elétricos	62	
5.1.2. Métodos Elétricos.....	62	
5.2 - Princípio da Medição	63	
5.2.1. Grandezas de Medição Importantes.....	63	

5.2.2.	Medição através de Sistemas Analógicos	64
5.2.3.	Medição através de Sistemas Digitais	65
5.3	- Circuito de Medição	66
5.4	- Instrumentos de Medição	68
5.4.1.	Instrumentos de Banda Larga	68
5.4.2.	Instrumentos de Banda Estreita.....	70
5.4.3.	Comparação entre os Dois Tipos de Instrumentos	71
5.5	- Localização da Origem das Descargas Parciais	72
5.5.1.	Reparação do Defeito.....	74
5.6	- Calibração do Instrumento de Medida.....	75
5.7	- Preparação das Pontas de Ensaio	76
Capítulo 6		77
Estudo da Influência do Intervalo de Integração		77
6.1	- Descrição dos Ensaios	77
6.1.1.	Ensaio ao Cabo de AT	77
6.1.2.	Ensaio ao Cabo de MT.....	81
6.2	- Resultados Obtidos	83
6.2.1.	Ensaio ao Cabo de AT	83
6.2.2.	Ensaio ao Cabo de MT.....	84
6.3	- Análise dos Resultados	86
Capítulo 7		89
Conclusões		89
7.1	- Principais Conclusões.....	89
7.2	- Contribuições	90
7.3	- Trabalhos Futuros	91
Referências		93

Lista de figuras

Figura 1.1 - Organograma geral da CABELTE	3
Figura 2.1 - Constituição de um cabo isolado de AT [1]	6
Figura 2.2 - Representação de um condutor multifilar (à esquerda) e de um condutor maciço (à direita) [1]	7
Figura 2.3 - Formas da alma condutora [1]	7
Figura 2.4 - Condutor Milliken [6]	8
Figura 2.5 - Disposição das linhas do campo elétrico num cabo isolado sem e com semicondutor interno [5]	9
Figura 2.6 - Distribuição do campo elétrico num cabo de cabo não radial e num cabo de campo radial [1]	10
Figura 2.7 - Ligação das duas extremidades da blindagem à terra [10]	11
Figura 2.8 - Variação da tensão induzida ao em função do comprimento do cabo [10]	12
Figura 2.9 - Esquema da ligação da blindagem à terra numa extremidade [9]	12
Figura 2.10 - Ligação à terra cruzada [10]	12
Figura 2.11 - Trefilagem de um fio de cobre [11]	14
Figura 2.12 - Extrusora [12]	15
Figura 2.13 - Processo de tripla extrusão [5]	15
Figura 2.14 - Linha de extrusão [5]	16
Figura 2.15 - Máquina de cablear [12]	16
Figura 2.16 - Efeito Pelicular [13]	19
Figura 2.17 - Efeito de proximidade [15]	20
Figura 2.18 - Valor de D a considerar nas expressões 2.10 e 2.11 [4]	21
Figura 2.19 - Variação do gradiente de potencial ao longo da isolação [10]	24

Figura 2.20 - Representação vetorial do ângulo de perdas no dielétrico [17]	25
Figura 3.1 - Transformador equipado com um sistema ressonante	37
Figura 3.2 - Filtro de Alta Tensão.....	37
Figura 3.3 - Unidade de controlo	38
Figura 3.4 - Painel de controlo do transformador	38
Figura 3.5 - Gerador de choque	39
Figura 3.6 - Divisor de tensão	40
Figura 3.7 - Unidade de alimentação	41
Figura 3.8 - Unidade de controlo	41
Figura 3.9 - Unidade de processamento de sinal.....	42
Figura 3.10 - Detetor de DP acoplado na base de sustentação do condensador	42
Figura 3.11 - Sistema de medição de DP [22].....	43
Figura 3.12 - Calibrador CAL 542.....	44
Figura 3.13 - Detetor de DP, DDX 9121b.....	44
Figura 3.14 - Impedância de medição, AKV 9310	45
Figura 3.15 - Calibrador, KAL 9511	46
Figura 3.16 - Terminal de fim de cabo a óleo	46
Figura 3.17 - Terminal de fim de cabo a água.....	47
Figura 3.18 - Equipamento que controla e monitoriza o circuito hidráulico	47
Figura 3.19 - Microhmímetro	48
Figura 3.20 - Fonte de alimentação DC	48
Figura 3.21 - Transformador toroidal e sondas de temperatura utilizadas.....	49
Figura 3.22 - Sistema de comando e controlo do aquecimento	49
Figura 3.23 - Condensador padrão	50
Figura 3.24 - Medidor das perdas dielétricas	50
Figura 4.1 - Representação de uma cavidade num dielétrico sólido [25]	52
Figura 4.2 - Tipos de descargas parciais [27]	53
Figura 4.3 - Variação da tensão na cavidade quando ocorre o fenómeno das descargas parciais [29].....	54
Figura 4.4 - Degradação da isolamento causada pelas descargas superficiais [28]	55

Figura 4.5 - Descarga por efeito de coroa visível em isoladores [30]	56
Figura 4.6 - Arborescências elétricas provocadas pelas descargas parciais numa isolação de um cabo isolado [32].....	56
Figura 4.7 - Falha na isolação dos enrolamentos de uma máquina elétrica rotativa [33]	57
Figura 4.8 - Esquema equivalente de descargas internas e superficiais [34]	57
Figura 4.9 - Circuito equivalente de uma descarga parcial num cabo [34].....	58
Figura 4.10 - Volume ocupado por uma cavidade na isolação [34]	59
Figura 5.1 - Relação ideal entre a amplitude e a frequência que minimiza os erros de integração [23]	64
Figura 5.2 - Circuito de medição analógica do nível de descargas parciais [36]	64
Figura 5.3 - Representação do sistema de medição do nível de descargas parciais através de sistemas digitais [36]	65
Figura 5.4 - Circuito em que o instrumento de medida está em série com o condensador de acoplamento [23].....	67
Figura 5.5 - Circuito em que o instrumento de medida está em série com o objeto de ensaio [23].....	67
Figura 5.6 - Circuito equivalente da impedância de medida [24].....	69
Figura 5.7 - Grandezas associadas ao sistema de medição de banda larga [24].....	70
Figura 5.8 - Circuito equivalente de um sistema de medição de descargas parciais que utiliza um instrumento de banda estreita [27]	70
Figura 5.9 - Localização da origem das descargas parciais no cabo [37]	72
Figura 5.10 - Representação da influência da imperfeição do cabo no trajeto das ondas emitidas baseada no método de refletometria no domínio do tempo [38]	73
Figura 5.11 - Circuito equivalente da calibração de um instrumento para a medida do valor da carga aparente num objeto de ensaio [23]	75
Figura 6.1 - Disposição do circuito de medida	78
Figura 6.2 - Cabo utilizado no ensaio [40].....	79
Figura 6.3 - Tela que mostra as formas de onda associadas à medição [22]	79
Figura 6.4 - Janela do software que controla a medição [22]	80
Figura 6.5 - Disposição do circuito de medida	81
Figura 6.6 - Cabo utilizado no ensaio [40].....	82
Figura 6.7 - Software da HAEFELY [41]	82
Figura 6.8 - Menu relativo à configuração da medida	83

Figura 6.9 - Variação do valor da carga aparente medido com o MPD 600 em função da largura de banda	86
Figura 6.10 - Variação do valor da carga aparente medido com o DXX 9121b em função da largura de banda	86
Figura 6.11 - Variação do valor da carga aparente medido com o MPD 600 em função da frequência central	87
Figura 6.12 - Variação do valor da carga aparente medido com o DXX 9121b em função da frequência central	87

Lista de tabelas

Tabela 1 - Valores máximos da $\tan \delta$, em função do tipo de isolamento [2]	34
Tabela 2 - Larguras de banda do filtro de integração do equipamento DDX 9121b	45
Tabela 3 - Comparação das principais características dos dois tipos de instrumentos de medição de descargas parciais [27]	71
Tabela 4 - Valores da carga aparente onde se varia a largura de banda	84
Tabela 5 - Valores da carga aparente onde se varia a frequência central	84
Tabela 6 - Valores da carga aparente onde se varia a largura de banda	85
Tabela 7 - Valores da carga aparente onde se varia a frequência central	85

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CA ou AC	Corrente alternada
CC ou DC	Corrente contínua
DP	Descarga parcial
EPR	Borracha de etilenopropileno
HEPR	Borracha de etilenopropileno de elevada densidade
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
MAT	Muito alta tensão
MT	Média tensão
OPGW	<i>Optical Power Ground Wire</i>
PE	Polietileno
PEX ou XLPE	Polietileno reticulado
PVC	Policloreto de vinilo
RIV	Tensão de Radio Interferência
TDR	Refletometria no domínio do tempo

Lista de símbolos

U_0	Tensão simples (V)
U	Tensão composta (V)
U_m	Tensão máxima (V)
R_{20}	Resistência em corrente contínua da alma condutora a 20 °C (Ω/km)
ρ_{20}	Resistividade do metal condutor a 20 °C ($\Omega\text{mm}^2/\text{km}$)

S	Secção do condutor (mm^2)
α_{20}	Coeficiente de variação da resistência a 20 °C ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
K_1	Coeficiente relacionado com o processo de fabrico da alma condutora
K_2	Coeficiente que representa o cableamento dos fios constituintes da alma condutora
K_3	Coeficiente que representa a majoração do comprimento devido à montagem dos condutores de fase no conjunto final
R'	Resistência em corrente contínua da alma condutora à temperatura máxima de funcionamento (Ω/m)
θ	Temperatura máxima de funcionamento da alma condutora ($^{\circ}\text{C}$)
y_s	Coeficiente de efeito pelicular
f	Frequência da alimentação (Hz)
y_p	Coeficiente de efeito de proximidade
d_c	Diâmetro do condutor (mm)
s	Distância entre os eixos dos condutores (mm)
R_{AC}	Resistência em corrente alternada à temperatura máxima de funcionamento (Ω/m)
L	Coeficiente de autoindução (H/km)
r	raio da alma condutora (mm)
D	Média geométrica das distâncias entre eixos dos condutores (mm)
M	Indutância mútua entre a alma condutora e o ecrã metálico (H/km)
d_m	Diâmetro médio do ecrã metálico (mm)
X	Reatância aparente do condutor (Ω/km)
ω	Pulsção da corrente (rad/s)
R_E	Resistência do ecrã metálico à temperatura de serviço (Ω/km)
C	Capacidade linear (F/m)
ϵ	Permitividade relativa da isolamento
D_i	Diâmetro externo da isolamento, excluindo o semicondutor exterior (mm)
I_c	Corrente capacitiva (A)
l	Comprimento do cabo (km)
Z	Impedância do condutor (Ω/km)
R_i	Resistência de isolamento ($M\Omega\text{km}$)
K_i	Constante de isolamento que depende do material ($M\Omega\text{km}$)
r_1	Raio da alma condutora, incluindo o semicondutor interno (mm)
r_2	Raio sobre a camada isolante, excluindo o semicondutor externo (mm)
E_x	Gradiente de potencial no raio X (kV/mm)
δ	Ângulo de perdas dielétricas
W_J	Potência das perdas Joule (W/km)
W_d	Perdas dielétricas (W/m)
I	Corrente máxima admissível (A)

$\Delta\theta$	Temperatura da alma condutora acima da temperatura ambiente (K)
T_1	Resistência térmica da camada isolante (Km/W)
T_2	Resistência térmica das bainhas não metálicas entre o isolamento e a armação (Km/W)
T_3	Resistência térmica da bainha exterior (Km/W)
T_4	Resistência entre a superfície do cabo e o meio envolvente (Km/W)
n	Número de condutores do cabo
λ_1	Fator de perdas para a blindagem
λ_2	Fator de perdas para a armadura
I_{AD}	Corrente de curto-circuito calculada assumindo uma base adiabática (A)
t	Duração do curto-circuito (s)
K_c	Constante que depende do material condutor ($As^{0,5}/mm^2$)
θ_f	Temperatura final (°C)
θ_i	Temperatura inicial (°C)
B	Coeficiente de temperatura de resistência à corrente de curto-circuito a 0 °C (K)
R_t	Resistência do condutor medido (Ω)
K_t	Fator de correção da temperatura
D_d	Campo de deslocamento elétrico do dielétrico sólido (Cm^2)
D_c	Campo de deslocamento elétrico da cavidade (Cm^2)
ϵ_0	Constante de permissividade do vazio
q	Carga aparente (C)
ΔV	Queda de tensão (V)
p	Energia dissipada durante uma DP (J)
V_i	Tensão de aparecimento de uma DP (V)
d	Espessura da isolação (mm)
f_1	Limite inferior de frequência
f_2	Limite superior de frequência
f_m	Frequência central
Δf	Largura de banda

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento

Cada vez mais, a sociedade contemporânea depende do fornecimento de energia elétrica, sendo este essencial para a realização de quase todas as suas necessidades básicas. Todas as entidades que operam no setor elétrico, nomeadamente as empresas produtoras e as empresas responsáveis pelas redes de transporte e de distribuição, têm a função importantíssima de garantir a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia, uma vez que a eventual falha deste fornecimento pode provocar grandes inconvenientes à população, bem como elevados prejuízos económicos.

Para evitar estas falhas de fornecimento, as entidades intervenientes no setor elétrico têm de ter um cuidado especial com os equipamentos que utilizam nas suas redes. Por isso, são exigidas aos fabricantes garantias e qualidade dos equipamentos fornecidos.

Relativamente aos equipamentos que transmitem a energia elétrica dos locais onde esta é gerada até aqueles onde é consumida (linhas aéreas e cabos subterrâneos), os seus fabricantes têm que cumprir rigorosamente critérios de qualidade presentes nas normas em vigor. É exemplo disto o controlo de qualidade do processo de produção dos cabos isolados. Este controlo de qualidade é realizado depois de os cabos estarem finalizados e consiste na realização de vários ensaios laboratoriais que irão determinar a sua qualidade ou detetar eventuais anomalias provocadas pelo processo de fabrico. Estes ensaios são, normalmente, efetuados pelos próprios fabricantes.

Dos vários ensaios que são realizados, destaca-se o ensaio de medição do nível de descargas parciais ou medição da carga aparente que pretende determinar a qualidade da isolamento do cabo. Esta é determinante no período de funcionamento de um cabo, uma vez que a sua destruição é uma das principais avarias que podem ocorrer num cabo.

Neste trabalho devemos dar alguma informação sobre a empresa onde este trabalho foi realizado. A CABELTE é uma empresa fundada com o nome de JOMAR em 1938. Este nome foi

alterado para CABELTE - Cabos Elétricos e Telefônicos no ano de 1974 e mantém-se até aos dias de hoje.

A sua área de atividade é a produção e a comercialização de cabos elétricos de baixa, média e alta tensão, cabos de telecomunicações em cobre e em fibra ótica, almas condutoras, cabos metálicos nus e cabos metálicos nus com fibra ótica.

A empresa tem realizado, ao longo dos anos, uma modernização da tecnologia que utiliza, de modo a acompanhar o desenvolvimento existente na sua área de atividade. As principais apostas da empresa, nos dias de hoje, são o desenvolvimento da produção e ensaio de cabos de tensões mais elevadas (MT, AT e MAT).

As principais datas que refletem esta modernização da empresa são:

- 1974 - Implementação da empresa nas suas instalações atuais de Arcozelo.
- 1989 - Concretização de um importante plano de modernização. Neste plano realizou-se a informatização da empresa, investiu-se em novas linhas de produção e desenvolveu-se a coordenação, fornecimento e montagem de redes de cabos de fibra ótica.
- 1993 - Grande investimento na produção de fibras óticas, com implementação de novas instalações fabris dotadas das mais recentes tecnologias de fabricação e ensaio.
- 1996 - Investimento na área da produção de almas condutoras e de cabos “OPGW”, aumentando assim a sua gama de fabrico.
- 2005/2006 - Aquisição e montagem de uma nova linha, em catenária, de produção de cabos de MT e AT, através do processo de reticulação por via seca.
- 2015 - Aquisição e montagem de uma nova catenária, capaz de produzir cabos de energia de tensões estipuladas até 275 kV.
- 2017 - Investimento na construção de novos laboratórios de Ensaio de AT e de Ensaio ao Fogo.

Atualmente, a empresa encontra-se subdividida em vários departamentos, tendo cada um deles a sua função e contributo para a empresa. Na figura 1.1 encontra-se representado o organograma geral da empresa. Esta dissertação enquadra-se no Departamento de Qualidade, Ambiente e Segurança, que é o departamento responsável pela realização de todos os ensaios aos cabos produzidos.



Figura 1.1 - Organograma geral da CABELTE

1.2 - Motivação e Objetivos

A presente dissertação tem o objetivo principal de contribuir para um melhor desempenho do laboratório de alta tensão da CABELTE, que foi inaugurado recentemente, de modo a aprofundar conhecimentos teóricos e práticos sobre a realização do ensaio de medição do nível de descargas parciais. Como este ensaio é uma ferramenta essencial no diagnóstico do estado de um cabo isolado, permitindo detetar imperfeições na isolamento que futuramente levariam à destruição do mesmo, torna-se de grande interesse o seu estudo.

O laboratório de alta tensão da CABELTE resulta de um dos mais recentes investimentos realizados; foi adquirido à empresa Shanghai Lishang International Trading Co. Ltd, e a sua construção foi concluída em 2018. Este laboratório é constituído por uma gaiola de Faraday com 25×15×13 metros. Este encontra-se equipado com todos os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios elétricos aos cabos com tensão estipulada superior a 60 kV.

Como este laboratório está numa fase inicial de atividade industrial, esta dissertação também tem o objetivo de reunir, de forma resumida, o procedimento de todos os ensaios realizados no mesmo, podendo ser utilizada como um guia de acompanhamento dos ensaios.

Os objetivos específicos abordados neste trabalho são:

- Compreensão da constituição de cabos isolados e das principais funções de cada componente;
- Compreensão dos métodos envolvidos na produção e ensaios de cabos isolados de AT;
- Levantamento dos principais equipamentos presentes no laboratório de alta tensão;

- Estudo do princípio físico e da medição das descargas parciais;
- Análise da influência do intervalo de integração na medição do nível de descargas parciais.

1.3 - Estrutura

A dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos.

O capítulo 1 contextualiza o tema abordado e enquadra-o no âmbito deste trabalho, cuja descrição detalhada é apresentada nos capítulos subsequentes.

O capítulo 2 consiste numa breve revisão das características construtivas e dos principais parâmetros elétricos associados aos cabos isolados de AT. É realizada esta contextualização para introduzir os cabos isolados. Também é mencionado o seu processo produtivo, para se compreender como estes são fabricados e quais são os principais equipamentos associados a este processo de fabrico.

Numa primeira parte do capítulo 3, são apresentados os vários tipos de ensaios realizados aos cabos isolados de AT, tendo como base as normas IEC. Isto possibilita a compreensão dos ensaios realizados nos diversos tipos de ensaios existentes nas normas estudadas destinadas aos cabos isolados de AT. Numa segunda parte deste capítulo, é realizado um levantamento de todo o equipamento específico para a realização dos ensaios aos cabos isolados presente no laboratório da CABELTE.

No capítulo 4, introduz-se o tema das descargas parciais, onde é referido o seu conceito e princípio físico, os vários tipos de descargas parciais existentes, as suas principais consequências e uma modelização que permite calcular o seu valor estimado.

No capítulo 5, é explicado o processo de medição das descargas parciais, falando-se nos principais tipos da sua deteção, aprofundando-se mais o princípio de medição elétrico. Mencionam-se também os circuitos e os principais tipos de instrumentos utilizados para realizar esta medição.

No capítulo 6, descreve-se e analisa-se um ensaio realizado para verificar a influência da frequência de integração no valor obtido para o nível de descargas parciais. Este ensaio teve como recurso os aparelhos de medida do nível de descargas parciais presentes nos dois laboratórios da CABELTE.

No capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, bem como a projeção de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Cabos Isolados

Ao longo deste capítulo serão apresentados os principais conceitos associados aos cabos isolados de energia, sendo referidas as suas principais características construtivas e os seus parâmetros elétricos mais relevantes.

2.1 - Características construtivas

Este subcapítulo surge na necessidade de explicar a matéria prima com que são realizados os ensaios de DP, os cabos elétricos isolados. Logo, é importante conhecer os seus vários componentes e perceber as suas funções. Também será abordado resumidamente o processo de fabrico destes cabos.

Os principais componentes de um cabo isolado são:

- Alma condutora
- Camadas semicondutoras interna e externa
- Isolação
- Blindagem
- Bainha exterior

Na figura 2.1 podem ser observados os componentes referidos.

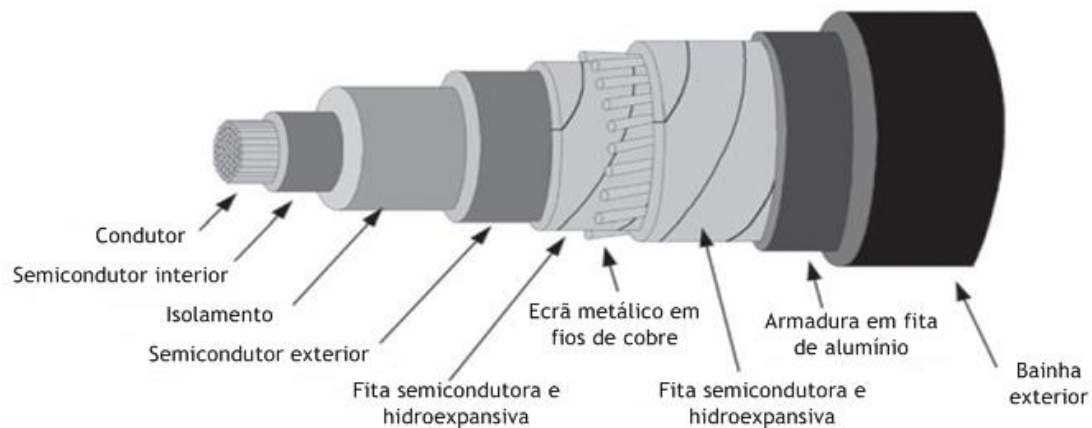


Figura 2.1 - Constituição de um cabo isolado de AT [1]

Também é importante referir que a normalização possui um papel importante no fabrico e no ensaio dos cabos elétricos, pois esta servirá como garantia da qualidade e do correto desempenho do mesmo em determinadas condições de funcionamento, garantindo, também, a segurança na utilização do mesmo. As normas em vigor que se referem às características dos cabos de média e alta tensão e os respetivos ensaios a ser realizados são, respetivamente, a IEC 60502-2 [2] e a IEC 60840 [3].

2.1.1. Alma Condutora

A alma condutora encontra-se na parte mais interior do cabo, tendo como principal função a transmissão de energia elétrica. Esta pode ser qualificada quanto ao material que a constitui e quanto à sua composição.

Relativamente ao material utilizado nas almas condutoras, normalmente são escolhidas almas de cobre recozido, nu ou estanhado, ou de alumínio 3/4 duro ou de ligas de alumínio, em casos especiais [1], estando esta escolha dependente de fatores técnicos e económicos.

Comparando os dois principais materiais utilizados, as almas de cobre têm uma resistividade elétrica inferior, são mais flexíveis e apresentam menores secções para um igual valor de resistência, tornando a secção do cabo de alumínio aproximadamente 1,6 vezes superior à secção do cabo de cobre [4].

Por outro lado, o alumínio é mais leve, permitindo uma redução da massa em, aproximadamente, 50%, numa situação de igualdade de perdas [5]. A utilização de cabos de alumínio é, também, a escolha mais económica porque a massa da alma condutora é 50% mais baixa, como se acabou de referir, embora depois tenha de ser tida em consideração a maior quantidade de material isolante do cabo, devido ao seu maior diâmetro.

Relativamente à composição, a alma condutora pode ser caracterizada em função da sua flexibilidade e da sua secção nominal.

Quanto à flexibilidade, pode ser considerada maciça ou multifilar, como se pode observar na figura 2.2. Quando é constituída por um único fio ou por vários setores cableados, é chamada de maciça. Este tipo de alma caracteriza-se por ter menor flexibilidade e encontra-se limitado

a almas de secções inferiores. Quando a alma é constituída por vários fios cableados, trata-se de uma alma multifilar. Este tipo possui uma maior flexibilidade e destina-se a almas de secções superiores.

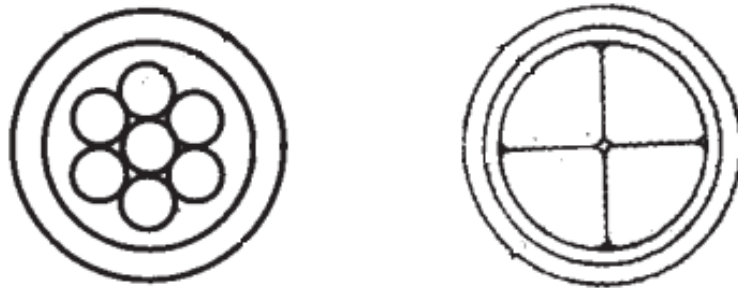


Figura 2.2 - Representação de um condutor multifilar (à esquerda) e de um condutor maciço (à direita) [1]

A secção da alma condutora pode ter uma forma circular ou setorial, tal como se pode observar na figura 2.3.

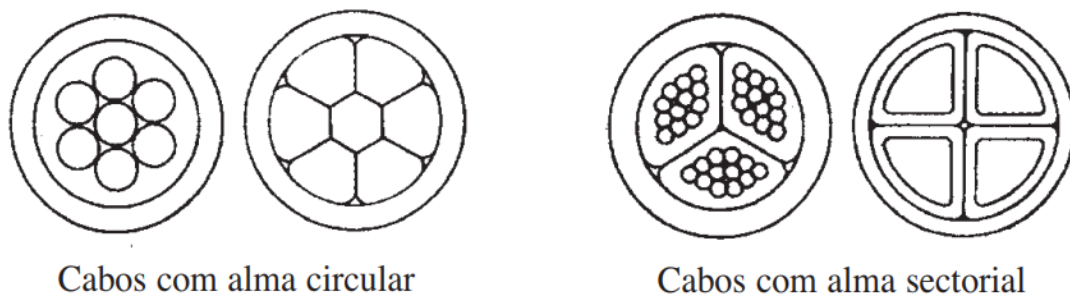


Figura 2.3 - Formas da alma condutora [1]

A utilização de almas setoriais permite um maior aproveitamento do espaço quando o cabo tem 3 ou 4 condutores. Para almas circulares, quando também se pretende rentabilizar o espaço disponível, pode optar-se por compactar a alma.

Dentro das almas circulares, quando se trata de secções elevadas, a alma deverá ser composta por vários segmentos cableados, podendo estes ser ligeiramente isolados entre si [1]. A esta composição dá-se o nome de condutores de almas segmentadas ou condutores Milliken e tem a finalidade de reduzir os efeitos pelicular e de proximidade, que serão abordados no subcapítulo 2.2.2.2. Estes condutores apenas começam a ter vantagem a nível económico para secções superiores a 1200 mm² [5]. Na figura 2.4, está representado este tipo de condutores.



Figura 2.4 - Condutor Milliken [6]

2.1.2. Camada Isolante

A camada isolante ou isolação encontra-se entre as camadas semicondutoras interior e exterior e é composta por um material isolante sintético, podendo este ser um termoplástico, elastómero ou polímero reticulável. Esta é a principal camada afetada pelas descargas parciais, portanto é de grande interesse perceber as suas propriedades. Tal como o próprio nome indica, esta camada tem a função de isolar o condutor do exterior.

Antigamente, eram utilizados cabos isolados a papel impregnado a óleo para níveis de tensão mais elevados, mas estes foram substituídos por cabos de isolamento sintético, uma vez que os últimos possuem melhores propriedades isolantes e atenuam os inconvenientes da instalação e exploração das isolações em papel impregnado.

Os materiais isolantes sintéticos podem ser divididos em dois grupos [1]:

- Materiais termoplásticos - Caracterizados por apresentarem uma variação reversível da sua plasticidade com a temperatura. Os materiais mais utilizados deste grupo são o policloreto de vinilo (PVC) e o polietileno (PE).
- Elastómeros e polímeros reticuláveis - Caracterizados por apresentarem um importante comportamento elástico e por possuírem uma grande aptidão para a deformação. Depois de extrudidos, precisam de um processo de reticulação, que faz com que estes materiais possam atingir temperaturas de funcionamento mais elevadas sem perder as suas propriedades isolantes. Os materiais mais utilizados deste grupo são o polietileno reticulado (PEX ou XLPE) e a borracha de etilenopropileno (EPR).

O processo de reticulação consiste em alterar, de forma irreversível, a estrutura química do material, tornando-o mais estável termicamente [7]. Os principais agentes que atuam neste processo são catalisadores, temperatura, pressão e água.

À medida que se vai subindo no nível da tensão de funcionamento do cabo, maior será a espessura da camada isolante e maiores são as exigências relativas à sua qualidade dielétrica. Para os cabos de alta e muito alta tensão, esta qualidade influenciará bastante o

comportamento do isolante, nomeadamente no seu tempo de vida. Portanto, é importante ter as seguintes precauções durante o fabrico desta camada:

- Eliminar todas as impurezas que possam estar no isolante, através da realização de uma filtragem do material enquanto este está a ser fabricado;
- Não criar vacúolos ou bolhas gasosas, principalmente nas superfícies exteriores da camada isolante;
- Reduzir ao máximo o conteúdo de água, de modo a evitar o fenómeno de arborescência de água (*water treeing*), que irá contribuir bastante para a degradação da camada isolante.

Para cabos de alta tensão, esta camada é aplicada juntamente com as camadas semicondutoras interior e exterior através da tripla extrusão, tema este que será abordado mais à frente, onde esta permite cumprir com as precauções mencionadas acima.

2.1.3. Camadas Semicondutoras Interior e Exterior

Segundo a norma IEC 60502-2 [2], todos os cabos de média tensão e superior, exceto as exceções especificadas no ponto 7.1 da mesma norma, devem possuir camadas semicondutoras.

A camada semicondutora interior é aplicada por extrusão sobre o condutor e tem a função de criar uma superfície equipotencial uniforme em torno deste. Esta também evita a concentração do campo elétrico em pontos específicos que correspondem às irregularidades do condutor, como se pode verificar na figura 2.5.

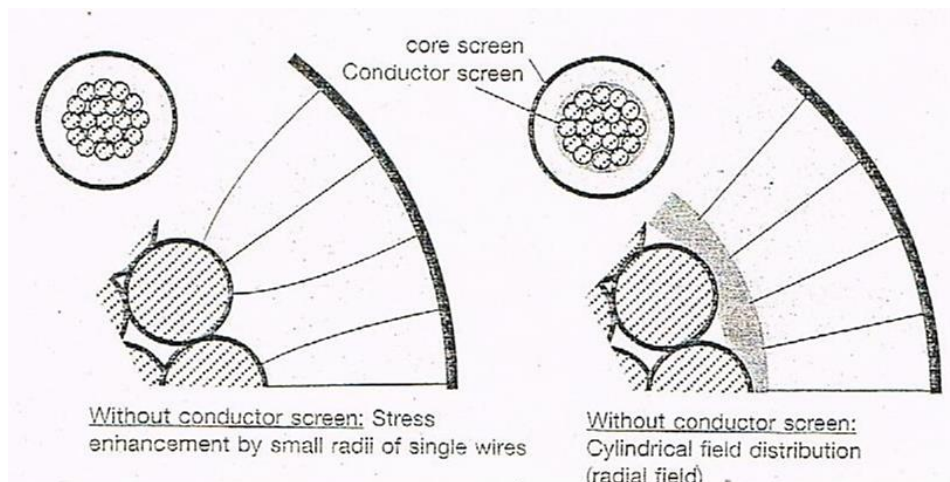


Figura 2.5 - Disposição das linhas do campo elétrico num cabo isolado sem e com semicondutor interno [5]

A camada semicondutora exterior é aplicada também por extrusão sobre a isolação, podendo esta ser aderente ou pelável. Tem como principais funções facilitar a aplicação do ecrã metálico e criar as condições necessárias à regulação e orientação do campo elétrico, sem danificar a isolação, do ponto de vista elétrico e mecânico.

Os materiais destas camadas deverão ser da mesma natureza do material utilizado na isolação, mas com características semicondutoras [8].

2.1.4. Blindagem

Tal como já foi referido, a blindagem, ou ecrã metálico, é colocada em torno do semicondutor exterior e tem as funções de escoar de forma eficaz as correntes de defeito, nomeadamente correntes capacitivas e correntes de curto-circuito, garante a proteção de pessoas na eventualidade de ocorrer uma perfuração da bainha exterior e cria uma superfície equipotencial que orienta as linhas de força do campo elétrico.

Esta blindagem pode ser de cobre ou de alumínio e pode possuir as seguintes formas [8]:

- Uma ou várias fitas, aplicadas em hélice ou longitudinalmente
- Vários fios dispostos helicoidalmente em torno do núcleo
- Tranças constituídas por grupos de fios, em malha helicoidal

Quando se opta por aplicar uma blindagem em fios de cobre, esta é colocada sobre uma fita semicondutora, tendo esta a função de evitar que os fios marquem longitudinalmente o semicondutor exterior, o que poderia prejudicar o seu correto funcionamento. Antes da colocação da bainha exterior, sobre os fios de cobre é ainda empregue uma fita de poliéster, de modo a evitar que a bainha exterior preencha os espaços vazios que existem entre os fios.

Quanto à disposição da blindagem e a distribuição das linhas de campo elétrico no isolamento, distinguem-se os cabos de campo radial ou não radial. Um cabo de campo não radial possui um ecrã que envolve o conjunto dos condutores, enquanto que um cabo de campo radial possui uma blindagem individual para cada condutor. Estas duas variantes podem ser visualizadas na figura 2.6. Os cabos de campo radial surgiram com o objetivo de eliminar a componente tangencial do campo elétrico presente nos cabos de campo não radial.

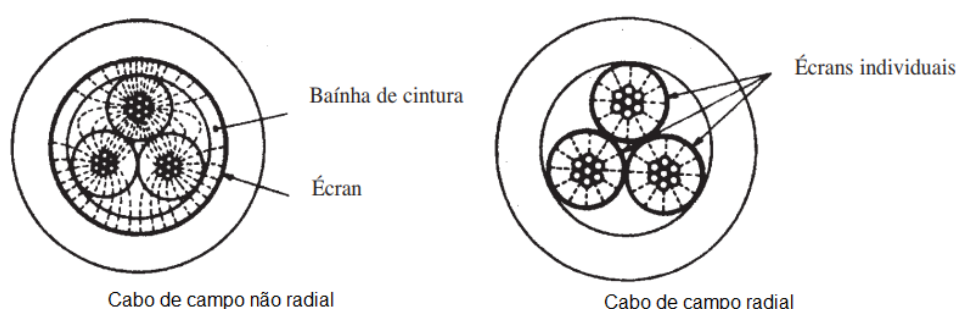


Figura 2.6 - Distribuição do campo elétrico num cabo de campo não radial e num cabo de campo radial [1]

2.1.4.1. Ligações da Blindagem à Terra

A ligação da blindagem é fundamental para que se minimizem as correntes de fugas que circulam na blindagem, minimizando também as perdas totais do cabo e aumentando a sua capacidade de transporte. Esta ligação também protege pessoas e bens, pois permitirá escoar

com maior facilidade as correntes de defeito que poderiam levar à destruição do cabo ou até mesmo colocar em risco vidas de pessoas.

Existem vários tipos de ligação da blindagem à terra, sendo os mais comuns a ligação das duas extremidades à terra (*both-end bonding*), a ligação de apenas uma das extremidades à terra (*single-point bonding*) e a ligação à terra cruzada (*cross-bonding*).

No *both-end bonding*, ambas as extremidades da blindagem se encontram ligadas à terra, o que permite, devido ao campo magnético do cabo principal e ao circuito fechado da blindagem do cabo, circular uma corrente na mesma, que irá provocar perdas significativas e irá aquecer o cabo, diminuindo, conseqüentemente, a capacidade de transporte do mesmo [9]. Esta ligação é a mais desvantajosa economicamente devido ao que acabou de ser referido [10]. Este esquema de montagem normalmente não é utilizado para sistemas com tensões nominais superiores a 66 kV [9], uma vez que, nesta gama de tensão, a capacidade de transporte do cabo é um fator muito importante. Na figura 2.7, pode observar-se o seu esquema de ligação e a variação da tensão induzida ao longo do comprimento do comprimento do cabo.

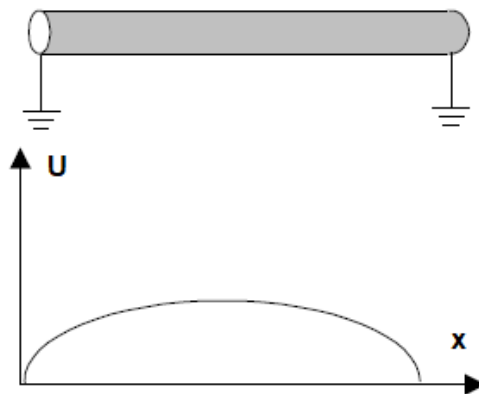


Figura 2.7 - Ligação das duas extremidades da blindagem à terra [10]

No *single-point bonding*, apenas uma das extremidades da blindagem é ligada à terra, estando a outra extremidade em aberto. Neste tipo de ligação, não há circulação de uma corrente na blindagem, pelo que as perdas na blindagem são quase inexistentes, sendo a sua capacidade de transporte superior à capacidade da ligação mencionada anteriormente. Por outro lado, irá surgir uma tensão entre a blindagem e a terra, que variará linearmente com a distância e será máxima na extremidade que se encontra em aberto, como se encontra representado na figura 2.8. Por razões de segurança, é necessário colocar limitadores de tensão nessa extremidade [9]. A fim de evitar o aumento da tensão induzida no caso de ocorrer uma falha, ambos os pontos de terra estão conectados adicionalmente com um fio de continuidade de terra, como se encontra representado na figura 2.9.

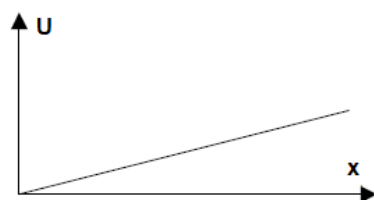


Figura 2.8 - Variação da tensão induzida ao em função do comprimento do cabo [10]

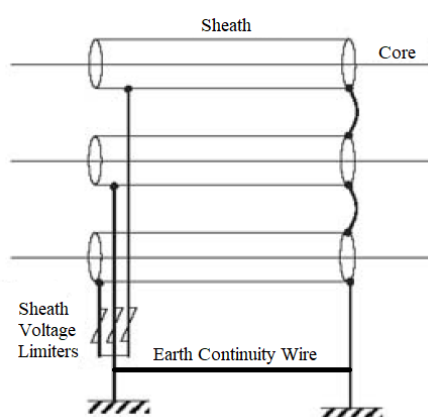


Figura 2.9 - Esquema da ligação da blindagem à terra numa extremidade [9]

A ligação à terra cruzada ou *cross-bonding* surgiu com o objetivo de evitar as correntes que circulam na blindagem e as elevadas tensões induzidas na mesma. Para isso, os troços de cabo são divididos em números múltiplos de três e com igual comprimento de maneira a que, numa situação ideal, a soma das várias componentes da tensão, que se encontram desfasadas em 120° , se anulem [9]. Este tipo de ligação é utilizado em circuitos elétricos de comprimento elevado, onde serão necessárias juntas entre cada uma das secções [10]. Como é uma ligação bastante cara, é mais utilizada em circuitos de alta tensão, uma vez que estes precisam de uma maior capacidade de transporte. Na figura 2.10 pode observar-se o esquema de ligação da blindagem à terra cruzada e a variação da tensão induzida na blindagem.

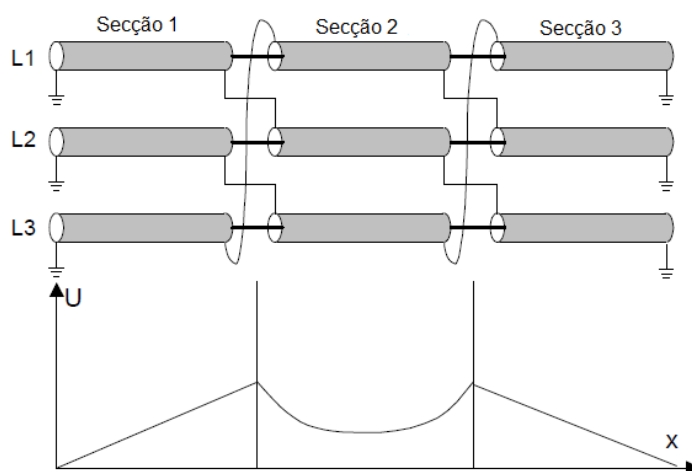


Figura 2.10 - Ligação à terra cruzada [10]

2.1.5. Bainhas

Um cabo isolado pode possuir 2 tipos de bainhas, que são a bainha de enchimento e a bainha exterior [4].

A bainha de enchimento tem a função de regularizar a secção do cabo, conferindo-lhe a geometria desejada, através do preenchimento de espaços vazios que possam existir entre os condutores da blindagem, como por exemplo fios de cobre, e a bainha exterior. Esta pode ser composta por uma camada extrudida, por diversos tipos de fitas ou por perfis independentes [4].

A bainha exterior encontra-se na camada mais exterior do cabo e tem a função de o proteger mecanicamente e quimicamente. Normalmente é composta por PVC ou PE.

2.1.6. Casos especiais

As camadas mencionadas até este ponto são as mais habituais num cabo de média ou alta tensão. No entanto, existem algumas situações especiais que exigem outras camadas que confirmam aos cabos alguma característica extra. Encontram-se nesta situação a armadura e a bainha interior.

A armadura é empregue nos cabos quando é necessária uma proteção mecânica extra, estando este submetidos a esforços transversais (compressão, choques) ou longitudinais (tração), quer durante a sua instalação, quer ao longo do seu funcionamento. Esta é uma proteção mais utilizada em cabos de baixa tensão, uma vez que os cabos de média e alta tensão são instalados com bastantes cuidados, sendo dispensável esta proteção conferida pela armadura. É importante salientar que as armaduras utilizadas em cabos monocondutores terão de ser compostas por material não magnético, para que as perdas magnéticas do cabo não aumentem drasticamente.

A bainha interior é utilizada em situações em que o cabo se encontra num ambiente muito húmido, onde este necessita de uma proteção extra contra a humidade. Esta tem como principal função proteger o isolamento da penetração de humidade, logo é importante que o material que a constitui possua propriedades estanques. Pode ser composta por material sintético ou metálico.

2.1.7. Etapas do Processo de Fabrico

O processo industrial de fabrico de cabos isolados, principalmente o que se destina à produção de cabos de AT e MAT, utiliza tecnologia de ponta de maneira a que a qualidade dos mesmos seja a melhor possível. Tem de se ter um cuidado especial com o fabrico da isolação, pois esta estará sujeita a esforços dielétricos bastante elevados.

A CABELTE é uma empresa com uma linha de produção vertical, ou seja, adquire as matérias primas em bruto, tais como o cobre, o alumínio e os materiais poliméricos, entre outros, e

transforma-os até ser atingido o produto final. O fabrico das almas de cobre é realizado na fábrica de Arcozelo e o das almas de alumínio é realizado na fábrica de Ribeirão.

Este processo de fabrico divide-se nas seguintes etapas: fabrico da alma condutora, extrusão da camada isolante, cableamento dos condutores, aplicação da blindagem e aplicação da bainha exterior. As etapas do processo de fabrico são realizadas pela ordem mencionada.

2.1.7.1. Fabrico da Alma Condutora

O fabrico de uma alma condutora de cobre consiste na trefilagem e cableamento do cobre em bruto, com o objetivo de se obter um condutor com a secção e flexibilidade pretendida. A trefilagem consiste no processo em que o fio de cobre em bruto, de 8 mm de diâmetro e chamado de fio máquina, atravessa várias fieiras de modo a que este seu diâmetro seja sucessivamente diminuído até se atingir o valor pretendido, como se pode observar na figura 2.11. Seguidamente estes fios serão cableados entre si. Em função da secção pretendida, os condutores podem ser formados por 1, 7, 19, 37 ou mais fios, normalmente em camadas concêntricas de sentidos opostos.

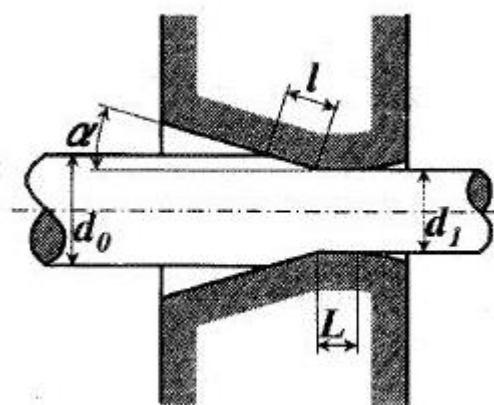


Figura 2.11 - Trefilagem de um fio de cobre [11]

2.1.7.2. Extrusão da Camada Isolante

Depois do fabrico da alma condutora realiza-se a extrusão dos materiais isolantes, que consiste na aplicação de uma camada de material polimérico sobre a alma condutora, sendo este previamente aquecido para que a sua aderência ao cabo seja efetuada adequadamente.

Os materiais poliméricos são colocados nas extrusoras em forma de grão. Estes grãos irão atravessar um fuso e grelhas ao longo da extrusora, de modo a filtrar algumas impurezas [5], até que finalmente são aplicados. Na figura 2.12 está representado o interior de uma extrusora.

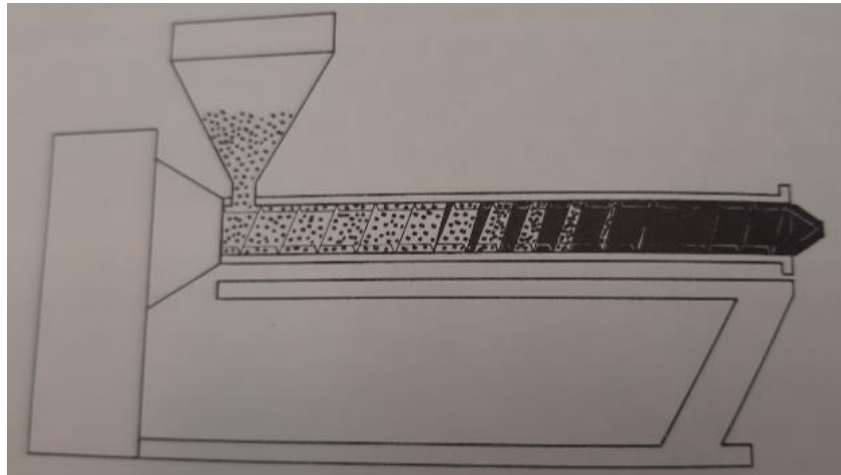


Figura 2.12 - Extrusora [12]

Em cabos de BT, apenas é realizada a extrusão simples, uma vez que apenas é aplicada uma camada de material polimérico isolante ao cabo. Nos cabos de MT e AT, como habitualmente terão de ser aplicadas camadas semicondutoras, preferencialmente realiza-se o processo de tripla extrusão simultânea, onde as três camadas, camadas semicondutoras interior e exterior e isolamento, são aplicadas simultaneamente, como se pode observar na figura 2.13. A grande vantagem desta operação consiste na diminuição significativa dos vacúolos e impurezas presentes na isolação.

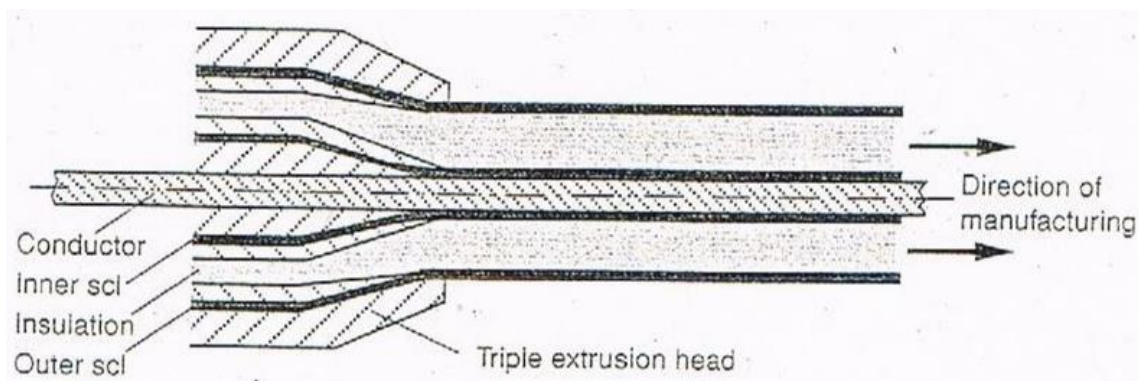


Figura 2.13 - Processo de tripla extrusão [5]

A reticulação da isolação dos cabos de MT e AT é normalmente realizada numa Linha Catenária de Vulcanização Contínua, LCVC. Nesta linha, o material encontra-se numa atmosfera de azoto sobreaquecido e a uma elevada pressão, de modo a reticular o material da isolação. A esta zona é atribuído o nome de zona de vulcanização. Depois da zona de vulcanização o cabo é arrefecido por azoto ou por água, na chamada zona de refrigeração. Os principais componentes da linha de produção de um cabo isolado a XLPE encontram-se representados na figura 2.14.

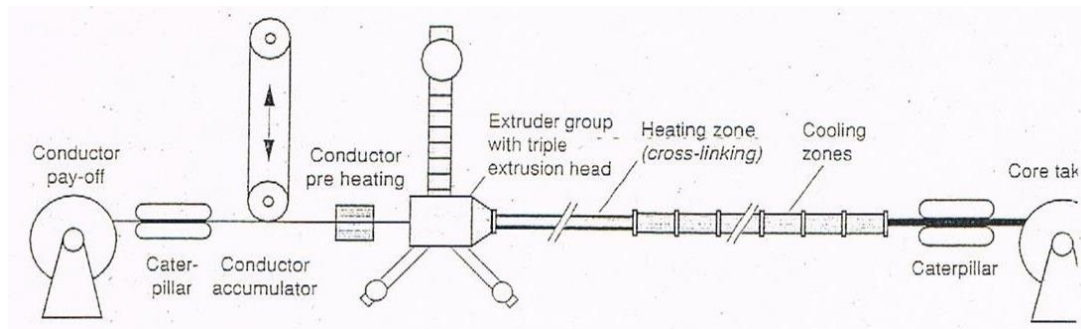


Figura 2.14 - Linha de extrusão [5]

2.1.7.3. Cableamento dos Condutores

Esta etapa apenas é realizada para cabos tripolares (antes da operação da bainha exterior) ou trimonopolares (após a operação de bainha exterior). Cabos trimonopolares são três cabos monopolares cableados entre si. São utilizadas máquinas de grandes dimensões que torcem os condutores entre si e encontram-se representadas na figura 2.15.

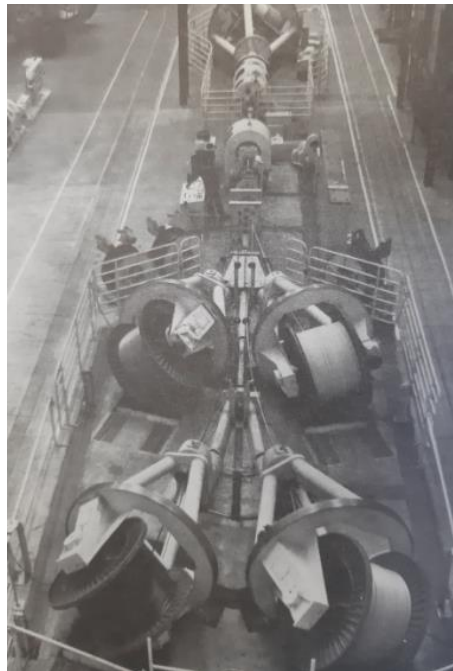


Figura 2.15 - Máquina de cablear [12]

2.1.7.4. Aplicação da Blindagem

A aplicação da blindagem sobre o semicondutor exterior é realizada por uma máquina do tipo "Planetária Rígida", uma vez que o módulo rotativo, que possui as bobinas com os fios que serão utilizados como blindagem, roda em torno do eixo do cabo que está a ser fabricado. Nesta máquina pode ser aplicada uma blindagem com 96 fios no máximo, para ecrãs em fios de cobre.

2.1.7.5. Aplicação da Bainha Exterior

Por último, a bainha exterior é aplicada através do processo de extrusão sobre a última camada do cabo, em tudo semelhante ao processo de extrusão da isolação. Terminado este processo, encontra-se concluído o fabrico do cabo.

2.2 - Parâmetros Elétricos

Este subcapítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos sobre os parâmetros elétricos associados aos cabos elétricos.

2.2.1. Tensão Estipulada dos Cabos de Energia

Os cabos de energia são concebidos para um determinado valor de tensão estipulada, estando esta relacionada com o tipo de cabo escolhido e com a tensão nominal do local onde o cabo será inserido. A tensão estipulada para cabos de média e alta tensão é expressa na forma U_0/U (U_m), que têm o seguinte significado [1]:

- U_0 - Tensão entre um condutor e um potencial de referência, podendo este ser a terra ou o ecrã metálico. Representa a tensão simples.
- U - Tensão entre dois condutores de fase. Representa a tensão composta.
- U_m - Tensão máxima que pode aparecer entre fases da rede em condições normais de funcionamento. Representa a tensão que a isolação consegue suportar.

2.2.2. Resistência do Condutor

A resistência do condutor é a capacidade de este se opor à passagem da corrente elétrica quando existe uma diferença de potencial aplicada nos seus terminais. Este parâmetro é fundamental quando se pretende dimensionar o cabo, pois quer-se que este parâmetro seja o mais baixo possível, de maneira a que as perdas sejam minimizadas e otimizada a capacidade de transporte do cabo.

2.2.2.1. Resistência em Corrente Contínua

A resistência linear de um condutor em corrente contínua e à temperatura de 20 °C é dada pela expressão 2.1 [1]. Assim, verifica-se que a resistência do condutor, além de depender da resistividade do material condutor e da secção do mesmo, depende de outros fatores representados por K_1 , K_2 e K_3 .

$$R_{20} = \frac{\rho_{20} K_1 K_2 K_3}{S} \quad (2.1)$$

Onde:

- R_{20} - Resistência linear em corrente contínua à temperatura de 20 °C, em Ω/km
- ρ_{20} - Resistividade do metal condutor à temperatura de 20 °C, em $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$

- S - Secção da alma condutora, em mm^2
- K_1 - Coeficiente relacionado com o processo de fabrico da alma condutora
- K_2 - Coeficiente que representa o cableamento dos fios constituintes da alma condutora
- K_3 - Coeficiente que representa a majoração do comprimento devido à montagem dos condutores de fase no conjunto final

Como a resistência varia lineamente com a temperatura, torna-se imprescindível corrigir o valor da resistência para a temperatura máxima de operação da alma condutora de acordo com a expressão 2.2.

$$R' = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (2.2)$$

Onde:

- R' - Resistência do condutor em corrente contínua à temperatura máxima de funcionamento $^{\circ}\text{C}$, em Ω/m
- R_{20} - Resistência do condutor em corrente contínua à temperatura de 20°C , em Ω/m
- α_{20} - Coeficiente de variação da resistência a 20°C
 - Cobre: $\alpha_{20} = 3,93 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
 - Alumínio: $\alpha_{20} = 4,03 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- θ - Temperatura máxima de funcionamento da alma condutora, em $^{\circ}\text{C}$

O valor da temperatura máxima de funcionamento está relacionado com a temperatura máxima da isolamento do cabo.

2.2.2.2. Resistência em Corrente Alternada

Em corrente alternada, o valor da resistência tem em consideração mais dois efeitos, sendo eles o efeito pelicular e o efeito de proximidade. Estes dois efeitos estão relacionados com a distribuição não uniforme da corrente no condutor.

Considerando que um condutor é composto por vários fios, os que se encontram no centro possuem um maior fluxo magnético do que os da periferia. Consequentemente a força eletromotriz autoinduzida será maior em direção ao centro do condutor, causando uma densidade de corrente no centro inferior à da periferia [12], tal como é ilustrado na figura 2.16. Esta densidade extra na periferia do condutor é o efeito pelicular e provoca um aumento da resistência do condutor.

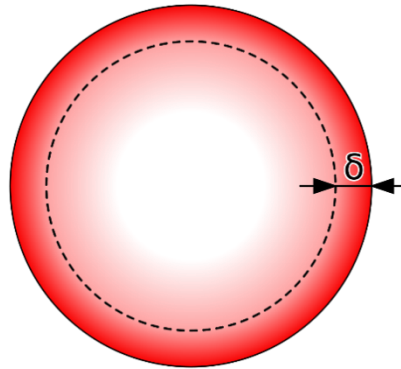


Figura 2.16 - Efeito Pelicular [13]

O coeficiente atribuído ao efeito pelicular, y_s , é calculado pelas expressões 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 de acordo com a norma IEC 60287-1-1 [14].

$$\text{Para } 0 < x_s \leq 2,8 \quad y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (2.3)$$

$$\text{Para } 2,8 < x_s \leq 3,8 \quad y_s = -0,136 - 0,0177x_s + 0,0563x_s^2 \quad (2.4)$$

$$\text{Para } x_s > 3,8 \quad y_s = 0,354x_s - 0,733 \quad (2.5)$$

Com

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (2.6)$$

Onde,

- y_s - Coeficiente de efeito pelicular
- f - Frequência da alimentação, em Hz
- x_s - argumento usado para calcular o efeito pelicular
- k_s - Fator utilizado para calcular o efeito pelicular

O efeito de proximidade também aumenta a resistência do condutor e o seu efeito é manifestado quando dois condutores alimentados por uma tensão alternada se encontram próximos. Os fenômenos de indução entre estes condutores irá causar um desequilíbrio na repartição da corrente.

Se a corrente que atravessa os dois condutores circular no mesmo sentido a maior densidade de corrente estará nas metades exteriores. Com sentidos opostos, a maior densidade de corrente estará nas metades interiores. Este comportamento é descrito na figura 2.17.

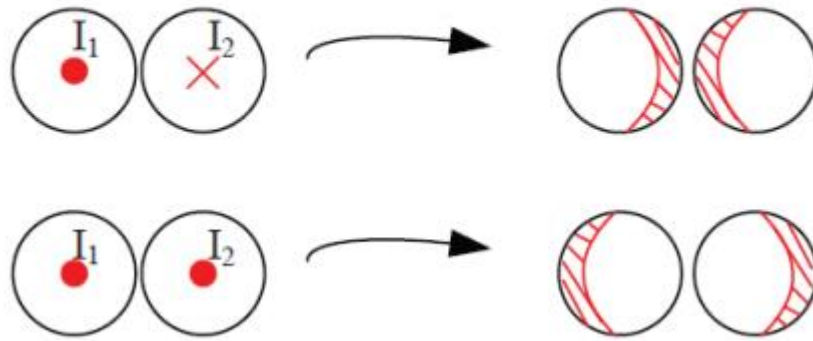
Current direction:**Current distribution:**

Figura 2.17 - Efeito de proximidade [15]

Este efeito é tanto maior quanto mais próximos estiverem os condutores [12].

O coeficiente do efeito de proximidade é obtido pelas expressões 2.7 e 2.8 e depende da frequência do sistema, da resistência linear à temperatura de operação do cabo (3.2), da distância aos outros condutores e do diâmetro da alma. É de notar que estas expressões são válidas para cabos tripolares ou para três cabos monopolares.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (2.7)$$

Com,

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (2.8)$$

Onde,

- y_p - Coeficiente de efeito de proximidade
- d_c - Diâmetro do condutor, em mm
- s - Distância entre os eixos dos condutores, em mm
- x_p - Argumento usado para calcular o efeito de proximidade
- k_p - fator utilizado para calcular o efeito de proximidade

Os coeficientes k_s e k_p podem tomar os valores da tabela 2 da IEC 60287-1-1 [14]. Depois de determinados os valores de y_s e y_p , o valor da resistência em corrente alternada é dado pela expressão 2.9.

$$R_{AC} = R'(1 + y_s + y_p) \quad (2.9)$$

A uma frequência de 50/60 Hz, para secções mais pequenas, até 300 mm², estes efeitos podem ser desprezados [1]. Porém, em secções mais elevadas afetam significativamente a capacidade de transporte do cabo e, por isso, torna-se economicamente interessante atenuar estes efeitos, optando, por exemplo, por condutores Milliken.

2.2.3. Indutância

A indutância é a propriedade de um condutor elétrico que quando é atravessado por corrente induz uma força eletromotriz em si próprio, sendo este fenômeno designado por autoindução. Quando a corrente que atravessa um condutor induz uma força eletromotriz noutro condutor próximo, trata-se de um fenômeno de indutância mútua [16].

Num circuito elétrico em que os condutores estão próximos uns dos outros, nomeadamente num sistema trifásico composto por três condutores monopolares, verificam-se fenômenos de indução que vão depender da disposição relativa destes condutores. A disposição dos condutores pode ser feita em esteira ou em triângulo. Existe ainda a disposição em trevo juntivo, que se verifica no caso em que os condutores têm as suas superfícies a tocar entre si.

O valor da indutância linear por unidade de comprimento do condutor é dado pela expressão 2.10 [4].

$$L = \left(0,05 + 0,2 \ln \left(\frac{D}{r} \right) \right) 10^{-3} \quad (2.10)$$

Onde,

- L - Indutância a considerar para cada um dos condutores de fase de um sistema monofásico ou trifásico, em H/km
- r - Raio da alma condutora, em mm
- D - Média geométrica das distâncias entre eixos dos condutores, em mm, de onde se destacam os três casos na figura 2.18

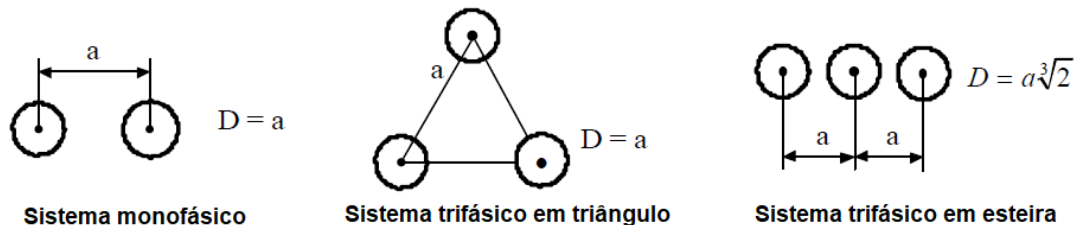


Figura 2.18 - Valor de D a considerar nas expressões 2.10 e 2.11 [4]

Se o cabo possuir uma armadura magnética que envolva o conjunto das fases, a sua indutância linear dos condutores aumenta aproximadamente 10 % [1].

Este fenômeno de autoindução entre almas e blindagens é considerado no caso de cabos monopolares com a blindagem ligada à terra nas duas extremidades do cabo. Esta situação é relevante uma vez que a blindagem ao ser percorrida por uma corrente induzida de valor significativo liberta calor devido às perdas por efeito de Joule, diminuindo assim a capacidade de transporte do cabo. Este fenômeno é desprezado nas seguintes situações:

- Quando a blindagem se encontra ligada à terra apenas numa extremidade;
- Disposição dos cabos em esteira, sendo esta transposta;
- Quando a blindagem é transposta ao longo do cabo (*cross-bonding*).

Relativamente à indutância mútua, entre a alma condutora e o ecrã metálico, este fenómeno é considerado apenas no caso de cabos que possuem uma bainha de chumbo devido ao facto de as correntes poderem serem induzidas nos ecrãs metálicos. Pelo contrário, quando se trata de cabos multipolares, nos quais o ecrã metálico envolve o conjunto das fases, ou de cabos unipolares cujos ecrãs são constituídos por fitas, este fenómeno de indução é bastante reduzido em regime permanente.

O valor da indutância mútua entre a alma condutora e o ecrã metálico é obtido pela expressão 2.11, considerando que a disposição dos condutores é simétrica [1].

$$M = 0,2 \ln\left(\frac{2D}{d_m}\right) 10^{-3} \quad (2.11)$$

Onde:

- M - Indutância mútua entre a alma condutora e o ecrã metálico, em H/km
- D - Média geométrica das distâncias entre eixos dos condutores, em mm, de onde se destacam os três casos na figura 2.18
- d_m - Diâmetro médio do ecrã, em mm

2.2.4. Reatância

A reatância é uma oposição dos elementos indutores ou condensadores à variação de corrente e de tensão, respetivamente, presentes em circuitos de corrente alternada.

O seu valor, para o caso em que as correntes induzidas nos ecrãs metálicos são desprezáveis, é dado pela expressão 2.12. No caso onde estas correntes não são desprezáveis, o seu valor é calculado pela expressão 2.13.

$$X = L \omega \quad (2.12)$$

$$X = L\omega - \frac{M}{1 + \frac{R_E^2}{M^2 \omega^2}} \quad (2.13)$$

Onde,

- X - Reatância aparente do condutor, em Ω/km
- L - Coeficiente de autoindução do condutor, em H/km
- ω - Pulsção da corrente, em rad/s
- M - Indução mútua entre a alma condutora e o ecrã metálico
- R_E - Resistência do ecrã metálico à temperatura de serviço, em Ω/km

2.2.5. Capacidade

Comparando com as linhas aéreas, os cabos possuem uma maior capacidade, para um igual comprimento. Tal resulta do facto de as distâncias entre condutores e entre condutores e a terra serem inferiores e de a permissividade relativa do isolamento ser bastante superior (uma isolação de PEX tem uma permeabilidade relativa de 3, enquanto a do ar é aproximadamente 1).

A capacidade linear de um cabo monopolar, segundo a IEC 60287-1-1 [14], é calculada pela expressão 2.14.

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} \quad (2.14)$$

Onde,

- C - Capacidade linear, em F/m
- ε - Permitividade relativa da isolação
- D_i - Diâmetro externo da isolação, excluindo o semicondutor exterior, em mm
- d_c - Diâmetro do condutor, incluindo o semicondutor interno, em mm

2.2.6. Corrente Capacitiva

A corrente capacitiva é definida como a corrente que atravessa um condutor com determinado comprimento, enquanto este está submetido a uma tensão simples sinusoidal, funcionando em vazio. Esta corrente é obtida pela expressão 2.15 [1].

$$I_C = U_0 C \omega l \times 10^{-6} \quad (2.15)$$

Onde,

- I_C - Corrente capacitiva, em A
- U_0 - Tensão simples, em V
- C - Capacidade linear, em μF
- l - Comprimento do cabo, em km

Através desta expressão conclui-se que se um cabo for muito longo então a corrente capacitiva vai ser elevada e, conseqüentemente, a sua capacidade de transporte é reduzida.

2.2.7. Impedância

A impedância de um condutor é calculada pela expressão 2.16.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.16)$$

Onde,

- Z - Impedância do condutor, em Ω/km
- R - Resistência do condutor em corrente alternada à máxima temperatura de funcionamento, em Ω/km
- X - Reatância do condutor, em Ω/km

2.2.8. Resistência de Isolamento

A resistência de isolamento é a resistência elétrica que se opõe à passagem da corrente através da camada isolante.

Embora este parâmetro não permite avaliar qualitativamente a qualidade dielétrica do isolante, pode ser utilizado para verificar se ocorreu alguma alteração nas características no mesmo.

Esta é calculada pela expressão 2.17 [1].

$$R_i = K_i \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.17)$$

Onde,

- R_i - Resistência de isolamento, em $M\Omega km$
- K_i - Constante de isolamento que depende do material, em $M\Omega km$
- r_1 - Raio da alma condutora, incluindo o semicondutor interno, em mm
- r_2 - Raio sobre a camada isolante, excluindo o semicondutor externo, em mm

2.2.9. Gradiente de Potencial

O gradiente de potencial consiste no valor do campo elétrico em determinado ponto da isolação. Este valor é máximo na superfície do condutor e varia ao longo da isolação, tomando valores mais baixos à medida que esse ponto tem um raio superior. Esta variação deve-se às diferentes permitividades dos componentes [12] e pode ser observada na figura 2.19.

Pode ocorrer a perfuração da isolação se o valor do gradiente de potencial em algum ponto da mesma for ultrapassado, podendo esta ser acelerada se a existirem vacúolos, impurezas ou humidade na isolação.

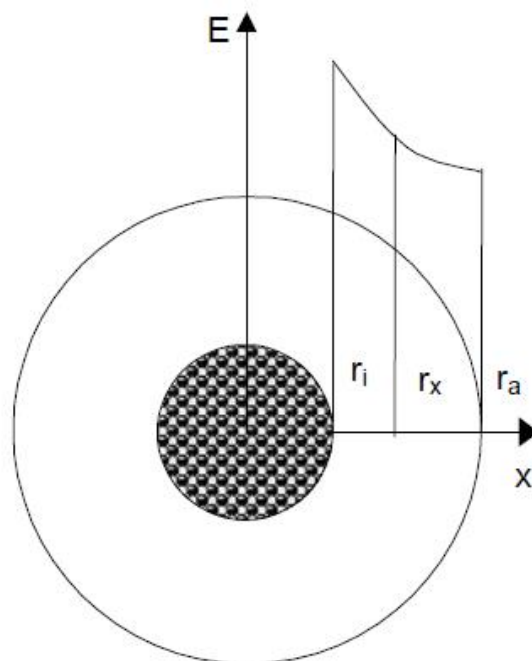


Figura 2.19 - Variação do gradiente de potencial ao longo da isolação [10]

O gradiente de potencial no raio X é calculado pela expressão 2.18 [12].

$$E_x = \frac{U_0}{r_x \ln\left(\frac{r_A}{r_I}\right)} \quad (2.18)$$

Onde,

- E_x - Gradiente de potencial no raio X , em kV/mm
- U_0 - Tensão simples, em kV
- r_x - Raio do local onde se pretende calcular o gradiente de potencial, em mm
- r_A - Raio sobre a camada isolante, excluindo o semicondutor exterior, em mm
- r_I - Raio da alma condutora, incluindo o semicondutor interior, em mm

2.2.10. Fator de Potência do Dielétrico

O fator de potência do dielétrico consiste na razão entre as perdas no dielétrico e a potência que o cabo transporta, sendo desejado que este seja o mais baixo possível, principalmente para cabos com tensão nominal superior a 33 kV [12].

Se a isolamento fosse isenta de defeitos, o cabo teria propriedades de um condensador perfeito. Num condensador perfeito, a tensão e a corrente estariam desfasadas de 90° e a corrente da isolação seria capacitiva. Como existem sempre algumas impuras na isolação, a sua resistência diminui, provocando um aumento da corrente resistiva. Logo, a tensão e a corrente estarão desfasadas a menos de 90° .

Na figura 2.20 está representado o ângulo de perdas no dielétrico, δ , que irá determinar a qualidade da isolação do cabo. Quanto menor for o δ , menor será a resistência da isolação do cabo, o que implica uma melhor qualidade da camada de isolamento.

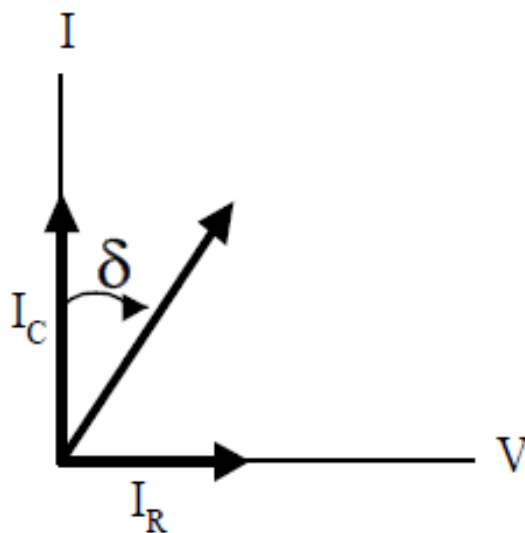


Figura 2.20 - Representação vetorial do ângulo de perdas no dielétrico [17]

2.2.11. Perdas nos Cabos

Nos cabos, os principais locais onde podem ocorrer perdas são na alma condutora, na isolação, nos ecrãs metálicos e na armadura. Quando o cabo se encontra em funcionamento é gerado calor nos componentes mencionados, tendo este que ser dissipado para o meio envolvente. Esta produção de calor é energia que é perdida no funcionamento do cabo.

2.2.11.1. Perdas Joule

As perdas Joule são calculadas pela expressão 2.19 e são definidas como a energia que é desperdiçada sob a forma de calor quando uma corrente atravessa um condutor durante um determinado período de tempo.

$$W_J = RI^2 \quad (2.19)$$

Onde,

- W_J - Potência das perdas Joule, em W/km
- R - Resistência em corrente alternada da alma condutora à temperatura de funcionamento, em Ω/km
- I - Corrente que atravessa a alma condutora, em A

2.2.11.2. Perdas nos Revestimentos Metálicos

As perdas nos revestimentos metálicos englobam as perdas em ecrãs metálicos e armaduras que o cabo possuir. Estas perdas estão associadas a perdas por efeito de Joule, que resultam da circulação de correntes induzidas nestes elementos, e a perdas magnéticas por correntes de Foucault e por histerese [1].

Quando o ecrã metálico ou a armadura envolvem as três fases estas perdas são pequenas em regime equilibrado. Por outro lado, quando se trata de condutores monopolares, que é a maior parte dos casos na alta tensão, estes componentes aumentam as perdas no cabo de tal maneira que não podem ser desprezadas.

Estas perdas podem ser minimizadas através da ligação do ecrã metálico à terra, reduzindo assim as correntes que nele circulam.

2.2.11.3. Perdas Dielétricas

As perdas dielétricas de um cabo são proporcionais à sua capacidade, frequência, tensão simples e fator de potência do dielétrico.

Estas perdas são calculadas através da expressão 2.20 [1].

$$W_d = U_0^2 C \omega \tan(\delta) \quad (2.20)$$

Onde,

- W_d - Perdas dielétricas, em W/m
- ω - Pulsção da corrente, em rad/s
- C - Capacidade linear, em F/m

- U_0 - Tensão simples, em V

2.2.12. Intensidade Máxima Admissível em Regime Permanente

Como existem perdas Joule nos condutores e nos revestimentos metálicos durante o funcionamento de um cabo isolado irá ser produzido calor que, por condução, atravessa todas as camadas do cabo até ser libertado no meio exterior. Pelas leis da termodinâmica, esta libertação de calor irá manter-se até se atingir o equilíbrio térmico, que consiste num equilíbrio entre a temperatura da bainha exterior do cabo e do meio que o envolve.

Como os cabos isolados são constituídos por camadas de matérias poliméricas e estes possuem uma temperatura crítica que provoca uma destruição definitiva das propriedades da isolamento, é importante não atingir essas temperaturas. Então é importante determinar a maior corrente que o cabo suporta sem ultrapassar a tal temperatura crítica.

O valor da intensidade máxima admissível em regime permanente pode ser obtido aplicando as fórmulas da norma IEC 60287-1-1 [14].

Considerando um cenário onde os cabos se encontram enterrados onde não se realiza a dessecação do solo ou cabos no ar protegidos da radiação solar, a intensidade máxima admissível é dada pela expressão 2.21.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{R T_1 + n R(1 + \lambda_1) T_2 + n R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (2.21)$$

Onde,

- I - Corrente máxima admissível, em A
- $\Delta\theta$ - Temperatura da alma condutora acima da temperatura ambiente, em K
- R - Resistência da alma condutora em corrente alternada à máxima temperatura de funcionamento, em Ω/m
 - W_d - Perdas dielétricas da isolamento do condutor, em W/m
 - T_1 - Resistência térmica da camada isolante, em Km/W
 - T_2 - Resistência térmica das bainhas não metálicas entre o isolamento e a armação, em Km/W
 - T_3 - Resistência térmica da bainha exterior, em Km/W
 - T_4 - Resistência entre a superfície do cabo e o meio envolvente, em Km/W
 - n - Número de condutores do cabo
 - λ_1 - Fator de perdas para a blindagem
 - λ_2 - Fator de perdas para a armadura

2.2.13. Intensidade Máxima Admissível em Curto-circuito

O cálculo da corrente máxima admissível em curto-circuito de um cabo é fundamental para o correto dimensionamento dos sistemas de proteção e do ecrã metálico do cabo.

Durante o curto período de tempo em que a corrente de curto-circuito atravessa a alma condutora há uma elevação da temperatura na isolação. Contudo, esse aumento de temperatura não será prejudicial se a atuação das proteções for suficientemente rápida.

Assumindo que o curto-circuito está associado a um processo adiabático, ou seja, que o condutor não efetua quaisquer trocas de calor com as restantes camadas do cabo, a corrente de curto-circuito do cabo é dada pela expressão 2.22, de acordo com a IEC 949 [18].

$$I_{AD}^2 t = K_c^2 S^2 \ln \left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta} \right) \quad (2.22)$$

Onde,

- I_{AD} - Corrente de curto-circuito calculada assumindo uma base adiabática, em A
- t - Duração do curto-circuito, em s
- K_c - Constante que depende do material condutor, em $As^{0,5}/mm^2$ (valores presentes na tabela 1 da norma IEC 949 [18])
- S - Secção do condutor que está sujeito à corrente de curto-circuito, em mm^2
- θ_f - Temperatura final, em $^{\circ}C$
- θ_i - Temperatura inicial, em $^{\circ}C$
- β - Coeficiente de temperatura de resistência à corrente de curto-circuito a $0^{\circ}C$, em K (valores presentes na tabela 1 da norma IEC 949 [18])

Capítulo 3

Controlo de Qualidade

Neste capítulo são apresentados e analisados os vários tipos de ensaios realizados a cabos isolados de AT. São ainda apresentados os equipamentos presentes no laboratório de AT da CABELTE e descritas as suas principais características.

3.1 - Ensaios Laboratoriais

Para se poder avaliar de uma maneira assertiva e concreta a qualidade dos cabos produzidos, são, depois de estes estarem concluídos, realizados vários ensaios, conforme indicado nas normas europeias. Estas normas apenas obrigam a ensaiar os cabos que se encontrem já finalizados, mas na CABELTE também se ensaiam os cabos a meio do seu processo de fabrico, ou seja, depois de lhes ser aplicada a blindagem. Tal é feito para que se consiga detetar e consertar com maior facilidade qualquer defeito que o cabo possua.

As normas europeias associadas ao ensaio de cabos elétricos estão definidas de acordo com os diferentes níveis de tensão e são as seguintes:

- IEC 60502-2 [2] (MT)
- IEC 60840 [3] (AT)
- IEC 62067 [19] (MAT)

Como este trabalho visa o estudo de cabos de AT, as normas relativas aos cabos de MT e MAT não serão objeto de estudo.

Os ensaios dividem-se em três categorias: ensaios de rotina, ensaios por amostragem e ensaios de tipo, sendo que as principais diferenças entre eles residem na frequência com que são realizados e na sua diversidade.

Os ensaios de rotina são ensaios realizados pelo fabricante em todo o comprimento de cabo fabricado, para verificar se o que está a ser fabricado cumpre os requisitos da norma aplicável.

Os ensaios por amostragem são realizados pelo fabricante em amostras do cabo completo ou a componentes tirados de um cabo completo, para verificar se estes cumprem os requisitos da norma.

Os ensaios de tipo realizam-se antes de se comercializar determinado tipo de cabo e têm o objetivo de demonstrar características de comportamento satisfatórias em função da aplicação pretendida. Estes ensaios só têm de ser realizados uma vez, a não ser que tenham sido realizadas mudanças no material, no fabrico ou no *design* do cabo.

Além destes três tipos de ensaio que são realizados em ambiente fabril, também existem os ensaios que são realizados depois da instalação dos cabos no local onde serão utilizados. Estes têm o objetivo de demonstrar a integridade do cabo e dos seus acessórios, depois de a sua instalação se encontrar concluída.

Quando se trata de sistemas de cabo (cabo e acessórios), existem os ensaios de pré-qualificação e a extensão dos ensaios de pré-qualificação. Os ensaios de pré-qualificação são realizados pelo fabricante antes do fornecimento do produto ao mercado, para demonstrar o desempenho adequado de um tipo de sistema de cabo a longo prazo. A extensão do ensaio de pré-qualificação é aplicada na mesma situação, mas em casos onde já existe um sistema de cabos pré-qualificado.

As normas IEC estipulam os ensaios que deverão ser realizados pelos fabricantes de cabos. Nos subcapítulos 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4 serão abordados os respetivos ensaios para cada um dos tipos de ensaio referidos.

Nestas normas, encontra-se, também, a definição de um ensaio destrutivo e de um não destrutivo. Um ensaio destrutivo é um ensaio que pode levar à destruição do cabo, impossibilitando a sua utilização quando se finaliza o ensaio. É exemplo deste tipo de ensaio o ensaio ao choque atmosférico. Um ensaio não destrutivo não provoca nenhum dano ao cabo sujeito ao ensaio, podendo este ser utilizado posteriormente. Exemplos deste ensaio são os ensaios de rotina.

3.1.1. Condições Gerais de Ensaio

A realização dos ensaios laboratoriais requer a uniformização das condições de ensaio, independentemente do laboratório a usar, garantindo assim que os resultados obtidos com os ensaios sejam os mais fidedignos possíveis. Os ensaios laboratoriais especificados pela norma IEC 60840 [3] requerem as seguintes condições:

- Temperatura ambiente - A menos de outras especificações em ensaios particulares, estes são realizados a uma temperatura ambiente de $(20 \pm 15)^\circ\text{C}$;
- Frequência e forma da onda de tensão nos ensaios à frequência industrial - A frequência da tensão de ensaio tem de estar compreendida entre os 49 Hz e os 61 Hz e a forma de onda da tensão de ensaio tem de ser essencialmente sinusoidal;
- Forma da onda do ensaio ao choque atmosférico - A onda de choque possui um tempo de frente compreendido entre 1 μs e 5 μs e um tempo de cauda compreendido entre 40 μs e 60 μs .

3.1.2. Ensaios de Rotina

Os ensaios de rotina devem ser realizados a todo o comprimento de cabo fabricado e são os seguintes:

- Medição de descargas parciais
- Ensaio de tensão
- Ensaio de rigidez dielétrica da bainha exterior

3.1.2.1. Medição de Descargas Parciais

Durante a medição de descargas parciais, a tensão de ensaio é elevada gradualmente até $1,75 U_0$ e mantida durante 10 s e depois é reduzida lentamente até $1,5 U_0$.

A condição de validade deste ensaio reside na não deteção de um valor muito elevado de descargas parciais, ou seja, que o valor de carga aparente medido seja igual ou inferior a 10 pC, enquanto o objeto de ensaio se encontra a $1,5 U_0$.

Quando se trata de um ensaio de acessórios, são seguidos os mesmos princípios, mas a carga aparente deve ser igual ou inferior a 5 pC.

3.1.2.2. Ensaio de Tensão

O ensaio de tensão é realizado à temperatura ambiente, utilizando uma tensão de ensaio alternada à frequência industrial.

A realização deste ensaio consiste em elevar gradualmente a tensão aplicada ao cabo até se atingir os $2,5 U_0$ e depois mantê-la durante 30 min, sendo esta tensão aplicada entre a alma condutora e a blindagem.

Obtém-se aprovação neste ensaio se não ocorrer nenhuma rotura do isolamento enquanto está a ser aplicada tensão no cabo.

3.1.2.3. Ensaio de Rigidez Dielétrica à Bainha Exterior

No ensaio de rigidez dielétrica à bainha exterior é aplicada uma tensão DC entre a blindagem e a bainha exterior. Esta tensão aplicada depende da espessura da bainha exterior e deve ser de 8 kV por cada milímetro dessa espessura, sendo o máximo da tensão aplicada de 25 kV [20]. A duração deste ensaio deve ser de 1 minuto.

Este ensaio é validado se não ocorrer a rutura da bainha exterior.

3.1.3. Ensaios por Amostragem

Segundo a norma IEC 60840 [3], este tipo de ensaios é realizado em amostras de cabo, onde o comprimento total de cabo ensaiado não ultrapasse os 10 % do total de cabo fabricado.

Os ensaios por amostragem têm duas vertentes, uma elétrica e uma não elétrica. A vertente não elétrica encontra-se associada em geral ao controlo dimensional do cabo, por isso não será abordada.

Os ensaios de natureza elétrica são:

- Medição da resistência elétrica
- Medição da capacidade
- Ensaio de choque atmosférico

É importante mencionar que a frequência de realização do ensaio de choque atmosférico está dependente do procedimento de controlo de qualidade estabelecido entre o fabricante e o cliente. Na ausência de tal procedimento, o ensaio deve ser realizado para contratos com um comprimento de cabo superior a 20 km.

3.1.3.1. Medição da Resistência Elétrica

A medição da resistência elétrica é realizada à alma condutora e ao ecrã metálico. Esta é realizada num local de ensaio com uma temperatura razoavelmente constante e mantida durante pelo menos 12 horas antes da realização do ensaio. Se não se tiver a certeza de que a temperatura do cabo é igual à do local de ensaio, a medição é efetuada depois do cabo ter estado no local de ensaio durante 24 horas.

Os valores obtidos são corrigidos para a temperatura de 20 °C e por quilómetro de comprimento de acordo com a expressão 3.1 e fatores indicados na norma IEC 60228 [21]:

$$R_{20} = R_t \times K_t \times \frac{1000}{l} \quad (3.1)$$

Onde,

- R_{20} - Resistência do condutor a 20 °C (Ω/km)
- R_t - Resistência do condutor medido (Ω)
- K_t - Fator de correção da temperatura
- l - Comprimento do cabo (m)

O valor da resistência obtido através da expressão 3.1 deve ser inferior ao valor especificado na norma. O valor de referência da norma depende do tipo de cabo utilizado.

3.1.3.2. Medição da Capacidade

A capacidade deve ser medida entre a alma condutora e o ecrã metálico à temperatura ambiente. Uma vez obtido o valor da capacidade, este deve ser corrigido para 1 quilómetro de comprimento, não devendo exceder o seu valor nominal declarado pelo fabricante em mais de 8%.

3.1.3.3. Ensaio de Choque Atmosférico

De acordo com a norma IEC 60840 [3], o ensaio de choque atmosférico só é necessário para cabos que apresentem um gradiente de potencial à superfície do condutor superior a 8 kV/mm.

O ensaio deverá ser realizado a uma amostra de cabo com pelo menos 10 m de comprimento e com uma temperatura compreendida entre 5 °C a 10 °C acima da temperatura máxima do

funcionamento normal do cabo. O condutor deve ser aquecido através da passagem de corrente, até que atinja a temperatura desejada.

A forma de onda de choque atmosférico deverá estar de acordo com o referido no subcapítulo 3.1.1.

O cabo deverá suportar dez ondas de choque positivas e dez ondas de choque negativas, sujeito a uma tensão indicada na tabela 4 da IEC 60840 [3], sem que se verifique a rutura da isolação.

3.1.4. Ensaaios de Tipo

De acordo com a norma IEC 60840 [3], os ensaios de tipo podem ser realizados em cabos ou em sistemas de cabos. Tendo em conta esta situação, optou-se por mencionar apenas os ensaios associados aos cabos, uma vez que é o tema principal do trabalho. Porém, os ensaios realizados em sistemas de cabos são bastante semelhantes aos realizados em cabos.

Na realização destes ensaios, são utilizadas uma ou mais amostras de cabo com pelo menos 10 m de comprimento, excluindo o comprimento dos acessórios de ensaio.

Os ensaios de âmbito elétrico são executados na mesma amostra de cabo e são realizados na seguinte sequência:

- Ensaio de enrolamento seguido da medição de descargas parciais;
- Medição da $\tan \delta$;
- Ensaio de ciclos de aquecimento seguido da medição de descargas parciais;
- Ensaio de choque atmosférico, seguido de um ensaio de tensão.

Depois de se realizarem todos estes ensaios, é efetuada a medição da resistividade elétrica dos semicondutores, numa amostra diferente de cabo.

Existem, também, ensaios de âmbito não elétricos a que o cabo tem de realizar, mas estes não serão abordados no presente trabalho.

De seguida, são apresentadas as especificações dos ensaios, seguindo a sequência de ensaios acima mencionada.

3.1.4.1. Ensaio de Enrolamento

O ensaio de enrolamento pode ser considerado como um ensaio preparatório para a realização dos ensaios elétricos posteriores. De acordo com a norma IEC 60840 [3], a amostra deve ser enrolada em torno de um cilindro de ensaio (por exemplo, o centro de uma bobina), à temperatura ambiente, completando pelo menos uma volta completa. O processo de desenrolamento é efetuado em sentido contrário ao do enrolamento. O ciclo de enrolamento e de desenrolamento deverá ser repetido três vezes no total.

O diâmetro do cilindro de ensaio utilizado depende do tipo de cabo e do seu diâmetro, conforme o que se encontra especificado na norma.

3.1.4.2. Medição de Descargas Parciais

Quando se trata de ensaios a cabos, a medição de descargas parciais é realizada apenas à temperatura ambiente, mas quando se trata de sistemas de cabos esta medição é efetuada em duas situações distintas: à temperatura ambiente e a uma temperatura acima da sua temperatura de funcionamento.

A tensão aplicada ao cabo neste ensaio segue o procedimento anteriormente descrito na subsecção 3.1.2.1. Contudo o nível de descargas máximo é diferente. Enquanto que nos ensaios de rotina este valor máximo era 10 pC, nos ensaios de tipo este valor é 5 pC.

Relativamente ao ensaio a uma temperatura acima da sua temperatura de funcionamento, o cabo deve ser aquecido através da passagem de corrente no condutor até atingir uma temperatura de 5 °C a 10 °C acima do valor máximo da temperatura do cabo em funcionamento normal, e deverá ser mantido entre estes limites de temperatura durante pelo menos 2 horas.

Após a realização deste ensaio, o cabo ensaiado estará em conformidade com a norma se não se verificarem descargas parciais superiores a 5 pC enquanto está submetido a uma tensão de $1,5 U_0$.

3.1.4.3. Medição das Perdas Dielétricas

A medição das perdas dielétricas baseia-se numa aproximação de um cabo por um condensador ideal, em que o material dielétrico está contido entre a alma condutora e o ecrã metálico. Contudo, conforme o que foi descrito no subcapítulo 2.2.10, se por alguma razão o isolamento ou os semicondutores não forem dielétricos perfeitos, o sistema (alma condutora mais ecrã metálico) deixa de ser um condensador ideal, pelo que se irão verificar perdas dielétricas. Através desta medição é possível obter informação sobre as condições do cabo.

A medição do fator de perdas dielétricas é efetuada em função da temperatura, de acordo com a norma IEC 60502-2 [2]. A amostra de cabo é aquecida inicialmente num tanque com líquido ou num forno, ou então é aquecida através da passagem de corrente pela alma condutora ou pelo ecrã metálico ou ainda por ambos, atingindo-se uma temperatura compreendida entre 5 °C a 10 °C acima do valor máximo da temperatura do cabo em funcionamento normal.

A $\tan \delta$ é medida com uma tensão alternada de pelo menos 2 kV, tendo em conta que os valores medidos não deverão ultrapassar os valores especificados na tabela 1

Tabela 1 - Valores máximos da $\tan \delta$, em função do tipo de isolamento [2]

Tipo de Isolamento	EPR / HEPR	XLPE
Temperatura Máxima de Operação (°C)	90	90
$\tan \delta (\times 10^{-4})$	400	40

3.1.4.4. Ensaio de Ciclos de Aquecimento

Este ensaio é, também, conhecido por ensaio de envelhecimento acelerado com ciclos térmicos, permitindo simular o funcionamento do cabo em regime permanente.

De acordo com a norma IEC 60502-2 [2], a amostra que foi submetida aos ensaios anteriores deve ser aquecida através da injeção de uma corrente na alma condutora, até que o condutor atinja uma temperatura constante de 5 °C a 10 °C acima da temperatura máxima do cabo em funcionamento normal. Para cabos multipolares, a corrente de aquecimento deve ser injetada em todos os condutores.

Cada ciclo de aquecimento tem, pelo menos, a duração de 8 horas, sendo que a temperatura do condutor deverá ser mantida dentro dos limites de temperatura acima referidos, pelo menos 2 horas em cada ciclo de aquecimento, seguido de um ciclo de arrefecimento à temperatura ambiente durante, pelo menos, 3 horas.

Este ensaio tem a duração de 20 ciclos completos (aquecimento e arrefecimento). Finalizado o último ciclo, é realizada a medição de descargas parciais da amostra, referida no subcapítulo 3.1.4.2.

3.1.4.5. Ensaio de Choque Atmosférico

O ensaio de choque atmosférico já foi referido anteriormente no ensaio de amostra no subcapítulo 3.1.3.3. Contudo, o ensaio de choque atmosférico no contexto do ensaio tipo, sofre algumas alterações, sendo realizado dentro de uma sequência de ensaios e para todos os tipos de cabos.

Segundo a norma IEC 60840 [3], o cabo deverá suportar dez ondas de choque positivas e dez ondas de choque negativas, sujeito a uma tensão indicada na tabela 4 da IEC 60840 [3], sem que se verifique a rutura da isolamento.

3.1.4.6. Ensaio de Tensão

Nos ensaios de tipo, o ensaio de tensão realiza-se depois do ensaio de choque atmosférico. Este ensaio de tensão já foi descrito anteriormente no subcapítulo 3.1.2.2. No contexto do ensaio tipo, este ensaio tem algumas diferenças, nomeadamente em relação à duração do ensaio. Em vez do ensaio ser realizado em 30 minutos, é realizado em 15 minutos. O ensaio pode ser realizado durante o período de arrefecimento ou à temperatura ambiente, após a realização do ensaio de choque atmosférico.

Para que o cabo seja validado, não poderão ocorrer falhas de isolamento.

3.2 - Laboratório de Alta Tensão

Neste capítulo são apresentados os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios aos cabos. Tendo em conta o laboratório de AT da CABELTE, será feito um levantamento destes equipamentos, referindo-se as suas principais características.

Inicialmente descrevem-se os equipamentos gerais, nomeadamente os equipamentos utilizados nos ensaios à frequência industrial e ao choque e por último descrevem-se os equipamentos mais específicos de ensaios a cabos.

3.2.1. Equipamentos Gerais

Neste subcapítulo serão descritos os principais equipamentos que se encontram no laboratório da CABELTE utilizados na realização de ensaios à frequência industrial e ao choque.

3.2.1.1. Equipamento do Ensaio à Frequência Industrial

Para a realização de ensaios à frequência industrial, o laboratório da CABELTE possui os seguintes equipamentos:

- Transformador
- Divisor de tensão
- Regulador de alimentação
- Controlador

O transformador utilizado encontra-se equipado com um sistema ressonante, sendo estes sistemas bastante utilizados em indústrias onde se ensaiam equipamentos capacitivos, como é o caso dos cabos.

A ressonância deste sistema é atingida quando a reatância indutiva do sistema é igual à reatância capacitiva do objeto de ensaio. Depois da ressonância ter sido estabelecida, a alimentação deste sistema apenas precisa de fornecer a energia relativa às perdas do sistema, o que se traduz numa enorme poupança de energia durante a realização dos ensaios aos cabos, sendo esta a principal razão para a utilização do sistema ressonante.

O transformador é modular e possui três unidades ligadas em série. A sua potência é de 24 MVA, podendo atingir os 495 kV e os 48,48 A e a sua capacidade pode variar entre os 0,0155 e os 0,311 μF . O transformador presente na CABELTE encontra-se representado na figura 3.1.



Figura 3.1 - Transformador equipado com um sistema ressonante

O divisor de tensão, que se encontra na figura 3.2, permite reduzir a amplitude da tensão produzida pelo transformador numa tensão mais reduzida, possibilitando a sua medição. Além desta função, este equipamento também funciona como filtro, onde são atenuados sinais indesejados à saída do transformador, reduzindo o ruído que este provoca. Este equipamento tem uma tensão nominal de 500 kV, uma corrente nominal de 100 A, três condensadores com uma capacidade total de 10 nF e uma indutância de 60 mH. Garante uma atenuação igual ou superior a 60 dB na banda de frequência que compreende os 15 kHz e os 1 MHz.



Figura 3.2 - Filtro de Alta Tensão

A tensão de alimentação é regulada eletronicamente na cabina representada na figura 3.3. Esta cabina é controlada no computador e esse painel de controlo está representado na figura 3.4. Este painel de controlo também controla a ressonância do transformador. O controlo da tensão aplicada e da ressonância podem ser realizados manualmente ou automaticamente. No caso da tensão, este controlo automático precisa de ser previamente configurado, para que o cabo seja ensaiado à tensão pretendida e durante o tempo necessário.



Figura 3.3 - Unidade de controlo



Figura 3.4 - Painel de controlo do transformador

3.2.1.2. Equipamento do Ensaio de Choque

Para a realização do ensaio de choque a CABELTE possui um gerador capaz de produzir um impulso normalizado, uma onda de $1,2/50 \mu s$, com uma tensão de pico máxima de 1400 kV e uma energia máxima de 140 kJ.

Para este efeito, encontram-se no laboratório os seguintes equipamentos:

- Gerador de choque
- Divisor de tensão
- Unidade de alimentação
- Unidade de controlo
- Unidade de processamento de sinal

A torre do gerador de choque, que se encontra representada na figura 3.5, é composta por 7 andares, em que cada andar contém dois condensadores em série com uma capacidade de 1 μF no total que podem acumular uma tensão até 200 kV. O conjunto de condensadores existentes na torre do gerador é carregado em paralelo por uma fonte de corrente contínua, a unidade de alimentação, e encontram-se conectados através de resistências, chamadas de resistências de carga. Esta fonte vai carregar com polaridade positiva os terminais dos vários condensadores num dos lados, enquanto que os terminais do outro lado dos condensadores ficam carregados negativamente.



Figura 3.5 - Gerador de choque

Entre o terminal positivo de cada condensador e o terminal negativo do condensador seguinte encontra-se um explosor de esferas cuja tensão de escorvamento é regulada para um certo valor da tensão de carga, aumentando ou diminuindo a distância entre elas consoante o valor da tensão desejado. A ocorrência do escorvamento dos explosores ocorre quando a carga dos condensadores atinge a tensão de escorvamento, originando um percurso condutor que coloca os condensadores em série, onde a soma das tensões individuais de cada condensador resulta na tensão final obtida.

Após o escorvamento dos explosores dá-se o descarregamento em série dos condensadores pelas resistências de cauda, resultando daí um decrescimento exponencial da tensão com uma determinada constante de tempo, permitindo desta forma obter a componente de cauda da onda biexponencial. A componente de frente de subida de tensão é efetuada por um condensador de frente carregado através de uma resistência de amortecimento existente no topo da torre do gerador de choque, obtendo-se assim uma carga exponencial que se irá sobrepor à descarga dos condensadores. Assim é obtida a onda biexponencial com as duas componentes.

A forma da onda desejada para este ensaio é obtida através do ajuste dos valores das resistências e das capacidades dos vários condensadores e através do ajuste dos andares do gerador.

O divisor de tensão existente no laboratório encontra-se representado na figura 3.6 e a sua função é a medição da tensão a que ocorre a descarga. Este equipamento possui uma capacidade ao nível dos seus condensadores internos de 391,7 pF.



Figura 3.6 - Divisor de tensão

A unidade de alimentação do gerador de choque representada na figura 3.7 é uma unidade de retificação que é responsável pela geração de uma elevada tensão que carrega os condensadores do gerador de choque.



Figura 3.7 - Unidade de alimentação

A unidade de controlo representada na figura 3.8 é a unidade que permite estabelecer a tensão de ensaio pretendida, através da alteração das distâncias entre as esferas explosoras em cada andar. É, também, responsável por transmitir a informação à unidade de alimentação para ativar o carregamento dos condensadores e por definir a velocidade de carregamento destes condensadores e o momento do disparo. O equipamento presente permite a realização destas funções de maneira manual ou automática, sendo que a maneira automática necessita de ser programada antes da realização do ensaio.



Figura 3.8 - Unidade de controlo

A unidade de processamento de sinal representada na figura 3.9 permite realizar a análise dos valores obtidos através do divisor de tensão. Estes resultados são a forma de onda de tensão, o seu tempo de frente e de cauda e o valor máximo da tensão, entre outros parâmetros.

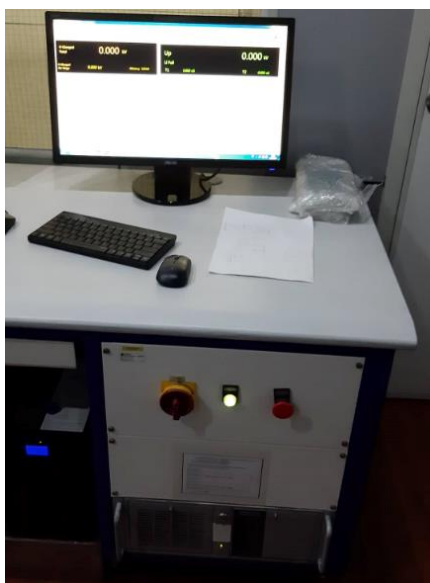


Figura 3.9 - Unidade de processamento de sinal

3.2.2. Equipamentos Específicos

Neste subcapítulo, são apresentados os equipamentos necessários à realização de ensaios a cabos isolados de AT.

Para se realizar o ensaio de descargas parciais, é utilizado um detetor de descargas parciais designado por MPD 600, estando este localizado na base de sustentação de um condensador (figura 3.10). O principal objetivo da utilização do condensador é a compensação capacitiva do sistema (equilíbrio entre a capacidade do cabo e a capacidade do transformador).



Figura 3.10 - Detetor de DP acoplado na base de sustentação do condensador

O detetor de descargas adquire a informação relativa aos eventos de DP de forma contínua e ininterrupta, tal como os integra em tempo real, podendo esta integração ser realizada no domínio do tempo ou de frequência. No capítulo 5 é explicado mais detalhadamente como é realizada a medição do nível de descargas parciais.

Ao nível do domínio do tempo este permite a integração entre os 100 ns e os 8 μ s. Ao nível do domínio de frequência, o detetor permite a escolha livre da frequência central do filtro de integração dentro dos limites de medição do sistema e a escolha das larguras de banda 9 kHz, 40 kHz, 100 kHz, 160 kHz, 300 kHz, 650 kHz, 800 kHz, 1000 kHz ou 1500 kHz, também para o filtro de integração. Este sistema tem a capacidade de adquirir sinais até os 20 MHz. Segundo o fabricante, o ruído interno do sistema é inferior a 15 fC.

Este equipamento permite a localização da origem de eventos de DP através do método de refletometria no domínio do tempo, TDR, ou através de medições síncronas de extremidade dupla.

Os principais componentes do sistema associados a este detetor de descargas parciais, representados na figura 3.11, são:

- Controlador de fibra ótica, MCU 550 (1);
- Unidade de aquisição, MPD 600, (2);
- Bateria, MPP 600 (3);
- Calibrador de carga, CAL 542 (4);
- Impedância de medição, CPL 542 (5);
- Os números 6, 7, 8 e 9 representam as ligações entre os vários elementos deste sistema.

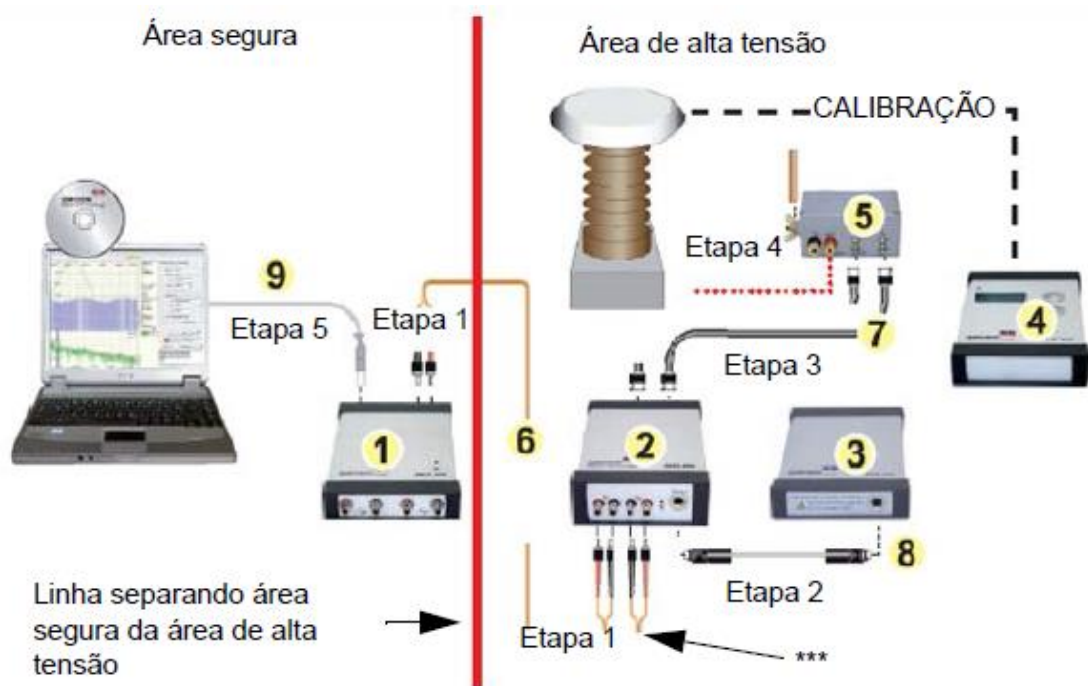


Figura 3.11 - Sistema de medição de DP [22]

Antes de realizar o ensaio de medição das DP, é realizada a calibração do sistema. Essa calibração é realizada com o calibrador CAL 542, que se encontra representado na figura 3.12. O objetivo e a forma de como deve ser feita a calibração encontram-se mencionados no capítulo 5.



Figura 3.12 - Calibrador CAL 542

No laboratório de MT, é utilizado o detetor de descargas parciais DDX 9121b da HAEFELY HIPOTRONICS. Este equipamento desempenha a mesma função do MPD 600 (medir o nível de DP), mas possui algumas diferenças no seu sistema e nas suas características. Este equipamento está representado na figura 3.13.



Figura 3.13 - Detetor de DP, DDX 9121b

O sinal proveniente de um evento de DP é recebido na impedância de medida, representada na figura 3.14, e convertido em tensão. Essa tensão é recebida pelo instrumento de medida e convertida num valor de carga aparente.



Figura 3.14 - Impedância de medição, AKV 9310

Segundo a ficha de características deste equipamento, a largura de banda do sistema de medição do nível de DP é dos 10 kHz aos 1500 kHz. Relativamente ao filtro de integração, a sua frequência central pode ser livremente escolhida, entre os 32 kHz e os 1498 kHz, e a sua largura de banda pode ser escolhida segundo os valores da tabela 2.

Tabela 2 - Larguras de banda do filtro de integração do equipamento DDX 9121b

Valores únicos	Intervalos
4 kHz	10 - 100 kHz, com um passo de 10 kHz
4,5 kHz	100 - 500 kHz, com um passo de 50kHz
9 kHz	500 - 1000 kHz, com um passo de 100 kHz

Este equipamento permite a localização de eventos de DP através do método de refletometria no domínio do tempo, TDR.

Os principais componentes associados ao detetor de descargas parciais são:

- Medidor de DP, DDX 9121b
- Impedância de medição, AKV 9130
- Calibrador, KAL 9510

Antes de realizar o ensaio de medição das DP, também é realizada uma calibração do sistema. Essa calibração é realizada com o calibrador KAL 9510, que se encontra representado na figura 3.15.

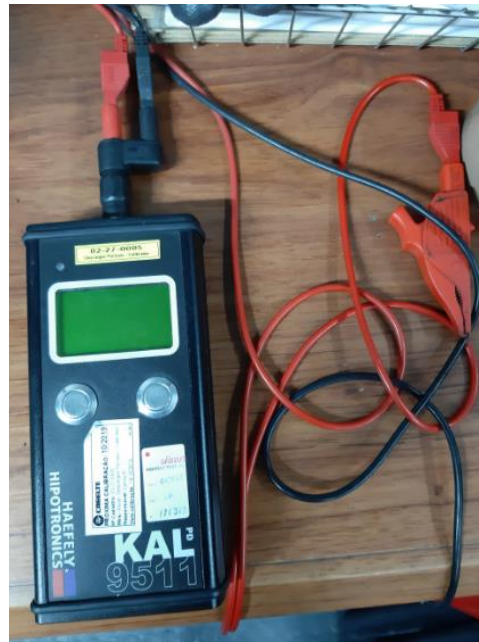


Figura 3.15 - Calibrador, KAL 9511

Para realizar a ligação do cabo ao resto do circuito de ensaio são utilizados terminais fim de cabo. Estes são equipamentos que permitem anular o efeito de coroa, eflúvios e as descargas parciais nas extremidades dos cabos. Podem ser de dois tipos, a água ou a óleo.

Os terminais a óleo, representados na figura 3.16, são normalmente utilizados em cabos de MT, uma vez que para tensões mais elevadas estes terminais deixam de ser viáveis devido a várias perturbações. O laboratório destinado ao ensaio de cabos de MT possui este tipo de terminais.



Figura 3.16 - Terminal de fim de cabo a óleo

Os terminais a água, representados na figura 3.17, podem ser sujeitos a maiores tensões, sendo, por isso, o tipo de terminais utilizado em ensaios a cabos de AT e MAT. Este é o tipo de terminais utilizado no laboratório de AT da CABELTE.

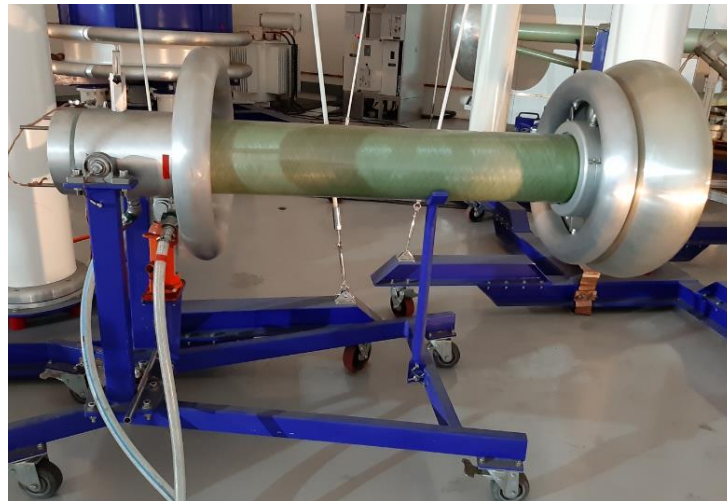


Figura 3.17 - Terminal de fim de cabo a água

Associado aos terminais a água está uma aparelhagem que possui um sistema de controlo e monitorização, tornando-se possível verificar a pressão do circuito hidráulico e a condutividade da água. Esta aparelhagem, representada na figura 3.18, possui um depósito onde o circuito hidráulico está ligado, permitindo assim controlar a circulação da água nos terminais de fim de cabo. Esta aparelhagem possui ainda acoplado um sistema de refrigeração que faz com que a água que circula no circuito hidráulico seja mantida a uma temperatura constante de 20 °C.



Figura 3.18 - Equipamento que controla e monitoriza o circuito hidráulico

Para se realizar a medição da resistência do condutor e do ecrã metálico é utilizado o microhmímetro representado na figura 3.19. Este é munido com duas pinças, sendo cada uma delas colocadas numa extremidade do cabo. A resistência é determinada através da diferença de potencial entre as duas extremidades.



Figura 3.19 - Microhmímetro

Para se realizar o ensaio de rigidez dielétrica à bainha exterior é utilizada uma fonte de corrente contínua, sendo esta capaz de fornecer até 150 kV. Este equipamento está representado na figura 3.20.



Figura 3.20 - Fonte de alimentação DC

Para os ensaios dos ciclos de aquecimento ou sempre que é necessário elevar a temperatura de algum cabo é utilizado um transformador toroidal representado na figura 3.21. Este transformador tem uma potência aparente estipulada de 37,5 kVA e uma corrente de 5 kA.

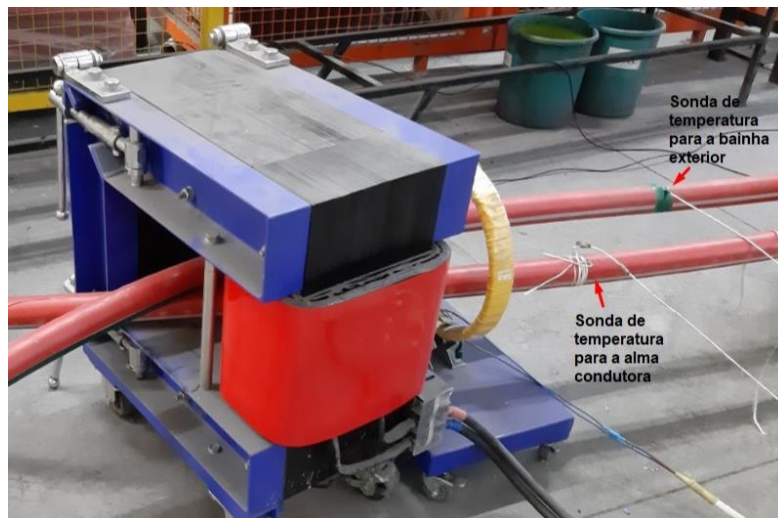


Figura 3.21 - Transformador toroidal e sondas de temperatura utilizadas

Na figura 3.21 também podem ser observadas as sondas de temperatura utilizadas para se medir a temperatura da alma condutora e da bainha exterior durante o ensaio dos ciclos de aquecimento.

O sistema de comando e controlo do aquecimento, representado na figura 3.22, permite determinar a temperatura desejada para o ensaio e a duração dos ciclos de aquecimento. Este equipamento é também responsável pelo controlo automático entre a relação temperatura desejada e corrente injetada no cabo através do transformador toroidal.

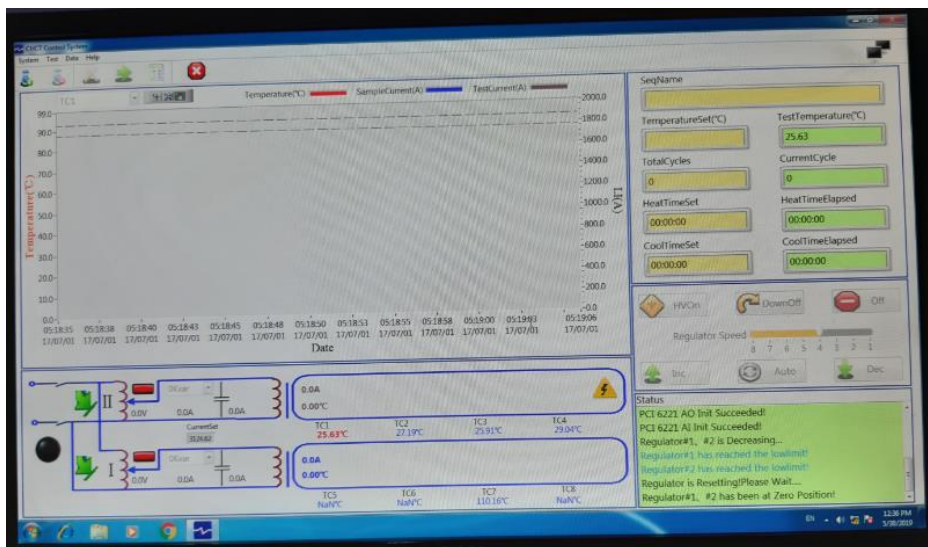


Figura 3.22 - Sistema de comando e controlo do aquecimento

Na figura 3.23, encontra-se representado o condensador padrão utilizado na medição das perdas dielétricas. Este condensador apresenta um valor de referência que é comparado com a capacidade do cabo ensaiado e o valor do fator de perdas dielétricas é obtido pelo equipamento representado na figura 3.24.



Figura 3.23 - Condensador padrão



Figura 3.24 - Medidor das perdas dielétricas

Capítulo 4

Descargas Parciais

Este é um capítulo dedicado às descargas parciais, onde são apresentados os conceitos principais associados às mesmas, o seu princípio físico, os vários tipos de descargas existentes, as suas principais consequências e como se podem calcular.

4.1 - Definição

Para perceber os fenómenos das descargas parciais, é importante perceber a sua definição e o conceito das suas tensões de aparecimento e de extinção.

Segundo a norma IEC 60270 [23], uma descarga parcial consiste numa sucessão de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes, na ordem dos nanossegundos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras sujeitas a um elevado campo elétrico.

Ao valor mais baixo de tensão em que as DP ultrapassam um determinado valor, enquanto a tensão está a ser aumentada gradualmente, chama-se de tensão de aparecimento (*inception voltage*). Por outro lado, quando se desce gradualmente a tensão, até que a intensidade das DP seja inferior a um determinado valor, a tensão é chamada de tensão de extinção (*extinction voltage*).

A isolamento do equipamento em estudo pode consistir num material sólido, líquido, gasoso ou uma combinação dos anteriores, mas, como se pretende focar o estudo nos cabos isolados, sempre que se falar em isolamento sem nenhuma referência, estar-se-á a falar numa isolamento de material sólido.

O termo descarga parcial engloba um alargado grupo de fenómenos, sendo eles [24]:

- Descargas internas - em pequenas cavidades dentro de um material isolante sólido ou líquido. A sucessão destas descargas num dielétrico sólido provoca a formação de canais, sendo estes denominados de arborescências elétricas (*electrical treeing*).
- Descargas superficiais - têm a sua origem em zonas de fronteira de diferentes materiais isolantes.

- Descargas por efeito de coroa - ocorrem quando existe uma distribuição não homogénea do campo elétrico num dielétrico gasoso.

Estes tipos de descargas parciais serão explicados mais detalhadamente no subcapítulo 4.3 e, à exceção das descargas por efeito de coroa, irão influenciar negativamente o tempo de vida da isolamento, sendo estas consequências explicadas no subcapítulo 4.4.

Quando se fala de cabos isolados, o principal tipo de descargas associado é a disrupção elétrica do gás presente em cavidades que se encontram na isolamento ou em pequenas imperfeições que esta possa apresentar. Estas cavidades e imperfeições podem situar-se no interior da isolamento ou entre a isolamento e as camadas semicondutoras [12].

4.2 - Mecanismo das Descargas Parciais

As pequenas cavidades ou fendas que provocam as descargas parciais numa isolamento de um material sólido são preenchidas por ar. Assim, verifica-se que existe uma permissividade relativa diferente neste conjunto. Admitindo que o dielétrico sólido tem a permissividade relativa ϵ_{rd} , que a cavidade tem a permissividade relativa ϵ_{rc} e que os campos elétricos em cada um destes meios são, respetivamente, E_d e E_c , o campo de deslocamento elétrico em cada um dos meios é dada pelas expressões 4.1 e 4.2. A representação destas grandezas encontra-se na figura 4.1.

$$D_d = \epsilon_0 \epsilon_{rd} E_d \quad (4.1)$$

$$D_c = \epsilon_0 \epsilon_{rc} E_c \quad (4.2)$$

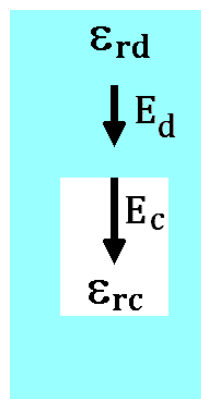


Figura 4.1 - Representação de uma cavidade num dielétrico sólido [25]

Onde:

- D_d - Campo de deslocamento elétrico do dielétrico sólido, em Cm^2
- D_c - Campo de deslocamento elétrico da cavidade, em Cm^2
- ϵ_0 - Constante de permissividade do vazio
- ϵ_{rd} - Permissividade relativa dielétrico sólido
- ϵ_{rc} - Permissividade relativa da cavidade
- E_d - Campo elétrico do dielétrico sólido, em N/C

- E_c - Campo elétrico da cavidade, em N/C

Admitindo que o campo de deslocamento elétrico é igual nos dois meios, isolação e cavidade, tem-se $D_d = D_c$ [25], logo:

$$\frac{E_c}{E_d} = \frac{\epsilon_{rd}}{\epsilon_{rc}} \Leftrightarrow E_c = \frac{\epsilon_{rd}}{\epsilon_{rc}} \times E_d \quad (4.3)$$

A permissividade relativa de um dos dielétricos sólidos utilizados na isolação dos cabos é sempre superior a 2 e a permissividade relativa do ar é aproximadamente 1. Então, pode-se concluir pela expressão 4.3 que o campo elétrico na cavidade será pelo menos duas vezes superior ao campo elétrico na isolação. Então, se a tensão aos terminais da cavidade for superior à tensão de aparecimento do efeito de coroa começarão a ocorrer descargas parciais na cavidade [26].

As descargas parciais também podem ocorrer ao longo da superfície de materiais de isolantes sólidos se o campo elétrico tangencial da superfície for elevado o suficiente para provocar um contornamento ao longo da superfície do isolador. Este fenômeno é mais comum em isoladores de linhas aéreas, especialmente em isoladores envolvidos por ambientes poluídos durante dias mais húmidos [26].

4.3 - Tipos de Descargas Parciais

Tal como já foi mencionado, as DP podem dividir-se em 4 grupos, que são as descargas internas, superficiais, por efeito de coroa e de arborescência elétrica. Na figura 4.2 estão representados cada um destes tipos de descargas. Nos subcapítulos seguintes serão analisados mais detalhadamente cada um destes tipos de descarga.

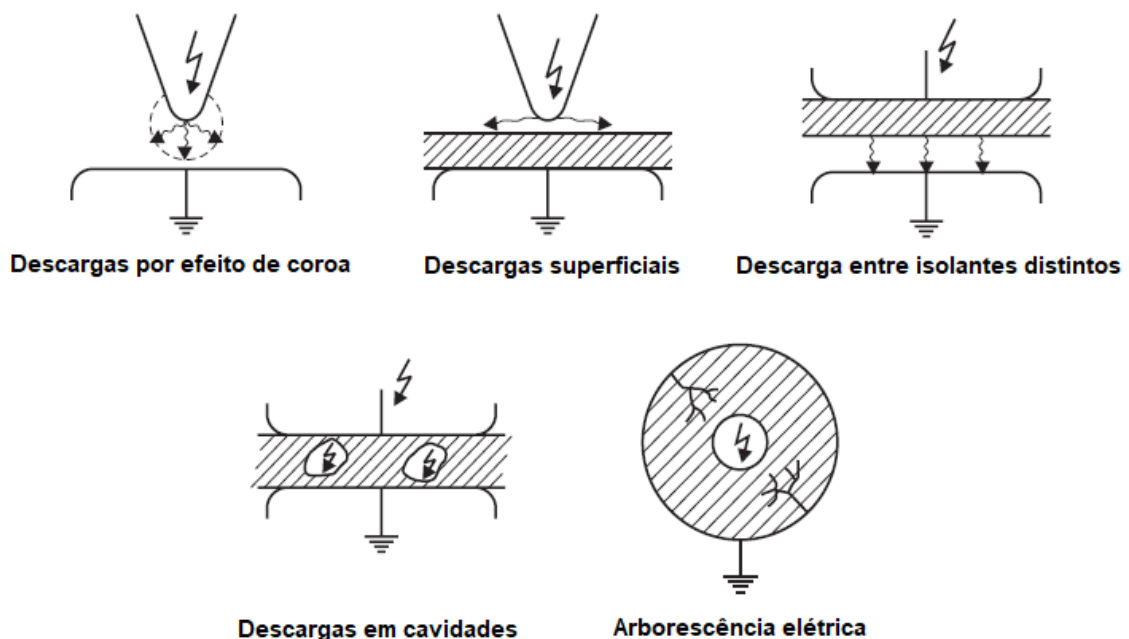


Figura 4.2 - Tipos de descargas parciais [27]

4.3.1. Descargas Internas

As descargas internas têm a sua origem em cavidades ou em falhas na isolação. Estas irregularidades representarão pontos fracos na isolação e estão associadas a uma má fabricação ou ao envelhecimento do material. Quando se fala em pontos fracos quer-se dizer que são os locais mais suscetíveis a ocorrer DP.

Nestas irregularidades, irá haver uma maior concentração de campo elétrico do que na restante isolação. O gás que se encontra no interior da cavidade tem uma rigidez dielétrica inferior à rigidez dielétrica do material da isolação [28], provocando a maior concentração das linhas do campo elétrico.

O impacto sucessivo das DP irá formar canais na isolação, que serão chamados de arborescências elétricas (*electrical treeing*). Ao longo do tempo, estes canais irão aumentar cada vez mais até que se dê a rutura completa do isolamento. É importante mencionar que estes canais serão um local privilegiado para acontecerem eventos de DP, uma vez que são constituídos por ar, aumentando assim a concentração das linhas do campo elétrico nesses locais.

Na figura 4.3 encontra-se representada a variação da tensão na cavidade quando ocorrem várias descargas sucessivas. A tensão aplicada ao objeto de ensaio encontra-se representada pela senoide V_a e a senoide a tracejado, V_c , seria a tensão na cavidade se não houvesse DP. Quando a tensão na cavidade atinge V^+ , que é a tensão de rutura de gás dentro da cavidade, a descarga ocorre e a tensão decresce até que a descarga se extinga. Depois a tensão na cavidade torna a subir até atingir V^+ e causa uma nova descarga. Assim, podem ocorrer várias descargas durante a parte ascendente da tensão aplicada. O mesmo acontece para a parte descendente da onda de tensão.

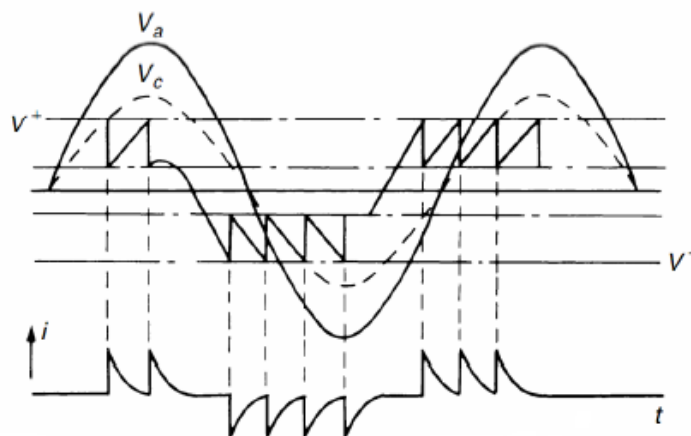


Figura 4.3 - Variação da tensão na cavidade quando ocorre o fenómeno das descargas parciais [29]

4.3.2. Descargas Superficiais

Num ambiente húmido e poluído podem-se formar camadas de poluente na isolação de determinado equipamento. Estas camadas permitirão a circulação de uma corrente de fugas na superfície do isolador. Essa corrente produzirá calor na superfície e gerará evaporação que causará uma rutura física na camada poluente, ou seja, formam-se pequenas brechas nessa camada.

Estas correntes criarão diferenças de potencial sobre as brechas da camada de poluentes e causando pequenas descargas. Este processo agravar-se-á com o tempo e, eventualmente, levará à falha completa da isolação. A este fenómeno é dado o nome de descargas superficiais.

Na figura 4.4 estão representadas duas situações onde se verifica a degradação da isolação provocada por descargas superficiais.

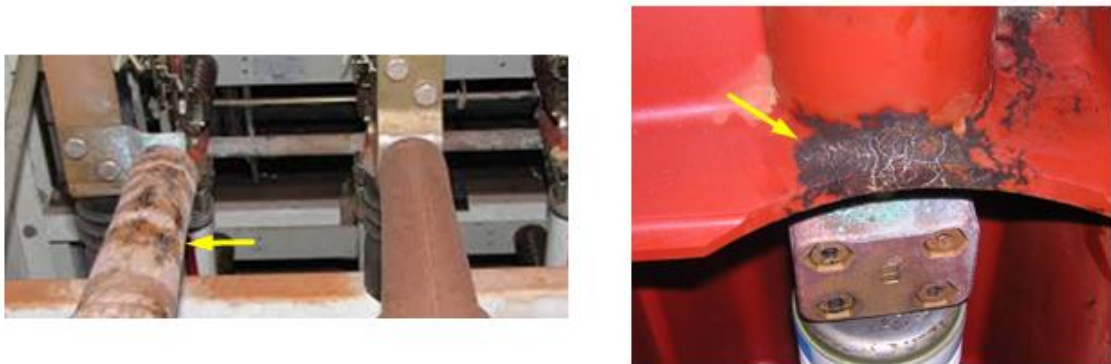


Figura 4.4 - Degradação da isolação causada pelas descargas superficiais [28]

4.3.3. Descargas Por Efeito de Coroa

A descarga por efeito de coroa ocorre quando o gradiente de tensão excede um valor crítico em locais que estão sujeitos a uma tensão elevada e a uma grande concentração de campo elétrico. O efeito de coroa é produzido pela ionização do ar em torno de um condutor, manifestando-se através de uma luz roxa devido à ocorrência de várias microdescargas [28].

Este tipo de descarga parcial é mais comum em isoladores e em condutores nus, ou seja, em equipamentos em que a isolação é composta por um material gasoso. Na figura 4.5 encontra-se representado este tipo de descargas em isoladores.

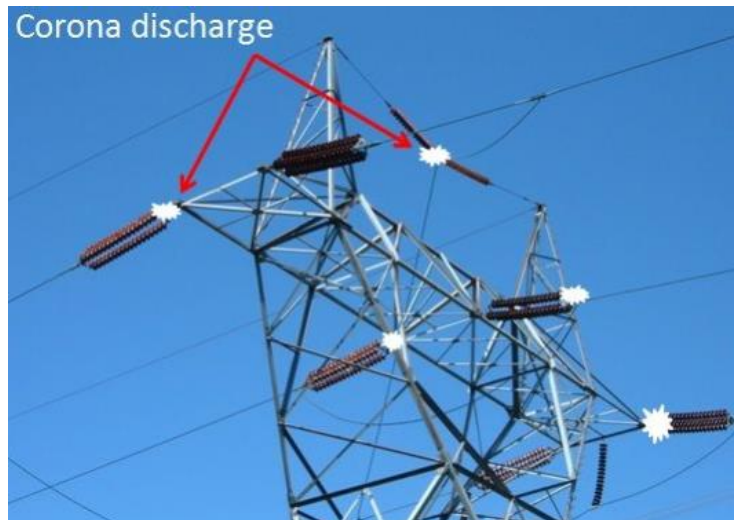


Figura 4.5 - Descarga por efeito de coroa visível em isoladores [30]

4.4 - Consequências das Descargas Parciais

Tal como já foi referido várias vezes ao longo deste documento, depois de iniciada a atividade das DP num material isolante sólido, este sofrerá uma degradação progressiva e irreversível das suas propriedades mecânicas e químicas até que ocorra a sua rutura elétrica. Esta degradação progressiva forma canais parcialmente condutores bastante ramificados, ou seja, cria arborescências elétricas. A transformação química do isolante tende a aumentar a sua condutividade elétrica nas zonas em redor das cavidades [31]. Isso aumenta a concentração de campo elétrico na cavidade, acelerando a sua falha.

As DP dissipam uma pequena quantidade de energia sob a forma de calor, som e luz. Este calor libertado provoca a degradação térmica do isolamento. Embora este aquecimento seja pouco considerável em equipamentos de AT de corrente contínua ou à frequência industrial, é um fator bastante significativo quando se trata de equipamentos de elevada frequência.

Nas figuras 4.6 e 4.7 está representado o comportamento destrutivo das DP na isolação de um cabo isolado e de uma máquina elétrica rotativa, respetivamente.

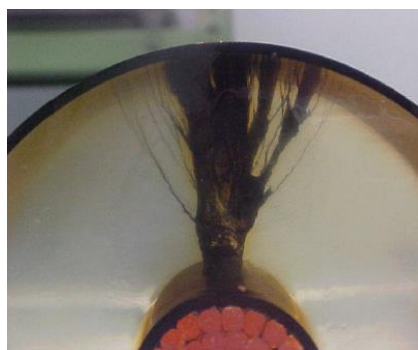


Figura 4.6 - Arborescências elétricas provocadas pelas descargas parciais numa isolação de um cabo isolado [32]



Figura 4.7 - Falha na isolação dos enrolamentos de uma máquina elétrica rotativa [33]

As DP geralmente podem ser prevenidas através de um bom projeto ao nível do isolamento e através de uma seleção de material cuidadosa. Em equipamentos críticos de AT, são utilizados equipamentos de detecção de DP *online* de modo a garantir a integridade do isolamento depois do seu fabrico, bem como durante a sua vida útil. A prevenção e a detecção de DP são essenciais para garantir a operação confiável e de longo prazo dos equipamentos de AT usados pelas concessionárias de energia elétrica.

4.5 - Representação das Descargas Parciais

Com o objetivo de se calcular um valor estimado do nível de DP, utiliza-se o esquema da figura 4.8 para retratar de uma maneira simplificada um defeito presente na isolação e na superfície do cabo. Neste esquema o condensador *a* representa a capacidade da parte da isolação sem nenhum problema, o condensador *b* representa a capacidade da camada dielétrica em série com o defeito e o condensador *c* representa a capacidade da cavidade gasosa ou da superfície onde ocorrem as descargas.

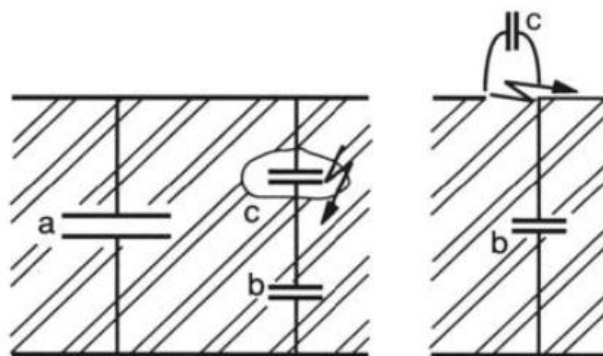


Figura 4.8 - Esquema equivalente de descargas internas e superficiais [34]

Como o próprio defeito não pode ser medido, pois não sabemos onde se encontra nem as suas dimensões, tem de se medir a variação da carga provocada pela DP. Então é utilizada uma impedância de medição, que permitirá obter esta variação de carga.

A variação de carga medida, q , e a variação de carga real, q_1 , são dadas pelas expressões 4.4 e 4.5, respetivamente.

$$q = b \times \Delta V \quad (4.4)$$

$$q_1 = c \times \Delta V \quad (4.5)$$

Onde ΔV simboliza a queda de tensão no defeito provocada pela DP (figura 4.9).

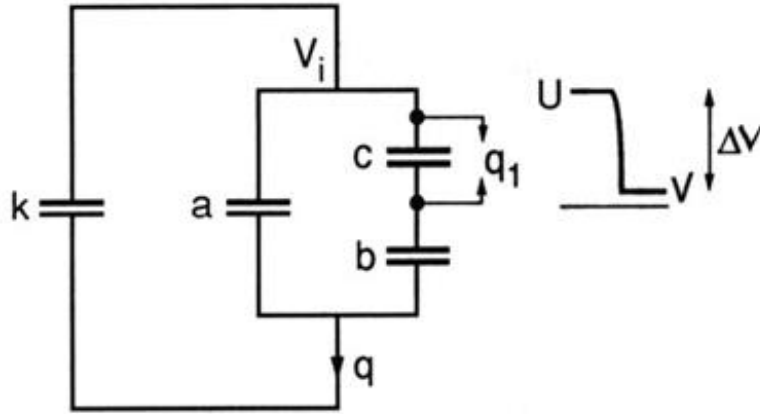


Figura 4.9 - Circuito equivalente de uma descarga parcial num cabo [34]

Como normalmente a capacidade c é muito maior do que a capacidade b , a magnitude da carga medida associada à DP é muito menor do que a sua verdadeira magnitude [34]. Embora a relação entre estas duas capacidades não seja conhecida, este método continua a ser válido devido a duas razões.

A primeira razão está associada à energia dissipada durante a DP, que será denominada por p , podendo ser relacionada com a magnitude da carga da DP e com a tensão de aparecimento, V_i .

Quando ocorre uma DP, existe uma queda de tensão de ΔV no condensador c , diminuindo a sua tensão para V . Isto provoca um aumento da tensão de ΔV no condensador b , sendo esta variação de carga obtida pela expressão 4.6.

$$q = b \times \Delta V \quad (4.6)$$

A energia dissipada durante a DP é calculada através da diferença da energia antes e depois de ocorrer a DP e é dada pela expressão 4.7.

$$p = \frac{1}{2} c U^2 - \frac{1}{2} c V^2 = \frac{1}{2} c (U^2 - V^2) = \frac{1}{2} c (U - V)(U + V) = \frac{1}{2} c \Delta V (U + V) \quad (4.7)$$

Considerando que $(U+V) \approx U$ e que $c \gg b$, então o valor de U é dado pela expressão 4.8.

$$U = \frac{b}{b+c} V_i \approx \frac{b}{c} V_i \quad (4.8)$$

Utilizando as expressões 4.6 e 4.8 pode-se obter a expressão 4.9 que expressa o valor da energia dissipada durante uma DP através da tensão de aparecimento e da variação da carga no condensador b .

$$p \approx \frac{1}{2} b \Delta V V_i = \frac{1}{2} q V_i \quad (4.9)$$

Assim, pode concluir-se que cabos com a mesma tensão nominal possuem, habitualmente, tensões de aparecimento da mesma ordem de grandeza, sendo os valores das descargas comparáveis [34].5

A segunda razão que valida este método está relacionada com o volume ocupado pela descarga. De seguida irá explicar-se como este volume pode ser calculado.

O valor da capacidade do condensador b da expressão 4.6 pode ser obtido pela expressão 4.10.

$$b \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (4.10)$$

Onde S representa a secção da base da cavidade e d representa a espessura da isolação, tal como se pode observar na figura 4.10.

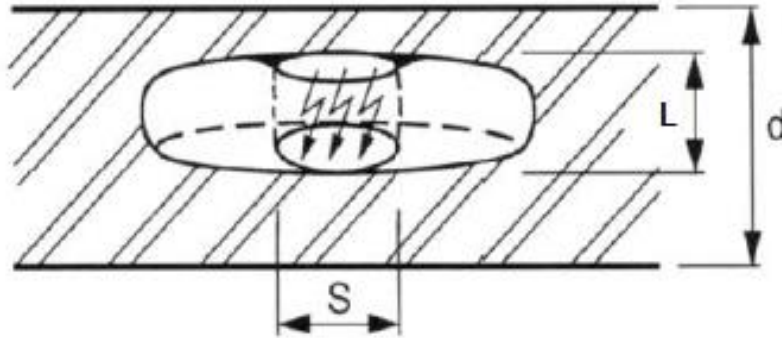


Figura 4.10 - Volume ocupado por uma cavidade na isolação [34]

Assim, o valor da carga da DP poderá ser calculado através da expressão 4.11.

$$q \approx \epsilon_0 \epsilon_r S \Delta V \frac{1}{d} \quad (4.11)$$

Pode concluir-se que o valor da DP é diretamente proporcional ao volume da cavidade.

Neste capítulo conclui-se que a medida da carga aparente das descargas parciais é um bom indicador da energia que se dissipa durante uma DP e do respetivo volume.

Capítulo 5

Medição e Localização de Descargas Parciais

A medição do nível de DP é de elevada importância, devido à possibilidade de esta realizar um diagnóstico do estado da isolação de um cabo isolado ou de um transformador, de uma maneira não destrutiva ou invasiva.

Esta pode ser realizada em sistemas *offline* ou *online*, nos quais são utilizados equipamentos e métodos de medição diferentes. Os sistemas *offline* são os que não se encontram energizados antes da realização do ensaio e são realizados em ambiente fabril para verificar a qualidade de determinado equipamento. Os ensaios *online* são realizados a equipamentos que se encontram no seu período de funcionamento normal, de modo a avaliar o estado atual da isolação do equipamento em questão e a prever possíveis falhas que poderão ocorrer. Este trabalho apenas abordará os tipos de medição *offline*.

Se, durante esta medição, for obtido um nível mais elevado do que os valores indicados nas normas em vigor, então será de todo o interesse do fabricante do cabo localizar as zonas que estão a originar este valor e intervir de modo a reduzi-lo. Existem métodos que permitem localizar as zonas mais danificadas da isolação de um cabo e que serão abordados neste capítulo. Todos os ensaios de medição das DP realizados devem cumprir a norma IEC 60270 [23], que indica todas as regras que estes ensaios devem cumprir.

Este capítulo falará do princípio da medição do nível de DP, como esta se realiza e dos principais tipos de instrumentos de medição. Serão, também, indicados os tipos de medição de DP mais utilizados, detalhando-se mais os que são utilizados nos cabos, os métodos que permitem a localização das zonas mais afetadas pelas DP e a importância da realização da calibração do sistema.

5.1 - Tipos de Detecção

A deteção e medida do nível de DP baseia-se nas transformações de energia que ocorrem durante uma descarga. Estas trocas podem manifestar-se através de impulsos de corrente, perdas dielétricas, radiação eletromagnética, som, aumento de pressão ou reações químicas. Assim, a deteção e medição do nível de DP deve basear-se na observação dos fenómenos mencionados.

Esta deteção pode ser dividida em deteção por métodos elétricos e não elétricos, sendo seguidamente explicada cada um destes métodos.

5.1.1. Métodos Não Elétricos

Os métodos de deteção de DP não elétricos baseiam-se em métodos acústicos, óticos ou químicos. Normalmente este tipo de métodos não são capazes de fornecer um valor quantitativo para esta medida. Contudo são bastante utilizados para detetar e localizar a origem destas descargas.

A deteção utilizando métodos acústicos baseia-se na captação de uma onda sonora causada pela expansão de gases no local da descarga. Este sinal sonoro é detetado por sensores piezoelétricos. A principal gama de frequências utilizada para a realização destas medidas é o intervalo entre os 20 kHz e os 100 kHz [35]. Este método é mais utilizado para localizar a origem de eventos de DP.

A deteção através de métodos visuais é realizada para detetar descargas por efeito de coroa e baseia-se na emissão de luz pelas zonas mais afetadas do objeto de ensaio. É realizada em salas escuras e depois dos olhos se habituarem à luminosidade da sala. Esta deteção encontra-se limitada à localização de descargas em meios transparentes, por isso não é muito utilizada.

A deteção através de reações químicas é aplicável em isolações compostas por óleo ou gás. Esta deteção consiste na análise da decomposição de produtos nesses meios. Esta decomposição permite estimar a degradação da isolamento, tendo esta degradação sido provocada por DP.

5.1.2. Métodos Elétricos

Os métodos elétricos de deteção de DP são os mais utilizados nos dias de hoje. Estes visam separar os impulsos de corrente associados às DP de quaisquer outros fenómenos. Estes métodos encontram-se bem definidos nas normas europeias e representam o tipo de método que garante maior rigor na determinação da magnitude da carga aparente.

A partir daqui todos os tipos de medição mencionados são métodos elétricos, os quais serão explicados nos subcapítulos seguintes.

5.2 - Princípio da Medição

Atualmente, são utilizados preferencialmente sistemas digitais para a medida do nível de DP, uma vez que são os que permitem realizar esta medição com maior precisão e rigor. Contudo, para uma melhor compreensão de como funciona esta medição, inicialmente será explicado como se realizam estas medições através de sistemas analógicos e apenas depois através de sistemas digitais.

Neste capítulo também serão apresentadas algumas definições de grandezas importantes relacionadas com a medição do nível de DP.

5.2.1. Grandezas de Medição Importantes

As principais grandezas relacionadas com a medição do nível de DP são [23]:

- Impedância de transferência, $Z(f)$ - é a razão entre a amplitude da tensão de saída e a amplitude da corrente de entrada, que depende da frequência, quando a entrada é uma onda sinusoidal.
- Limites inferior e superior de frequência, f_1 e f_2 - são os limites de frequência em que a impedância de transferência tem uma perda de 6 dB.
- Frequência central, f_m - é a definida pela expressão 5.1.

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (5.1)$$

- Largura de banda, Δf - é definida pela expressão 5.2 e define a gama de frequências dos sinais de DP que são medidos pelo aparelho de medição.

$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (5.2)$$

- Taxa de repetição, n - é a razão entre o número total de sinais de DP registados num determinado intervalo de tempo e a duração desse intervalo de tempo.
- Erro de sobreposição - é provocado pela sobreposição dos sinais de saída quando o intervalo entre sinais de entrada é menor do que a duração de um sinal de saída. Estes erros podem ser aditivos ou subtrativos, dependendo da taxa de repetição dos sinais de entrada.
- Período de resolução do sinal, T_r - é o intervalo de tempo mais pequeno entre dois sinais de entrada consecutivos de curta duração, da mesma forma, polaridade e magnitude de carga e cujo valor de pico não varia mais de 10% desse sinal. Esta grandeza é inversamente proporcional à largura de banda do sistema de medição e indica a capacidade deste sistema detetar sucessivos eventos de DP.
- Ruído de fundo - sinais detetados durante a medição do nível de DP que não têm origem no objeto de ensaio
- Erro de integração - é um erro na medição da carga aparente, que ocorre quando o limite superior de frequência de um sinal de uma DP é inferior à maior

frequência de corte num sistema de medição de banda larga ou é inferior à frequência central num sistema de medição de banda estreita.

Os sistemas de medição de DP que determinam a magnitude da carga aparente em cada instante são sistemas passa-banda, que atenuam os sinais fora do intervalo de integração selecionado para o instrumento de medida.

Segundo a norma IEC 60270 [23], a relação ideal entre a amplitude e a frequência que minimiza os erros de integração de sistemas de banda larga encontra-se representada na figura 5.1. Nesta figura A representa a largura de banda do intervalo de integração, B representa o espectro de frequências do sinal de DP e C representa o espectro de frequências do sinal de calibração.

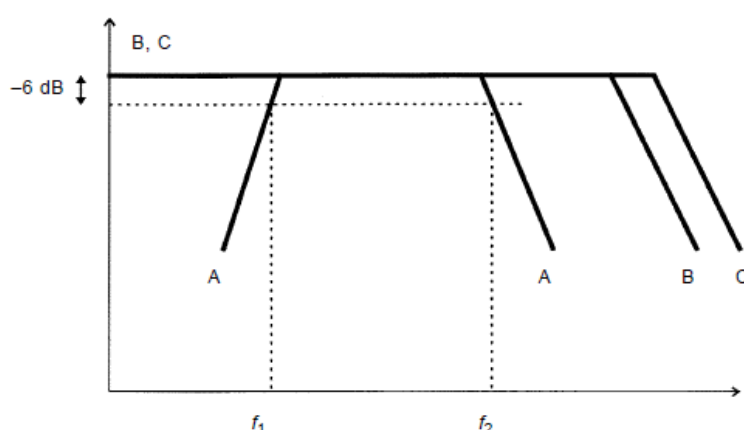


Figura 5.1 - Relação ideal entre a amplitude e a frequência que minimiza os erros de integração [23]

5.2.2. Medição através de Sistemas Analógicos

Os instrumentos de medição do nível de DP que utilizam sistemas analógicos foram os primeiros a serem utilizados para a medida da carga aparente em pC. Até aí, o nível de DP era medido através da Tensão de Radio Interferência (RIV) e era expresso em μV .

O sistema que realiza esta medição é composto por um amplificador, um filtro, um diodo, uma resistência, um condensador e um ponteiro analógico que irá indicar o nível de DP. Este sistema encontra-se representado na figura 5.2.

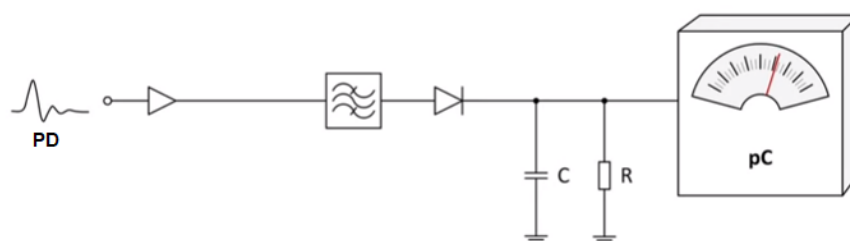


Figura 5.2 - Circuito de medição analógica do nível de descargas parciais [36]

Um sinal de DP de elevada frequência passa pelo amplificador, onde é amplificado e, de seguida, atravessa um filtro de frequência que remove as frequências que não estão associadas às DP, eliminando os sinais que se encontram fora do espectro de frequências definido. Normalmente, estes filtros possuem uma frequência central fixa e uma largura de banda entre os 100 kHz e os 400 kHz [36]. O díodo tem a função de garantir que a energia circula apenas num sentido. A energia associada ao sinal de DP irá carregar o condensador e a queda de tensão no condensador irá mover o ponteiro analógico e indicará o valor do nível de DP correspondente. A resistência tem a função de descarregar o condensador, para que essa queda de tensão se verifique.

O problema deste tipo de medição encontra-se nas elevadas distorções de sinal causadas pelo filtro e pelo ponteiro de medição, resultando em valores pouco sensíveis do nível de DP na ordem das centenas de pC.

5.2.3. Medição através de Sistemas Digitais

Com a evolução da tecnologia, surgiu a necessidade de níveis de DP mais baixos e, consequentemente, instrumentos de medição mais sensíveis à medição destes valores. Assim, surgiram os sistemas de medição de DP digitais, que melhoraram a sensibilidade e a repetibilidade das medidas do nível de DP, ultrapassando facilmente a capacidade de medição da tecnologia anterior.

Os sistemas de medição digitais mais modernos já permitem o processamento em tempo real e síncrono de sinais de DP em vários canais. Isto torna a análise do defeito muito mais eficiente e possibilita a identificação e localização dos tipos de falha presentes no objeto ensaiado.

O esquema de medição destes sistemas encontra-se representado na figura 5.3.

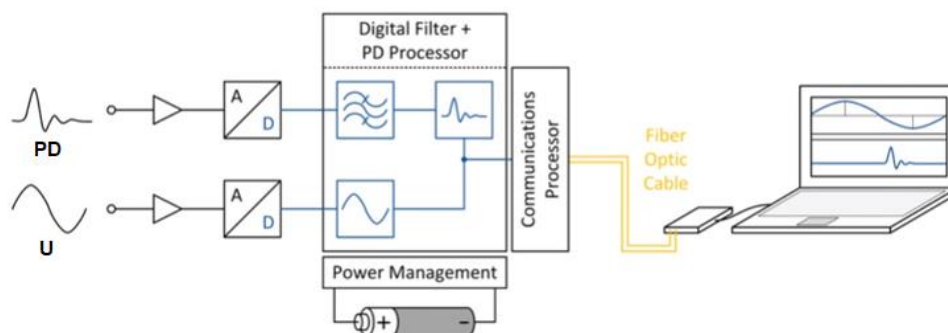


Figura 5.3 - Representação do sistema de medição do nível de descargas parciais através de sistemas digitais [36]

O sinal de DP é amplificado, convertido para um sinal digital através de um conversor analógico-digital e logo a seguir é filtrado. Esta filtragem permite eliminar o ruído e encontra-

se ao critério do operador do sistema, podendo ser escolhido o intervalo de integração mais adequado. Esta liberdade na escolha da filtragem oferecida pelos sistemas de medição de DP permite realizar medições de acordo com várias normas a que o equipamento ensaiado tenha de cumprir sem ser necessário alterar o equipamento de medida. A onda de tensão também é sujeita a um conversor analógico-digital.

A unidade de aquisição, representada pelo filtro e pelo processador PD, é responsável por toda aquisição e pré-processamento de dados. Este pré-processamento permite uma elevada velocidade de medida e uma boa qualidade do sinal adquirido.

O pré-processamento consiste na organização dos pulsos individuais de DP em vetores com quatro parâmetros $[i, q_i, j_i, t_i]$. Neste vetor i representa o número do sinal adquirido, q_i representa o valor da carga aparente do sinal i , j_i representa o ângulo de fase da tensão associada a esse sinal e t_i representa o tempo absoluto de quando ocorreu esse sinal.

A unidade de aquisição encontra-se ligada a um computador que irá fazer o restante processamento da informação, inclusive determinar o valor do nível de DP de cada sinal adquirido. Esta ligação é concretizada através de cabos de fibra ótica que, além de garantir uma elevada qualidade na transmissão do sinal, asseguram a segurança do operador que se encontra a realizar a medida do nível de DP.

Além deste sistema proporcionar uma medição mais sensível e precisa, permite ainda guardar toda a informação relativa às cargas aparentes adquiridas durante a medição, podendo esta informação ser analisada posteriormente. Esta funcionalidade é de grande interesse, uma vez que permite assegurar que o equipamento ensaiado possuía uma determinada qualidade da isolamento depois deste ser ensaiado em ambiente fabril.

5.3 - Circuito de Medição

Para se poder quantificar as várias magnitudes de carga aparente individuais dos sinais de DP, é necessário que o sistema de medição esteja integrado no circuito de teste. Neste subcapítulo, serão apresentados os circuitos utilizados na medição do nível de DP e as principais características que estes devem cumprir.

Os circuitos de medição mais utilizados para a determinação do nível de DP são os representados nas figuras 5.4 e 5.5, segundo a norma IEC 60270 [23]. Na CABELTE, em ambos os laboratórios, é utilizado o circuito da figura 5.4.

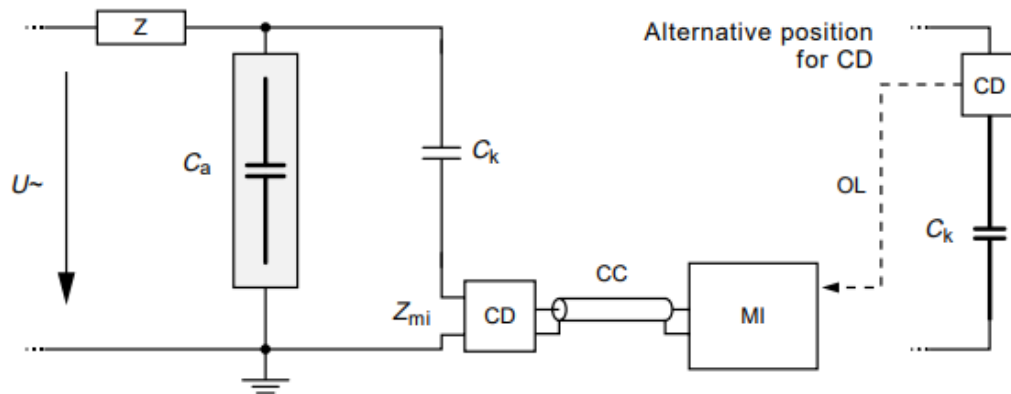


Figura 5.4 - Circuito em que o instrumento de medida está em série com o condensador de acoplamento [23]

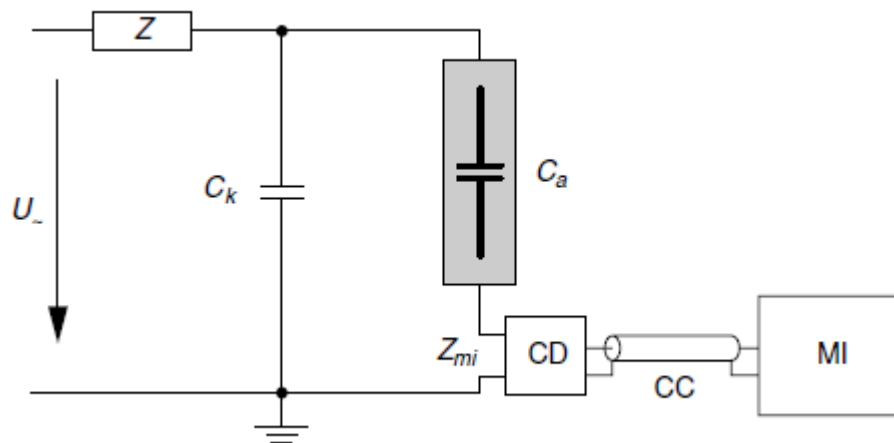


Figura 5.5 - Circuito em que o instrumento de medida está em série com o objeto de ensaio [23]

Nestes circuitos o dispositivo de acoplamento, CD, representa a entrada do sistema de medição e possui uma impedância de entrada, Z_{mi} . Este dispositivo de acoplamento encontra-se ligado ao instrumento de medida, MI, através de um cabo denominado por cabo de conexão, CC. Alternativamente, o dispositivo de acoplamento pode estar ligado ao instrumento de medição através de um cabo de fibra ótica. O objeto de ensaio encontra-se representado por C_a , o condensador de acoplamento por C_k , a tensão de alimentação por $U_{\sim}$ e o filtro por Z .

A principal diferença entre estes dois circuitos reside no local onde se encontra o sistema de medição. Na figura 5.4 o sistema de medida encontra-se em série com o condensador de acoplamento, enquanto que na figura 5.5 o sistema de medida encontra-se em série com o objeto de ensaio. Neste segundo circuito, embora permita uma maior sensibilidade na medição, existe a possibilidade de danificar o sistema de medida se houver alguma falha no objeto de

ensaio [24]. Como estes sistemas de medição são bastante dispendiosos não se pode arriscar perdê-los, por isso utiliza-se preferencialmente o primeiro circuito.

Com base na norma, o circuito deve ter as seguintes características [23]:

- O condensador de acoplamento deve ter uma baixa indutância e deve exibir um nível de DP suficientemente baixo na tensão de ensaio especificada, de modo a não perturbar a medição do nível de DP do objeto de ensaio. Pode ser tolerado um nível mais elevado de DP, se o sistema de medição for capaz de separar as descargas do objeto de ensaio e do condensador de acoplamento e medi-las separadamente;
- A alimentação de AT deve introduzir um nível de perturbação suficientemente baixo, de modo a permitir a medição do nível de DP à tensão de ensaio aplicada;
- As ligações da parte de AT devem introduzir um nível de perturbação suficientemente baixo, de modo a permitir a medição do nível de DP à tensão de ensaio aplicada;
- Uma impedância ou um filtro deve ser colocado na parte AT, para reduzir a perturbação criada pela alimentação.

5.4 - Instrumentos de Medição

Neste subcapítulo são abordados os dois principais tipos de instrumentos utilizados na medida do nível de DP, sendo também referidos os requisitos que eles têm de cumprir segundo as normas em vigor. No final será feita uma comparação entre os dois.

5.4.1. Instrumentos de Banda Larga

Os sistemas de medição de DP com instrumentos de banda larga são caracterizados por possuírem uma impedância de transferência com valores fixos dentro dos limites de frequência, f_1 e f_2 , e com uma atenuação adequada para frequências abaixo de f_1 e acima de f_2 . Segundo a IEC 60270 [23], os valores de f_1 , f_2 e Δf para este tipo de sistema de medição devem ser [23]:

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz}$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$$

A resposta destes instrumentos a um impulso de corrente provocado por uma DP é uma onda de tensão atenuada que é proporcional à carga aparente, como se pode ver pela expressão 5.3 [27]. Esta onda está representada na figura 5.7 b).

$$V_0(s) = \frac{q}{C} e^{-\alpha t} \left[\cos(\beta t) - \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta t) \right] \quad (5.3)$$

Este sinal bem atenuado faz com que o período de resolução do sinal seja baixo, diminuindo, assim, os erros de sobreposição, nos casos em que o tempo entre eventos de DP seja bastante curto. A carga aparente e a polaridade do impulso da DP são determinadas a partir desta resposta. O período de resolução do sinal destes instrumentos encontra-se, normalmente, entre os 5 e os 20 μs .

Os dispositivos de acoplamento, representados por CD nas figuras 5.4 e 5.5, são sistemas passivos passa-alto. Porém, a maior parte do tempo, estes dispositivos comportam-se como um circuito RLC ressonante em paralelo, como se pode ver na figura 5.6, sendo este a impedância de medida deste sistema.

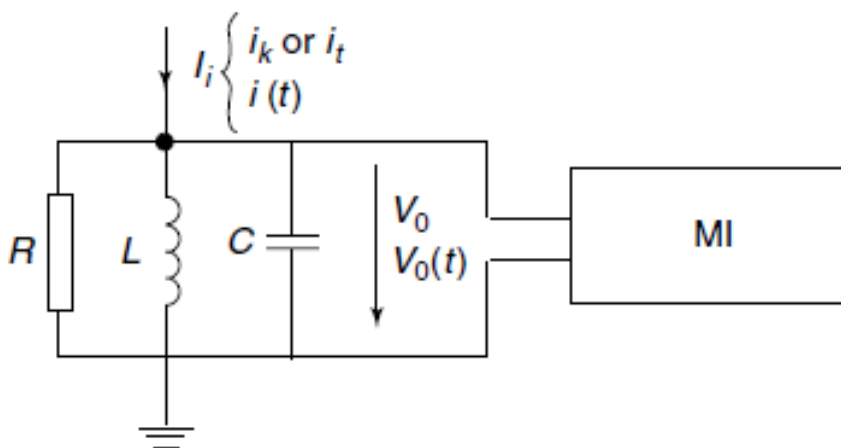


Figura 5.6 - Circuito equivalente da impedância de medida [24]

Esta impedância de medida proporciona duas vantagens. A primeira vantagem é que, como é um circuito ressonante, atenua as correntes de frequências na vizinhança da sua frequência de ressonância. A segunda vantagem é a possibilidade de utilização deste circuito como um dispositivo de integração, que irá integrar as correntes das DP.

Depois de passar pela impedância de medida, o sinal da DP chega ao instrumento de medida. Este instrumento permite determinar a magnitude dos sinais das DP individuais, que são determinadas pela comparação do sinal obtido com o sinal injetado no momento da calibração.

No computador ligado ao sistema de medição, é possível observar-se o padrão das DP. Os especialistas em DP conseguem identificar a origem da mesma, uma vez que cada tipo de defeito provoca um padrão característico.

É importante salientar que a resposta de um instrumento de medição de DP de banda larga não se trata da forma original do impulso de corrente da DP. Este processo de transformação da onda encontra-se representado na figura 5.7, onde a) representa a corrente alternada de entrada sobreposta com impulsos de DP e b) e c) representam as tensões adquiridas pelo sistema de medição antes e depois de serem amplificadas, respetivamente. O amplificador tem a função de tornar o sistema mais sensível.

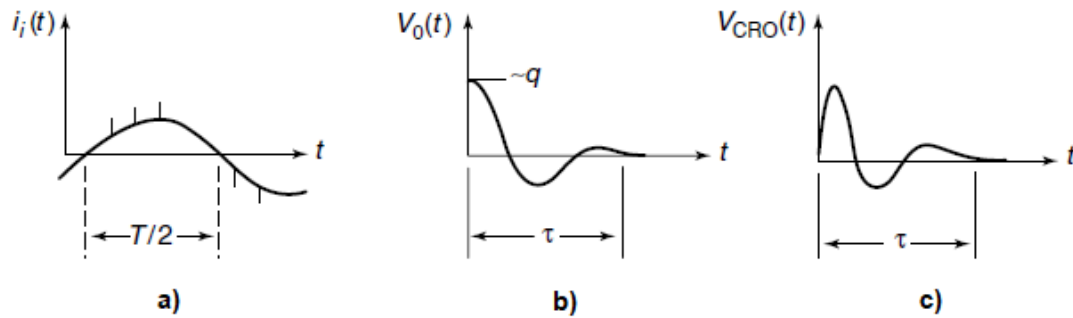


Figura 5.7 - Grandezas associadas ao sistema de medição de banda larga [24]

5.4.2. Instrumentos de Banda Estreita

Os sistemas de medição de DP com instrumentos de banda estreita são caracterizados por possuírem uma pequena largura de banda e uma frequência central que pode variar num grande intervalo de frequências. Segundo a IEC 60270 [23], os valores entre os quais a largura de banda e a frequência central são [23]:

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$$

Nestes sistemas, o dispositivo de acoplamento é composto pelo paralelo de uma resistência e de uma indutância, atribuindo-se o nome de impedância de medida. Este tipo de instrumentos, ao contrário dos instrumentos de banda larga, não realizam a integração da corrente de entrada. Na figura 5.8 pode-se observar o circuito de um sistema com um instrumento de banda estreita.

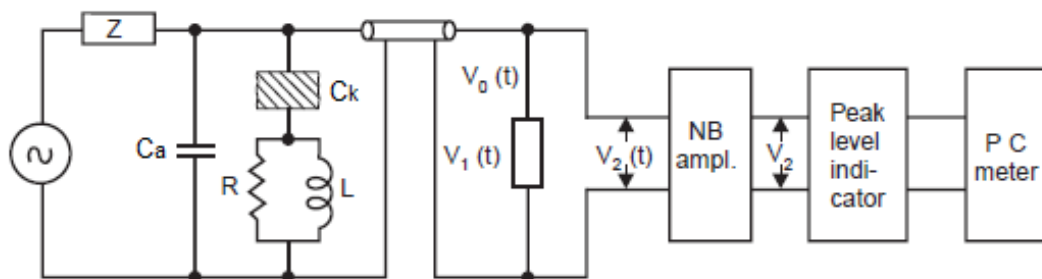


Figura 5.8 - Circuito equivalente de um sistema de medição de descargas parciais que utiliza um instrumento de banda estreita [27]

A impedância de medida funciona como um filtro passa-alto. A corrente à frequência industrial e os seus harmónicos são atenuados e apenas os impulsos de corrente das DP, que são transformados em impulsos de tensão devido à ação da resistência da impedância de medida, chegam à entrada do amplificador. Depois de passar pelo amplificador, o sinal de saída depende da função de transferência utilizada pelo instrumento de medição.

Existem duas desvantagens na utilização de instrumentos de banda estreita [27]:

- Não se consegue determinar a polaridade do impulso de entrada;
- A duração da sua resposta é longa, o que pode provocar um maior erro de sobreposição se ocorrerem vários eventos seguidos de DP.

Os instrumentos de banda estreita utilizam medidores de tensão de interferência de rádio (RIV) para medir a carga aparente. O principal componente de um medidor RIV é um voltímetro seletivo de elevada sensibilidade que pode ser ajustado para o intervalo de frequências onde se pretende efetuar a medição. Esta seletividade pode ser alcançada através da utilização de um filtro passa-banda estreito. A frequência de banda central deve ser continuamente variável e deve ser tratada como uma frequência de ressonância, como é sugerido na norma relativa à medição das DP.

5.4.3. Comparação entre os Dois Tipos de Instrumentos

De maneira a resumir e comparar as principais características dos dois tipos de instrumentos de medição apresenta-se a tabela 3.

Tabela 3 - Comparação das principais características dos dois tipos de instrumentos de medição de descargas parciais [27]

Característica	Banda Larga	Banda Estreita
Largura de banda	$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$	$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$
Frequência central	É fixa e pode possuir valores entre os 65 kHz e os 300 kHz	É variável e pode ir dos 50 kHz até aos 1000 kHz
Período de resolução do sinal	Curto de, aproximadamente, 15 μs	Grande de, aproximadamente, 220 μs
Polaridade do impulso	Detetável	Não detetável
Sensibilidade ao ruído	Elevada	Baixa devido às medições seletivas conseguidas através da variação da frequência central
Largura máxima aceitável do impulso	Aproximadamente 1 μs	Depende da frequência central
Grandeza da medição realizada	Mede diretamente em pC	Mede diretamente em pC

5.5 - Localização da Origem das Descargas Parciais

Quando existe algum defeito no cabo que provoque um elevado nível de DP, o fabricante tem todo o interesse em encontrar esse defeito e tentar repará-lo. Daí surge a importância da localização da origem do defeito.

Esta localização pode ser realizada através do método de refletometria no domínio do tempo, *Time Domain Reflectometry* (TDR) ou do método de medições síncronas de extremidade dupla, *Dual-End Measurement*.

O método de medições síncronas de extremidade dupla utiliza duas unidades de medida que estão localizadas nas duas extremidades do cabo. Como estas unidades estão localizadas em diferentes posições do circuito de teste, ambas as unidades detetarão o sinal proveniente de uma fonte de DP em momentos diferentes. Mas como elas operam de modo completamente sincronizado, essa diferença de tempo é utilizada para determinar a posição da origem da DP. As medições utilizando este método são mais precisas do que as medições que utilizam o TDR e não requerem nenhuma distância mínima de deteção.

O método TDR utiliza apenas uma unidade de medida e explora o facto de os sinais de DP de alta frequência se refletirem nas conexões de alta tensão que se encontram em aberto. Os impulsos refletidos são relacionados com os impulsos diretos e a diferença de tempo entre os dois é usada para determinar a posição das falhas que o cabo possua.

Este método baseia-se na emissão de uma onda na extremidade do cabo que está a ser alimentada por tensão. Esta onda será parcialmente refletida na parte defeituosa do cabo e, com base na velocidade de propagação dessa onda, é determinado o local do defeito que está a provocar o elevado nível de DP.

Para se localizar o defeito injeta-se uma onda no início do cabo, representado pelo ponto A. Quando esta atinge a zona do defeito, uma parte da onda continua a propagar-se em direção à outra extremidade do cabo, ponto B, e a outra parte volta para o ponto A. Na figura 5.9 encontra-se representado o circuito em causa, simbolizando-se em B o equipamento detetor das ondas emitidas; e na figura 5.10 representa-se o trajeto dessas ondas. Quando a onda passa pela cavidade presente na isolação, a magnitude de cada uma das ondas propagadas diminui para metade da magnitude inicial.

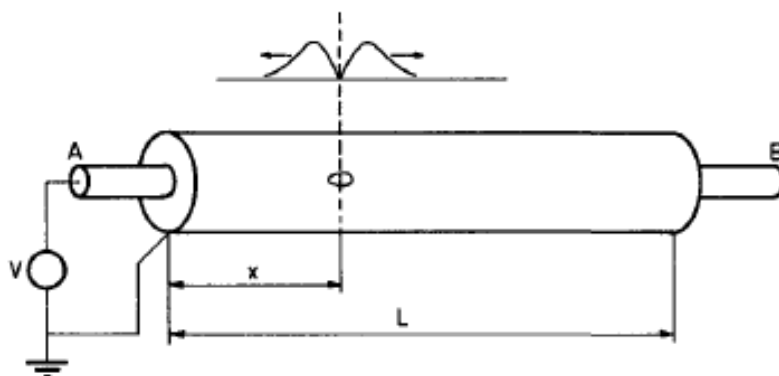


Figura 5.9 - Localização da origem das descargas parciais no cabo [37]

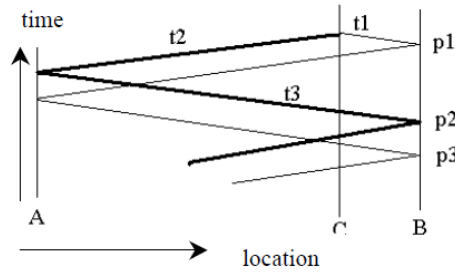


Figura 5.10 - Representação da influência da imperfeição do cabo no trajeto das ondas emitidas baseada no método de refletometria no domínio do tempo [38]

A velocidade a que a onda se propaga é dada pela expressão 5.4.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.4)$$

Os tempos de chegada de cada uma destas ondas serão t_1 e t_2 onde t_1 representa a onda que viajou diretamente para o final do cabo e t_2 representa a onda que foi refletida na imperfeição. Para o cálculo destes tempos tem-se em consideração a distância percorrida por cada uma das ondas e a sua velocidade de propagação e são calculados pelas expressões 5.5 e 5.6 [34].

$$t_1 = \frac{l - x}{v} \quad (5.5)$$

$$t_2 = \frac{l + x}{v} \quad (5.6)$$

Onde l representa o comprimento total do cabo e x representa a distância do local onde é injetada a onda até ao local de defeito.

Calculando a diferença dos tempos de chegada de cada onda, representado por T , obtém-se o valor da localização do defeito, x , na expressão 5.7 [34].

$$T = \frac{2x}{v} \Leftrightarrow x = \frac{vT}{2} \quad (5.7)$$

Como estas medições podem ser feitas apenas de um lado do cabo, este método torna-se bastante conveniente a nível económico e prático para determinar a localização das DP. Ao aplicar o TDR deve-se ter em consideração que, para cabos mais longos (com mais de 4 km [39]) a atenuação da onda emitida será considerável, dificultando assim a localização correta da origem das DP.

Os componentes de alta frequência são atenuados à medida que se propagam ao longo do cabo. Esta atenuação em cabos de energia tem como origem:

- As perdas de energia no dielétrico.
- As perdas de energia nas camadas semicondutoras.

Esta atenuação provoca uma diminuição da amplitude e um aumento da largura da onda enviada. Portanto, os tempos de chegada são determinados com menos precisão e a precisão da localização da DP também diminui. Logo, pode concluir-se que este método é mais eficiente em cabos com distâncias mais curtas.

5.5.1. Reparação do Defeito

Após a localização do defeito realizada pelo instrumento de medida das DP, o defeito tem de ser encontrado e depois submetido a um processo de reparação. Em cabos de MT e AT, os defeitos presentes nas camadas semicondutoras ou na isolação são normalmente detetados depois da blindagem do cabo. Tal como já foi mencionado, na CABELTE os cabos também são ensaiados depois de ser aplicada a blindagem, para que seja mais fácil detetar e corrigir algum defeito nestas camadas mais interiores.

Inicialmente desenrola-se o cabo até ao comprimento indicado pelo instrumento de medida de DP e tateia-se o mesmo nessa zona, com o objetivo de detetar alguma protuberância que possa estar a provocar o defeito, permitindo uma deteção mais rápida e menos trabalhosa. Na maior parte das vezes não se consegue encontrar o defeito através de tatear o cabo, por isso tem de se tirar a blindagem nas zonas próximas do local indicado pelo instrumento de medida das DP. É importante mencionar que o método de localização utilizado, TDR, não é muito preciso, podendo o defeito estar situado 5 m antes ou depois do local indicado pelo instrumento, por isso é importante procurar pelo defeito nesses comprimentos do cabo.

Depois de localizado o defeito, dependendo da sua localização, são realizados diferentes tipos de reparação. Quando o defeito se encontra numa parte mais interna da isolação ou na camada semicondutora interior é necessário descascar o cabo todo até à alma condutora e realizar-se novamente a extrusão das camadas semicondutoras e da isolação e aplicar novamente a blindagem. Quando o defeito se encontra numa parte mais superficial da isolação ou no semicondutor exterior, este pode ser facilmente reparado sem obrigar o cabo a ser submetido a todo este processo de extrusão. Esta reparação consiste no alisamento da superfície do defeito, removendo-se toda a camada de semicondutor exterior da parte defeituosa. Depois aplica-se um verniz composto pelo mesmo material do semicondutor exterior, que normalmente é PE, de modo a ficar uma camada fina para que esse verniz não estale quando o cabo dobrar. Depois do verniz secar coloca-se uma fita a envolver a zona reparada para a proteger.

Depois do defeito ser reparado, é enrolada helicoidalmente uma fita de cobre na parte do cabo onde esta blindagem foi retirada, com o objetivo de garantir a continuidade da mesma e, consequentemente, garantir a proteção elétrica do cabo durante o ensaio.

Estando concluída a colocação da fita de cobre, o cabo é ensaiado novamente para se verificar se existe mais algum defeito, isto porque a localização da origem dos defeitos no cabo apenas localiza o maior defeito. Ou seja, se existirem dois defeitos na isolação do cabo, apenas é indicado o maior defeito e o segundo defeito só é detetado depois do primeiro ser reparado.

Se não houver mais nenhum defeito depois do cabo ser novamente ensaiado, então é retirada a sua blindagem provisória que foi colocada e torna-se novamente a blindá-lo completamente, para garantir que o cabo fica com uma proteção elétrica adequada. Se por outro lado for detetado mais algum defeito durante o ensaio, então todo este processo de reparação é repetido.

5.6 - Calibração do Instrumento de Medida

A calibração de um instrumento que meça o nível de DP é fundamental para se obter um valor o mais verdadeiro possível desta grandeza. Para tal, esta determina o fator de escala, k , que o sistema de medição irá utilizar para determinar o valor da carga aparente do objeto de ensaio. Esta calibração deve ser efetuada sempre que ocorrer uma alteração, como por exemplo a alteração do cabo que está a ser ensaiado, ou sempre que se altere o intervalo de integração do filtro de medição.

A calibração de um instrumento que realize a medição da carga aparente, q , é realizada através da injeção de impulsos de corrente de curta duração de uma carga de magnitude conhecida, q_0 , aos terminais do objeto de ensaio [23] representado por C_a na figura 5.11. Estes impulsos são produzidos por um gerador que fornece uma onda de tensão quadrada com amplitude U_0 e encontra-se representada por G na figura 5.11. Se a tensão U_0 se mantiver estável e a sua amplitude for conhecida, são injetados repetidamente impulsos de carga dados pela expressão 5.8.

$$q_0 = U_0 C_0 \quad (5.8)$$

O gerador de tensão produz uma forma de onda com um tempo de frente curto. Isto permite-lhe produzir impulsos de corrente que se encontram dentro da largura de banda que o equipamento deteta, evitando assim erros de integração inerentes a este processo.

O circuito que permite esta calibração está representado na figura 5.11.

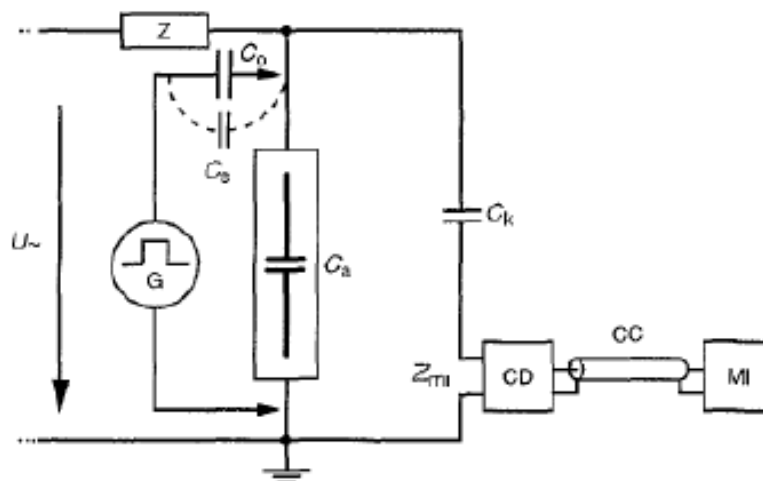


Figura 5.11 - Circuito equivalente da calibração de um instrumento para a medida do valor da carga aparente num objeto de ensaio [23]

5.7 - Preparação das Pontas de Ensaio

Sempre que se pretende realizar um ensaio, tem de se preparar as pontas do cabo, uma vez que estas não podem ser colocadas diretamente nos terminais de fim de cabo, já que as várias camadas que este possui impedem o correto contacto elétrico entre a alma condutora do cabo e o terminal de fim de cabo. A sua correta preparação é um fator importante para o sucesso do ensaio, pois preserva a qualidade do cabo que irá ser ensaiado, não o danificando.

A preparação destas pontas consiste na extração de determinado comprimento de cada uma das camadas superiores até se chegar à alma condutora. Este comprimento que é retirado de cada uma das camadas superiores depende do terminal fim de cabo utilizado.

É importante mencionar que estas camadas devem ser retiradas com bastante cuidado, de modo a não danificar as camadas inferiores. Se, ao longo desta preparação, for danificado o cabo, então o ensaio irá estar comprometido e o cabo em questão irá ser rejeitado.

Capítulo 6

Estudo da Influência do Intervalo de Integração

Durante o contacto com a medição do nível de DP, verificou-se que a escolha do intervalo de integração, que é composto por uma da largura de banda e da frequência central, influencia o valor da carga aparente obtido. Com o objetivo de se determinar a influência destes parâmetros, realizaram-se várias medições do nível de DP variando os parâmetros mencionados em cada medição realizada. Estas medições foram realizadas com os dois equipamentos de medição de DP que a CABELTE possui, o MPD 600 e o DDX 9121b.

É importante salientar que o que se pretende comparar com estes dois ensaios é a variação do valor de carga aparente obtido em função das frequências selecionadas.

Neste capítulo, é descrita a experiência realizada, o software dos equipamentos de medição utilizados e os cabos ensaiados. São, também, apresentados os resultados obtidos e as conclusões retiradas.

6.1 - Descrição dos Ensaios

6.1.1. Ensaio ao Cabo de AT

Este ensaio foi realizado no laboratório de AT da CABELTE. Tal como já foi referido no subcapítulo 3.1.2.1, este ensaio consiste na aplicação de uma tensão de 1,75 vezes a tensão nominal simples do cabo, U_0 , ao mesmo durante 10 segundos e depois esta tensão é diminuída até $1,5 U_0$. O valor de carga aparente considerado neste ensaio é o indicado pelo medidor de DP quando se verifica que este valor estabilizou. Na prática, o valor considerado para este ensaio é o valor lido depois de o cabo estar sujeito à tensão de $1,5 U_0$ durante 1 minuto.

A montagem do circuito de medida, representada na figura 6.1, é realizada segundo a norma IEC 60270 [23]. É utilizado o circuito em que o instrumento de medida está em série

com o condensador de acoplamento, estando o esquema deste circuito representado na figura 5.4 do capítulo 5.3.

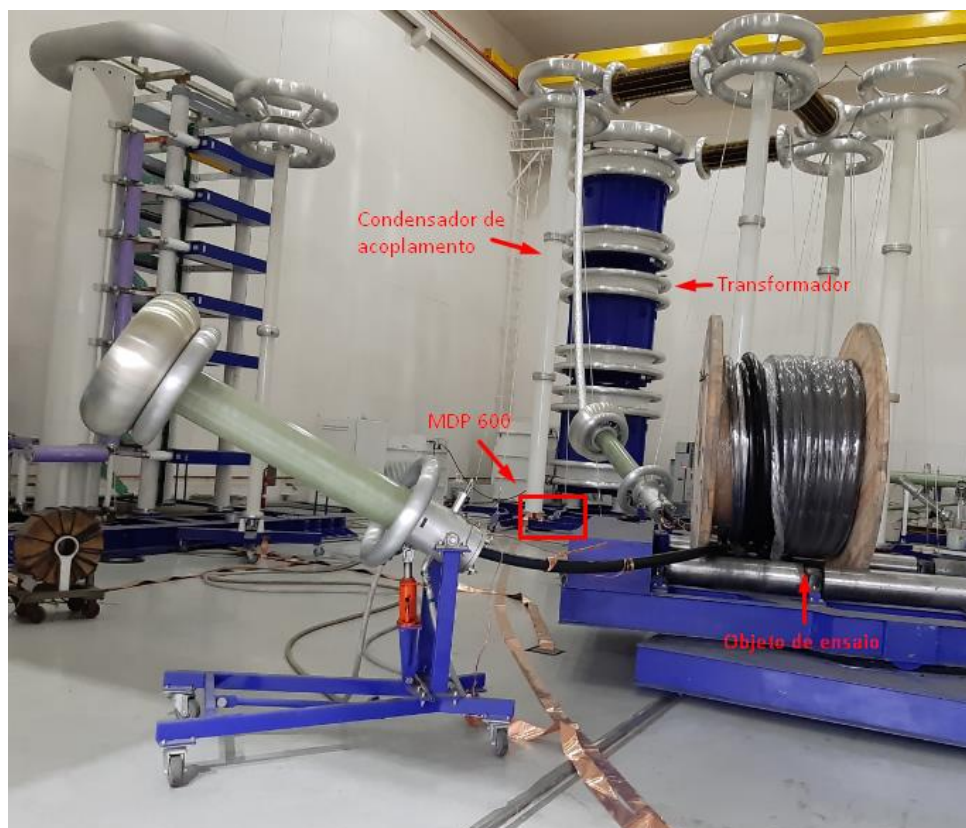


Figura 6.1 - Disposição do circuito de medida

O cabo utilizado neste ensaio, que se encontra representado na figura 6.2, tem a designação de LXHIOLE (cbe) $1 \times 1000 \text{ mm}^2$ 36/66 kV, segundo a NP 665. Este cabo possui a designação “cbe”, que identifica cabos com condutor e blindagem estanque, ou seja, que possuem bloqueio à propagação longitudinal da água no condutor e na blindagem.

Da camada mais interior para a mais exterior, este cabo é constituído por:

- Alma condutora de alumínio multifilar com uma fita entre os filamentos dos condutores para lhe conferir um bloqueio à propagação longitudinal da água;
- Camada semicondutora interior;
- Isolação de PEX;
- Camada semicondutora exterior;
- Fita hidroexpansiva, que lhe confere um bloqueio à propagação longitudinal da água;
- Blindagem individual em fios de cobre;
- Bainha exterior em PE de média densidade, revestida com uma fita de alumínio, que lhe confere um bloqueio transversal à penetração da água.



Figura 6.2 - Cabo utilizado no ensaio [40]

Para se obter resultados e realizar o controlo da medida do valor da carga aparente é utilizado um software da OMICRON, estando este interligado ao aparelho de medida. A janela do software permite visualizar, em cada instante, a forma de onda da tensão e dos eventos de DP (ecrã superior), o espectro de frequências (ecrã inferior) e o valor da carga aparente (parte lateral) (figura 6.3).

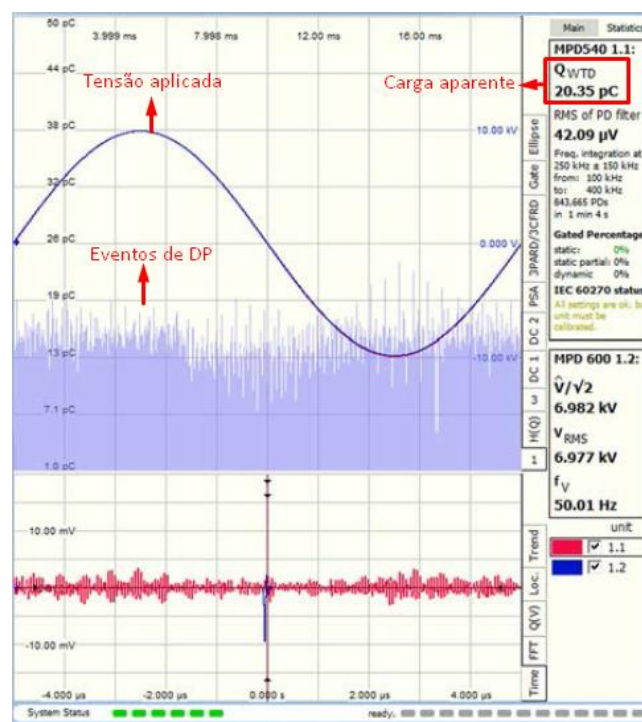


Figura 6.3 - Tela que mostra as formas de onda associadas à medição [22]

Na figura 6.4, está representada a janela que efetua o controlo dos parâmetros associados à medição do nível de DP. Esta janela permite a escolha da frequência de integração do filtro, e realização da calibração do sistema, bem como a escolha do valor a partir do qual se pretende considerar um evento de DP. Permite, ainda, o ajuste da tela de medida e a gravação do ensaio.

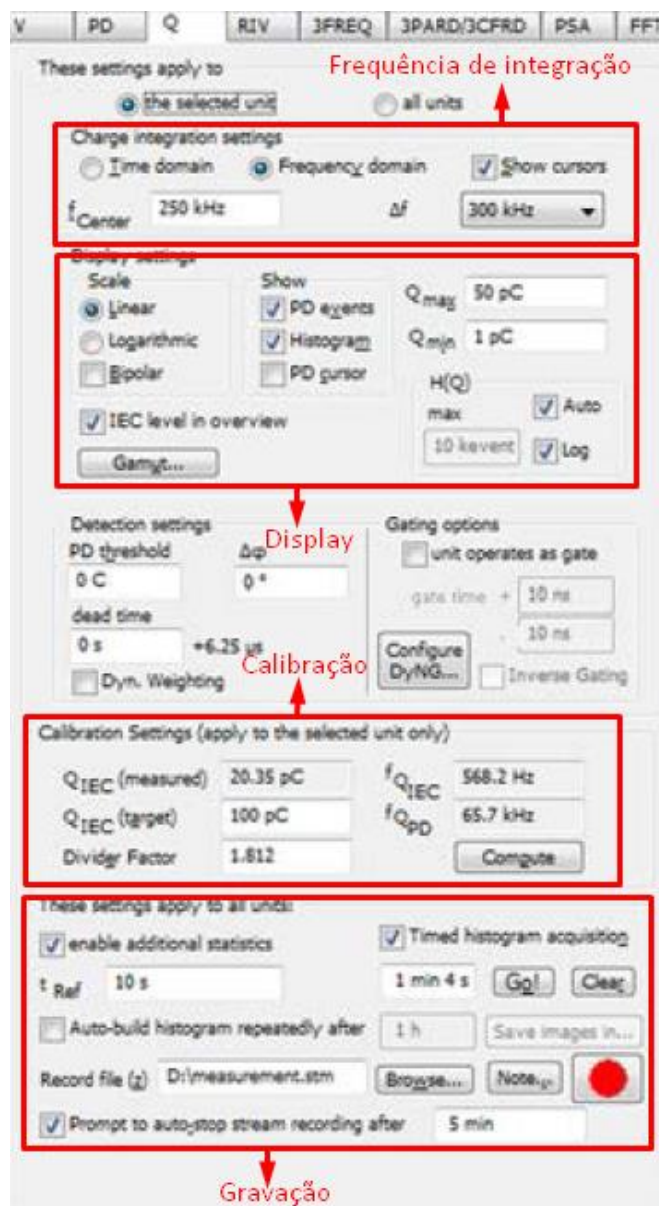


Figura 6.4 - Janela do software que controla a medição [22]

A sequência do procedimento dos ensaios realizados é a seguinte:

- Definir os parâmetros de frequências onde se ia realizar a medição no software;
- Calibrar o sistema de medida, estando a alimentação desligada, utilizando o calibrador (CAL 542), injetando um sinal de 5 pC;
- Retirar o calibrador do sistema e aplicar tensão;
- Subir a tensão aplicada lentamente até aos 63 kV ($1,75 \times 36$) e manter essa tensão durante 10 segundos;
- Descer a tensão lentamente até aos 54 kV ($1,5 \times 36$) e manter essa tensão até o valor lido no software estabilizar;
- Ler o valor obtido.

6.1.2. Ensaio ao Cabo de MT

Este ensaio foi realizado no laboratório de MT da CABELTE segundo o que foi especificado no subcapítulo 3.1.2.1.

A montagem do circuito de medida, representada na figura 6.5, é realizada segundo a norma IEC 60270 [23]. O circuito de medida utilizado neste laboratório é igual ao do circuito utilizado no laboratório de AT.



Figura 6.5 - Disposição do circuito de medida

O cabo utilizado neste ensaio, que se encontra representado na figura 6.6, tem a designação de LXHILE 3×1×185 mm² 12/20 kV, segundo a NP 665. Como se trata de um cabo trimonopolar, durante a realização do ensaio têm de ser ensaiadas as três fases, mas como o objetivo é apenas verificar a influência da alteração do filtro de integração, apenas se ensaiou uma fase.

Da camada mais interior para a mais exterior, uma fase deste cabo é constituída por:

- Alma condutora de alumínio multifilar;
- Camada semicondutora interior;
- Isolação de PEX;
- Camada semicondutora exterior;
- Blindagem de fita de alumínio;
- Bainha exterior em PE.



Figura 6.6 - Cabo utilizado no ensaio [40]

Para se obter resultados e realizar o controle da medida do valor da carga aparente, é utilizado um *software* da HAEFELY. Na figura 6.7, está representada a janela do *software* onde são visualizados, em cada instante, a forma de onda dos eventos de DP, o espectro de frequências, que mostra o intervalo do filtro de integração, e o valor da carga aparente e da tensão a que o cabo está sujeito.

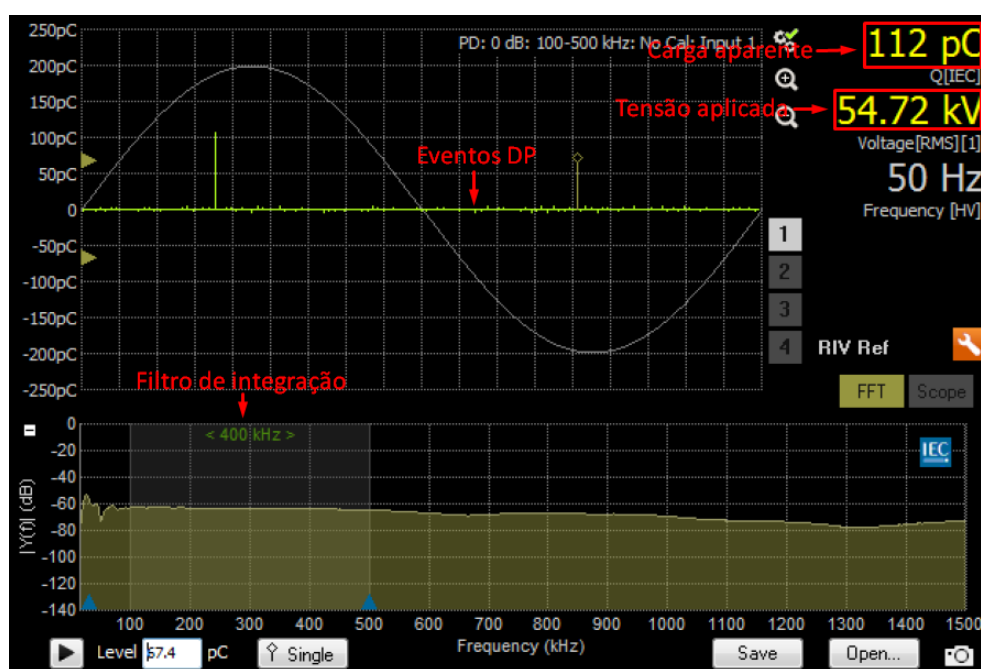


Figura 6.7 - Software da HAEFELY [41]

Na figura 6.8 está representada o menu do software que realiza o controle dos parâmetros associados à medição do nível de DP. De um modo geral, este menu permite a escolha da frequência de integração, a realização da calibração do sistema e o ajuste da tela de medida.

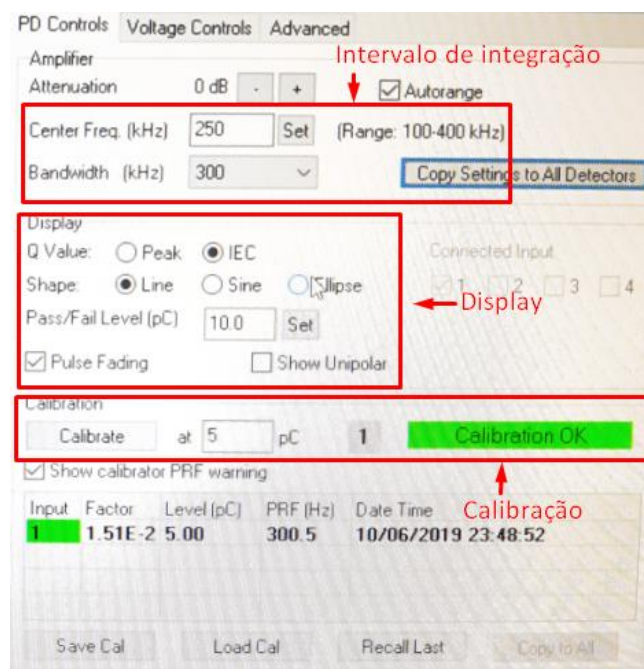


Figura 6.8 - Menu relativo à configuração da medida

A sequência do procedimento dos ensaios realizados é igual à realizada no laboratório anterior. A diferença entre os procedimentos realizados nos dois laboratórios reside no equipamento utilizado e na tensão aplicada ao objeto de ensaio. Neste ensaio é utilizado o KAL 9511 para calibrar o sistema de medição e é aplicada uma tensão de 21 kV e 18 kV ao cabo durante a realização do ensaio, uma vez que a tensão simples estipulada do cabo utilizado é de 12 kV.

6.2 - Resultados Obtidos

6.2.1. Ensaio ao Cabo de AT

Inicialmente tentou-se identificar a influência da largura de banda escolhida na medida do nível de DP. Para isso, decidiu-se variar este parâmetro, mantendo constante o valor da frequência central.

Como o equipamento de medida utilizado, MPD 600, apenas permite a seleção de algumas larguras de banda (1500 kHz, 1000 kHz, 800 kHz, 650 kHz, 300 kHz, 160 kHz, 100 kHz, 40 kHz, 9 kHz) e como este ensaio tem de cumprir as normas em vigor, optou-se por escolher larguras de banda que a norma permite. Assim, segundo a gama de larguras de banda permitidas pela norma mencionadas no subcapítulo 5.4.1, realizou-se a medição com as larguras de banda 100 kHz, 160 kHz e 300 kHz, utilizando uma frequência central de 250 kHz.

Os valores recolhidos durante o ensaio estão presentes na tabela 4. Esta tabela indica também a designação do cabo utilizado, a frequência central e a largura de banda do filtro de

integração e os respectivos limites de frequências inferior e superior, a tensão aplicada e o valor de carga aparente obtido.

Tabela 4 - Valores da carga aparente onde se varia a largura de banda

Variação da Δf							
Cabo	U_N (kV)	f_m (kHz)	Δf (kHz)	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	U (kV)	q_{med} (pC)
LXHIOLE (cbe) 1×1000	36/66	250	100	200	300	54,4	3,8
		250	160	170	330	54,4	4,1
		250	300	100	400	54,4	4,6

Depois tentou-se identificar a influência da frequência central escolhida no valor obtido neste ensaio. Para isso, variou-se este parâmetro, mantendo constante o valor da largura de banda. O valor escolhido para a largura de banda foi 300 kHz

O equipamento de medida utilizado permite uma escolha livre do valor pretendido para a frequência central, por isso decidiu-se realizar a medição com este parâmetro entre os 180 e os 250 kHz. Foi escolhido este intervalo de valores para que os valores dos limites inferior e superior da frequência estejam dentro dos valores determinados pela norma referido no subcapítulo 5.4.1.

Os valores recolhidos durante o ensaio estão presentes na tabela 5. Esta tabela indica a mesma informação da tabela anterior.

Tabela 5 - Valores da carga aparente onde se varia a frequência central

Variação da f_m							
Cabo	U_N (kV)	f_m (kHz)	Δf (kHz)	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	U (kV)	q_{med} (pC)
LXHIOLE (cbe) 1×1000	36/66	180	300	30	330	54,4	5,2
		190	300	40	340	54,3	4,5
		200	300	50	350	54,4	4,9
		210	300	60	360	54,3	4,5
		220	300	70	370	54,3	4,1
		230	300	80	380	54,1	4,3
		240	300	90	390	54,3	4,5
		250	300	100	400	54,3	4,6

6.2.2. Ensaio ao Cabo de MT

Tal como foi realizado no primeiro ensaio, inicialmente tentou-se identificar a influência da largura de banda escolhida na medida do nível de DP e então decidiu-se variar este parâmetro, mantendo o valor da frequência central constante.

O equipamento de medida utilizado, DDX 9121b, apenas permite a seleção de algumas larguras de banda, mencionadas na tabela 2. Como se pretende que o ensaio cumpra as normas em vigor, optou-se por escolher larguras de banda que a norma permita. Dada a capacidade do

equipamento de medida, realizou-se a medição com as larguras de banda 100 kHz, 150 kHz, 200 kHz, 250 kHz, 300 kHz, 350 kHz e 400 kHz, utilizando uma frequência central de 250 kHz.

Os valores recolhidos durante o ensaio estão presentes na tabela 6. Esta tabela indica também a designação do cabo utilizado, a frequência central, a largura de banda escolhida e as respetivas frequências inferior e superior, a tensão aplicada e o valor de carga aparente obtido.

Tabela 6 - Valores da carga aparente onde se varia a largura de banda

Variação da Δf							
Cabo	U_N (kV)	f_m (kHz)	Δf (kHz)	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	U (kV)	q_{med} (pC)
LXHILE 3×1×185	12/20	250	100	200	300	18,7	0,38
		250	150	175	325	18,2	0,45
		250	200	150	350	18,4	0,51
		250	250	125	375	18,2	0,58
		250	300	100	400	18,2	0,64
		250	350	75	425	18,1	0,85
		250	400	50	450	18,2	0,87

Depois, tentou-se identificar a influência da frequência central escolhida no valor obtido para este ensaio. Para isso, variou-se este parâmetro, mantendo constante o valor da largura de banda. O valor escolhido para a largura de banda foi 300 kHz, para se poder comparar com o outro ensaio realizado.

O equipamento de medida utilizado permite uma escolha livre do valor pretendido para a frequência central, por isso decidiu-se realizar a medição com este parâmetro entre os 180 e os 250 kHz pela mesma razão do ensaio realizado no laboratório de AT.

Os valores recolhidos durante o ensaio estão presentes na tabela 7. Esta tabela indica a mesma informação da tabela anterior.

Tabela 7 - Valores da carga aparente onde se varia a frequência central

Variação da f_m							
Cabo	U_N (kV)	f_m (kHz)	Δf (kHz)	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	U (kV)	q_{med} (pC)
LXHILE 3×1×185	12/20	180	300	30	330	18	0,68
		190	300	40	340	18,2	0,66
		200	300	50	350	18,2	0,74
		210	300	60	360	18,4	0,58
		220	300	70	370	18,1	0,55
		230	300	80	380	18,3	0,53
		240	300	90	390	18,2	0,61
		250	300	100	400	18,4	0,64

6.3 - Análise dos Resultados

Neste subcapítulo serão analisados os resultados obtidos e comparados os dois equipamentos de medição utilizados. Para que estes resultados sejam analisados mais facilmente, serão apresentados sobre a forma de gráficos.

Começando pela variação da largura de banda, os resultados obtidos estão representados nas figuras 6.9 e 6.10.

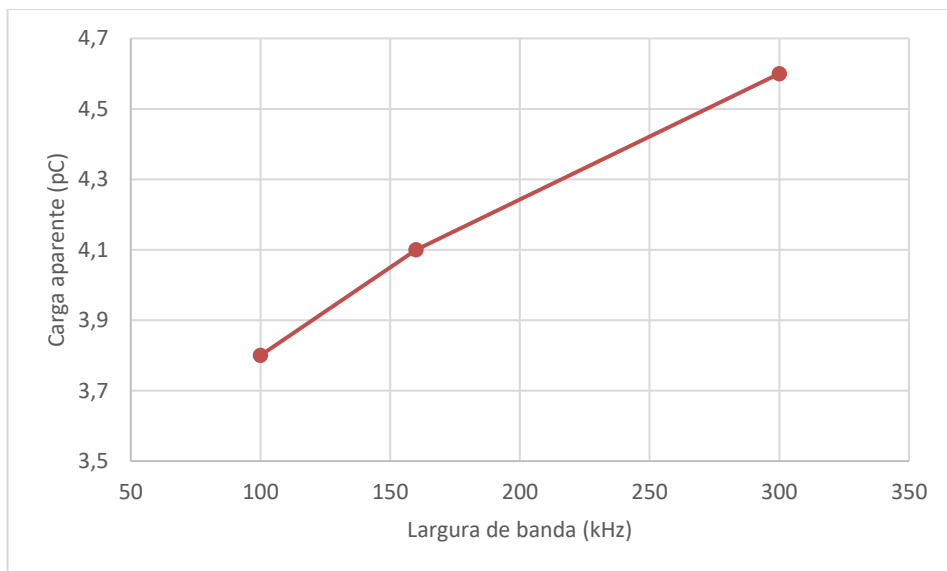


Figura 6.9 - Variação do valor da carga aparente medido com o MPD 600 em função da largura de banda

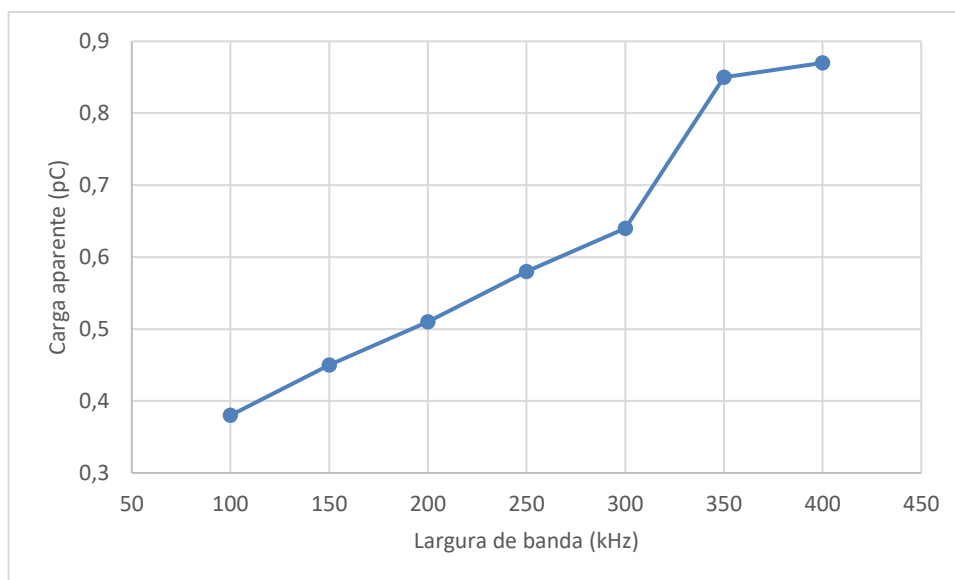


Figura 6.10 - Variação do valor da carga aparente medido com o DXX 9121b em função da largura de banda

Através da análise dos resultados obtidos verifica-se que à medida que se vai aumentando a largura de banda, o valor da carga aparente obtido é cada vez maior, tendo-se verificado

este comportamento nos dois equipamentos de medida. Quanto maior for o intervalo de integração, maior é a gama de frequências e, conseqüentemente, maior é a gama de eventos de DP, por isso é natural que o valor da carga aparente aumente.

Relativamente aos ensaios onde se variou a frequência central, obtiveram-se os resultados apresentados nas figuras 6.11 e 6.12.

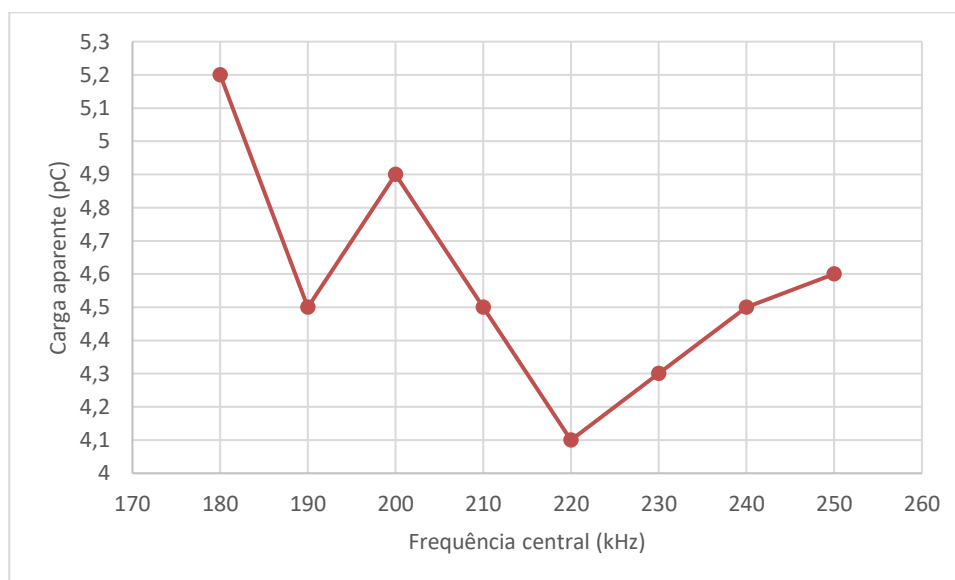


Figura 6.11 - Variação do valor da carga aparente medido com o MPD 600 em função da frequência central

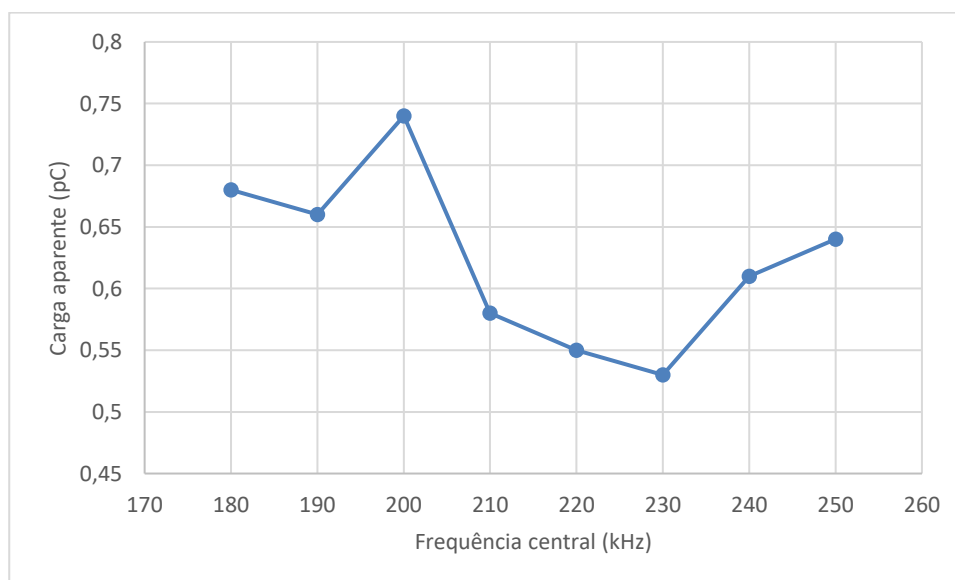


Figura 6.12 - Variação do valor da carga aparente medido com o DXX 9121b em função da frequência central

Analisando os resultados obtidos verifica-se que em ambos os instrumentos de medição o valor da carga aparente tende a diminuir à medida que se vai aumentando a frequência central,

até se atingir os 230 kHz, sendo o menor valor medido obtido com esta frequência central. Entre os 230 kHz e os 250 kHz o valor medido aumenta à medida que se vai aumentando a frequência.

Verifica-se que o valor obtido no ensaio aumenta quando os limites inferior e superior (f_1 e f_2) do intervalo de integração se aproximam dos limites determinados pela norma (30 kHz para o caso do limite inferior e 500 kHz para o caso do limite superior). Tal deve-se ao facto de o ruído de fundo, proveniente dos restantes equipamentos do sistema, ser superior nestas frequências.

Assim conclui-se que se deve escolher uma frequência central entre os 220 e os 230 kHz para se obter um menor valor de carga aparente durante a realização do ensaio.

Embora o valor medido varie com a alteração do intervalo de integração, esta variação não influencia de uma maneira muito significativa, ou seja, esta variação não impossibilita o cabo de obter aprovação no ensaio, uma vez que a maior variação observada foi de 1 pC (entre o maior e o menor valor medido). Na eventualidade de o cabo possuir um defeito na camada isolante, o valor obtido no ensaio sobe para muitas dezenas ou até centenas de pC, mediante a gravidade do defeito presente no cabo. Por isso conclui-se que a escolha do intervalo de integração não influencia a aprovação do cabo neste ensaio.

Capítulo 7

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e contribuições do trabalho desenvolvido nesta dissertação. No final são apresentadas sugestões para possíveis trabalhos futuros.

7.1 - Principais Conclusões

Com a presente dissertação conclui-se que o ensaio da medição do nível de DP é uma ferramenta muito importante e eficaz no diagnóstico do estado da isolação de um cabo isolado de uma forma não destrutiva, uma vez que permite determinar se existe alguma imperfeição resultante do processo de fabrico desta camada. Quando é detetado um defeito durante um ensaio em ambiente fabril, é localizada a sua origem, utilizando os métodos de localização apresentados e o cabo é de imediato reparado, utilizando os procedimentos descritos.

A principal conclusão a ser retirada deste trabalho é que um cabo isolado que apresente um valor de carga aparente superior ao estipulado na norma IEC 60270 [23] ou outras normas, terá um período de vida bastante mais reduzido do que o período de vida esperado pelas normas. Tal deve-se ao facto de as descargas parciais em materiais sólidos serem um fenómeno destrutivo e não regenerativo, e que, embora de forma mais ou menos lenta, vão provocar uma formação contínua de canais que levarão à rutura da isolação e que inevitavelmente conduzirão à destruição do cabo.

Existem vários tipos de descargas parciais, das quais nem todas estão associadas aos cabos, como é o caso das descargas por efeito de coroa. Este tipo de DP pode ocorrer nas extremidades ou partes pontiagudas de qualquer equipamento sujeito a um elevado gradiente eléctrico.

No que diz respeito à medição, as descargas parciais são detetadas pelas transformações de energia que ocorrem durante este fenómeno, por isso podem ser detetadas por vários métodos. Dentro dos métodos de detecção existentes destaca-se o método de detecção eléctrico por ser o único que quantifica o nível de descargas parciais.

Relativamente aos cuidados a ter antes da realização do ensaio de descargas parciais, é importante preparar corretamente as extremidades do cabo que será ensaiado, bem como realizar a calibração do sistema de medição de descargas parciais, depois do cabo estar devidamente inserido no circuito de medição. Estes cuidados permitem, respetivamente, a preservação da integridade do cabo depois de ser ensaiado e a obtenção de um valor real para o nível de DP.

A atividade experimental realizada permitiu concluir que:

- Quando se mantém a frequência central constante, o valor da carga aparente medido aumenta com o aumento da largura de banda do filtro de integração;
- Quando se mantém a largura de banda do intervalo de integração constante, o valor da carga aparente medido aumenta quando os limites inferior e superior (f_1 e f_2) do intervalo de integração se aproximam dos limites determinados pela norma. O menor valor de carga aparente é obtido quando se escolhe como frequência central um valor entre os 220 kHz e os 230 kHz.

Comparando os dois equipamentos de medição utilizados nesta atividade experimental, conclui-se que o equipamento DDX 9121b permite escolher uma maior variedade de largura de banda do intervalo de integração do que o MPD 600. Em contrapartida, o MPD 600 tem uma frequência de integração do sistema até aos 20 MHz, enquanto que o DDX 9121b apenas consegue adquirir sinais até aos 1,5 MHz.

7.2 - Contribuições

A presente dissertação teve como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento das atividades levadas a cabo no laboratório de AT da CABELTE, no sentido de aprofundar os conhecimentos sobre vários fenómenos e, em particular, sobre o fenómeno das descargas parciais, para que num futuro próximo possa desenvolver uma base teórica completa capaz de compreender e interpretar todos os fenómenos elétricos associados a este local de trabalho.

Este trabalho realiza uma breve descrição dos equipamentos presentes neste laboratório e dos ensaios nele realizados, podendo, por isso, ser utilizado como um documento de consulta desta informação, constituindo uma espécie de guia orientador para os procedimentos de ensaios.

O estudo da influência do intervalo de integração no valor de carga aparente obtido durante a realização do ensaio de medição das descargas parciais é, também, considerada um ponto chave e uma mais valia no sentido de se determinar qual é o melhor intervalo de integração a ser escolhido para a realização deste ensaio, de modo a possibilitar a obtenção dos melhores resultados.

7.3 - Trabalhos Futuros

Apesar de todo o empenho e dedicação, o presente trabalho é suscetível de ser continuado abordando alguns aspetos importantes, mas que, por falta de tempo, não foi possível considerar. Assim, em trabalhos futuros seria importante desenvolver um estudo de implementação de novos procedimentos no fabrico de cabos isolados que permitam minimizar o nível de descargas parciais, bem como uma avaliação mais rigorosa do sistema de terras dos laboratórios (AT e MT) da empresa, no sentido de determinar e mitigar possíveis perturbações que afetem a medição das descargas parciais.

Referências

- [1] Solidal GT. 10ª Edição. SOLIDAL-Condutores Elétricos, SA, QUINTAS & QUINTAS-Condutores Elétricos, SA Lisboa. 2010.
- [2] Standard I. 60502-2. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). 2014; 176.
- [3] Standard I. 60840. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) - Test methods and requirements. 2011; 137.
- [4] dos Santos JN. Condutores e cabos de energia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2005.
- [5] Peschke E, von Olshausen R. Cable systems for high and extra-high voltage: development, manufacture, testing, installation and operation of cables and their accessories: Wiley-VCH; 1999.
- [6] Associates S-h. Plant or Manufacturing Engineering. [Web page]; 2004 [cited 2019 20 April]. Available from: <http://www.stewart-hay.com/plant1ie.htm>
- [7] Wikipedia. Cross-link. [Web page]; 2019 [cited 2019 16 April]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-link>.
- [8] Cabelte SA. Cabos de Energia - Média Tensão. 2000.
- [9] Gouda OE, Farag A. Bonding methods of underground cables. 2015.
- [10] Brugg Kabel A. High Voltage XLPE Cable Systems-Technical User Guide. Brugg Kabel AG. 2006.
- [11] Engenharia W. Trefilagem. [Web page]; 2019 [updated 2011; cited 2019 21 February]. Available from: <http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia/index.php/Trefilagem>.
- [12] McAllister D. Electric cables handbook: Granada; 1982.
- [13] Wikipedia. Skin effect. [Web page]; 2018 [updated 2018; cited 2019 16 April]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect.
- [14] Standard I. 60287-1-1. Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General. 2006; 65

- [15] Gudmundsdottir US. Proximity effect in fast transient simulations of an underground transmission cable. Electric Power Systems Research. 2014; 115:50-6.
- [16] Wikipedia. Inductance. [Web page]; 2019 [updated 2019; cited 2019 23 February]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Inductance>.
- [17] Delta OT. TAN δ (DELTA) cable testing overview and answers to frequently asked questions.
- [18] Standard I. 949. Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects.1988; 25.
- [19] Standard I. 62067. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) - Test methods and requirements.2011; 121.
- [20] Standard I. 60229. Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function. 2007; 22.
- [21] Standard I. 60228. Conductors of insulated cables.2004; 37
- [22] OMICRON. MPD 600 - Manual del usuario. [Web page]; 2013 [cited 2019 2 May]. Available from: <https://pt.scribd.com/document/272682964/MPD-600-manual>
- [23] Standard I. 60270. High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. 2000; 99.
- [24] Kuffel J, Kuffel P. High voltage engineering fundamentals: Elsevier; 2000.
- [25] Surprises. [18] Décharges partielles. [Web page]; 2019 [cited 2019 3 March]. Available from: <http://www.surprises.ch/HT/annexes/18.pdf>
- [26] Amperis. Partial discharge detector equipment. [Web page]; 2007 [cited 2019 19 March]. Available from: <https://www.amperis.com/en/products/partial-discharge-detector/>.
- [27] Wadhwa CL. High voltage engineering. 2007.
- [28] Amperis. Types of partial discharges. [Web page]; 2007 [cited 2019 19 March]. Available from: <https://www.amperis.com/en/content/types-partial-discharges/>.
- [29] Vibhakar C. Investigation of long term ageing in solid insulating material by studying the effect of variation of parameters and wavelet transform analysis on real time data on partial discharge. Gujarat. Tese [Doctor of philosophy] - Maharaja Sayajirao University of Baroda; 2011.
- [30] Globe C. Corona Effect. [Web page]; 2016 [updated 2016; cited 2019 10 April]. Available from: <https://circuitglobe.com/corona-effect.html>.
- [31] Wikipedia. Partial discharge. [Web page]; 2019 [cited 2019 12 May]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Partial_discharge.
- [32] Dias EJ. Diagnostico dos cabos subterrâneos de média tensão em belo horizonte através do método de descargas parciais: uma viabilidade para manutenção preventiva confiável.
- [33] HVPD. An Introduction to Partial Discharge. [Web page]; 2019 [cited 2019 12 June]. Available from: <https://www.hvpd.co.uk/technical/?fbclid=IwAR2pq4KAhXkWt14Y8Lx fd8nLmSooO0XUf9WMesOAda0lP6zQs9ATT7waJxc>

- [34] Kreuger FH. Industrial High DC Voltage: Delft University Press; 1992.
- [35] Amperis. Detection methods of partial discharges. [Web page]; 2007 [cited 2019 29 March]. Available from: <https://www.amperis.com/en/resources/articles/detection-methods-partial-discharges/>.
- [36] Paulino M, Giacchetti L. Avaliação de descargas parciais: Uso de medição com sistemas digitais de múltiplos canais sincronizados para avaliação de transformadores com descargas parciais. XXI snptee seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica; 2011; Florianópolis, Brasil.
- [37] Wolzak GG, van de Laar A, Steennis EF. Partial discharges and the electrical aging of XLPE cable insulation: Citeseer; 1986.
- [38] Liu Z, Phung B, Blackburn T, James R. The propagation of partial discharge pulses in a high voltage cable. Proc of AUPEC/EECON eds. 1999:287-92.
- [39] Van Veen L. Comparison of measurement methods for partial discharge measurement in power cables. 2014.
- [40] Cabelte SA. Catálogo geral. [Web page]; 2012 [cited 2019 30 May]. Available from: http://svrweb.cabelte.pt/Catalogo_Geral_pt.
- [41] Hipotronics H. DDX 9121b. [Web page]; 2019 [cited 2019 30 May]. Available from: <https://www.hubbell.com/haefelyhipotronics/en/Products/Electrical-Electronic/Test-Equipment/Instruments/Partial-DischargeRIV-Equipment/Partial-Discharge-RIV-Detectors/DDX-9121b/p/2133848>.