

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Análise Dielétrica de um Transformador de Potência

Ana Leonor Tavares Madureira

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Co-orientador: Eng^o Nuno Miguel Almeida Soares

31 de Julho de 2014

A Dissertação intitulada

“Análise Dielétrica de um Transformador de Potência”

foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2014

o júri


Presidente **Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa**
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


Professor Doutor Custódio João Pais Dias
Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto
Superior de Engenharia do Porto


Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Ana Leonor Tavares Madureira

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A presente dissertação tem como objetivos principais a análise dielétrica de um transformador de potência cedido pela EFACEC, através da realização dos ensaios dielétricos passíveis de serem efetuados tendo em consideração as limitações do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, bem como dotá-lo das condições necessárias para que esse trabalho possa ser feito futuramente com rigor e segurança.

Inicialmente é feito um estudo detalhado sobre transformadores, descrevendo os seus aspetos construtivos, princípios de funcionamento, sendo dado especial ênfase aos tipos de avarias mais comuns, as suas causas mais prováveis e os sistemas de proteção dos mesmos.

É, ainda, apresentado o LAT, descrevendo os equipamentos que o constituem, a sua disposição e princípios de funcionamento.

Por fim, é feita uma abordagem às normas internacionais que ditam as condições de ensaio, esquemas de montagem e procedimentos, sendo posteriormente descritos os esforços efetuados para cumprir todos os requisitos, bem como a sequência de testes realizados ao objeto em estudo, apresentando, finalmente, os resultados, verificando os níveis de isolamento.

Abstract

The present dissertation has as main objectives the dielectric analysis of a power transformer from EFACEC, by conducting several dielectric tests, taking into account the limitations of the High Voltage Laboratory of Faculty of Engineering of the University of Porto, and to create the necessary conditions for this work to be done in the future with accuracy and safety.

Initially it is done a detailed research about transformers, illustrating their construction and principles of operation, being given special emphasis to the most common types of faults, their probable causes and their protection systems.

Then, it's described the existing equipment in the High Voltage Laboratory of FEUP, its disposition and principles of operation. After that, international standards are addressed for the dielectric tests, explaining its conditions, assemblies and procedures. Finally, High Voltage Tests are performed, its results presented, and the insulation levels checked.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Doutor Machado e Moura, pela oportunidade que me deu de trabalhar no LAT, pela confiança depositada em mim ao longo do semestre e pelo seu apoio durante o desenvolvimento da presente dissertação.

Da mesma forma, deixo uma palavra de apreço ao Eng^o Nuno Soares pelos ensinamentos e disponibilidade demonstrada ao longo do semestre, sempre que necessário.

Agradeço ao Eng^o Mário Ferreira, da EFACEC, pela cedência do equipamento em estudo e por se ter mostrado sempre recetivo a esclarecer as minhas dúvidas e questões.

Ao Professor Doutor Carlos Sá, Eng^o Vasques Carvalho e Eng^o Tomás Alves, da EDP, pelas horas de reflexão dispensadas, pelos conhecimentos e experiências partilhados.

Ao Eng^o António Ferreira da Silva, da EFACEC, pela ajuda na resolução das adversidades que foram surgindo durante a realização dos ensaios, com a sua experiência e sapiência. O seu entusiasmo e persistência foram absolutamente fulcrais para a finalização do trabalho.

Ao meu companheiro de trabalho, Cacete, com quem tanto partilhei durante o último semestre, muito obrigada!

Agradeço aos meus amigos Marta, Mafalda, Rissol, Ana Zé, Sónia, Filipe, Rui, Basílio, EDP, Mário, Mota e Pacheco que me acompanharam e muito marcaram o meu percurso ao longo dos últimos 5 anos.

Finalmente, agradeço à minha família, pelo apoio e compreensão incondicionais, por exigirem sempre o máximo de mim, e sem a qual não seria possível concluir esta ou qualquer outra etapa da minha vida.

Ana Leonor Tavares Madureira

*“Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.”*

Ricardo Reis

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Objetivos	1
1.2	Estrutura da Dissertação	2
2	Transformadores	3
2.1	Aspetos Construtivos	3
2.1.1	Circuito Magnético	3
2.1.2	Enrolamentos	5
2.1.3	Terminais de ligação	5
2.1.4	Sistema de isolamento e Sistema de arrefecimento	5
2.1.4.1	Transformadores a seco vs Transformadores a óleo	6
2.1.5	Outros elementos construtivos	8
2.2	Princípio de Funcionamento	8
2.2.1	Circuito equivalente de um transformador	9
2.3	Transformadores Trifásicos	11
2.4	Tipos de Transformadores	14
3	Avarias e Proteção de Transformadores	15
3.1	Avarias	15
3.1.1	Métodos de diagnóstico	18
3.1.1.1	Análise de gases dissolvidos no óleo	19
3.1.1.2	Análise do óleo	19
3.1.1.3	Grau de polimerização	19
3.1.1.4	Análise dos compostos furânicos	19
3.1.1.5	Resistência de isolamento e índice de polarização	19
3.1.1.6	Fator de perdas do dielétrico ou $\tan(\delta)$	19
3.1.1.7	Resistência dos enrolamentos	20
3.1.1.8	Relação entre espiras	20
3.1.1.9	Temperatura	20
3.1.1.10	Indutância de fugas	20
3.1.1.11	Corrente de excitação	21
3.1.1.12	Descargas parciais	21
3.1.1.13	Análise de resposta em frequência	21
3.1.1.14	Tensão de restabelecimento e correntes de polarização	21
3.1.1.15	Diagnóstico de avarias nas travessias e reguladores de tensão em carga	21
3.1.1.16	Sistema de monitorização contínua	22
3.2	Proteção de Transformadores	22

3.2.1	Proteção contra sobretensões	23
3.2.2	Proteção diferencial de transformador	25
3.2.3	Proteção contra sobreintensidades	26
3.2.4	Proteção de Buchholz	26
3.2.5	Imagem térmica	27
4	Laboratório de Alta Tensão	29
4.1	Constituição do LAT	29
4.2	Medidas de Proteção Passiva	30
4.3	Medidas de Proteção Ativa	32
4.4	Equipamentos	33
4.4.1	Gerador de Impulso	33
4.4.2	Sistema de frequência industrial	35
5	Ensaio Dielétricos a Transformadores de Potência	37
5.1	Ensaio em Alta Tensão	37
5.1.1	Posicionamento do Objeto em Ensaio	37
5.1.2	Correções Atmosféricas	38
5.2	Ensaio à frequência industrial	40
5.2.1	Ensaio com tensão AC induzida de curta duração em transformadores de potência	40
5.3	Ensaio ao impulso atmosférico	41
5.3.1	Ensaio ao impulso atmosférico em transformadores de potência	43
6	Ensaio e Resultados	45
6.1	Objeto em estudo	46
6.2	Ensaio com tensão AC induzida de curta duração	47
6.2.1	Ensaio do lado AT	48
6.2.2	Ensaio do lado BT	49
6.3	Ensaio ao impulso atmosférico	50
6.3.1	Ensaio do lado AT	51
6.3.2	Ensaio do lado BT	53
6.4	Análise dos resultados	60
7	Conclusões e Trabalho Futuro	63
7.1	Considerações finais	63
7.2	Trabalho Futuro	65
A	Guião de ensaio com tensão AC induzida de curta duração em transformadores de potência no LAT	67
B	Guião de ensaio ao impulso atmosférico em transformadores de potência no LAT	71
	Referências	77

Lista de Figuras

2.1	Transformador do tipo Coluna: a) monofásico ; b) trifásico.	4
2.2	Transformador do tipo Couraçado: a) monofásico ; b) trifásico.	4
2.3	Juntas: a) plana ; b) imbricada reta clássica ; c) imbricada clássica, montagem de topo ; d) imbricada clássica, montagem de topo ; e) imbricada, montagem do tipo "step lap".	5
2.4	Transformador monofásico	8
2.5	Modelo exato de um transformador ideal	10
2.6	Circuito equivalente reduzido ao primário	11
2.7	Transformador trifásico	12
2.8	Exemplo de um Banco de transformadores	12
2.9	Tipos de ligações dos transformadores trifásicos: a) estrela com neutro ; b) estrela sem neutro ; c) triângulo ; d) zig-zag com neutro ; e) zig-zag sem neutro.	13
3.1	Taxa de avarias dum transformador, em função do tempo de funcionamento	15
3.2	Distribuição de avarias em transformadores: a) de subestações com regulação de tensão ; b) de centrais sem regulação de tensão	17
3.3	Causas das avarias em: a) transformadores de centrais e subestações ; b) transformadores de utilização industrial	18
3.4	Degradação do papel por avaria nos enrolamentos do transformador	20
3.5	Hastes de guarda	23
3.6	Descarregadores de sobretensões de carboneto de silício	24
3.7	Característica resistiva não-linear de um descarregadores de sobretensões de óxido de zinco	24
3.8	Descarregadores de sobretensões de óxido de zinco	25
3.9	Relé de Buchholz da marca Maschinenfabrik Reinhausen	26
3.10	Imagem térmica dum transformador	27
4.1	Planta da sala de ensaios do LAT	30
4.2	Aspetto da malha metálica utilizada para a visualização dos ensaios nas salas de comando e observação e como revestimento do portão de acesso ao exterior	30
4.3	a) Isoladores orgânicos de ligação do anel principal às chapas da parede ; b) isolador do anel à malha metálica e tinta isoladora do anel principal às chapas do pavimento	31
4.4	Ligação a) exclusiva à terra exterior do edifício com eléctrodo simples ; b) às fundações metálicas do edifício ; c) à terra do PT que alimenta o laboratório	31
4.5	Quadro de controlo de equipamentos do LAT e representação dos seus níveis de segurança	32

4.6	Gerador de impulso: à esquerda o retificador, ao centro a torre e à direita o divisor de tensão	33
4.7	Sistema Digital de Análise de Impulso	34
4.8	Sistema de frequência industrial: à esquerda o transformador e à direita o divisor de tensão	35
4.9	Regulador de tensão de saída do sistema de frequência industrial	36
5.1	Distâncias recomendadas do objeto ensaiado à frequência industrial a qualquer outro objeto com diferente potencial	38
5.2	Tensões suportáveis estipuladas para enrolamentos de transformadores com tensão máxima inferior a 170kV.	41
5.3	Esquema de montagem para o ensaio com tensão AC induzida de curta duração ao enrolamento: a) AT de um transformador de potência ; b) BT de um transformador de potência	41
5.4	Onda de impulso completa	42
5.5	Onda de impulso cortada: a) na frente ; b) na cauda	42
5.6	Esquemas de montagem para o ensaio ao choque atmosférico em transformadores de potência: a) na fase 1W do enrolamento AT ; b) na fase 2W do enrolamento BT	44
6.1	Transformador de distribuição da EFACEC em estudo	45
6.2	Chapa de características do transformador de distribuição da EFACEC em estudo	46
6.3	Montagem do ensaio com o sistema de frequência industrial	47
6.4	Montagem do ensaio para o lado de Alta Tensão	49
6.5	Montagem do ensaio para o lado de Baixa Tensão	49
6.6	Montagem do ensaio ao impulso atmosférico antes do transformador ter sido isolado	50
6.7	Montagem do ensaio para o lado de Alta Tensão	52
6.8	Formas de onda de tensão obtidas na fase 1W, para tensões aplicadas de: a) 90 kV ; b) 170 kV	53
6.9	Montagem do ensaio para o lado de Baixa Tensão	53
6.10	Forma de onda de tensão obtida na fase 2W quando aplicado um impulso atmosférico de 21 kV	54
6.11	Esquema de montagem do ensaio ao impulso atmosférico à fase 2W, com uma resistência externa	54
6.12	a) Montagem do ensaio ao impulso atmosférico à fase 2W, com uma resistência externa de 115Ω ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV	55
6.13	a) Montagem do ensaio ao impulso atmosférico à fase 2W, com uma resistência externa de 8400Ω ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV	56
6.14	a) Resistência em Série Externa parcialmente curto-circuitada ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV	57
6.15	a) Resistência em Série Externa totalmente curto-circuitada ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV	58
6.16	Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 29,5 kV	59
A.1	Esquema de montagem do ensaio ao lado de Baixa Tensão	67
A.2	Esquema de montagem do ensaio ao lado de Alta Tensão	67
A.3	Valores de tensão de ensaio ao transformador mediante o seu nível de tensão U_m	68

B.1	Valores de tensão de ensaio ao transformador mediante o seu nível de tensão U_m .	72
B.2	Esquema de montagem do ensaio ao lado de: a) Baixa Tensão ; b) Alta Tensão . .	73
B.3	Esquema de montagem do ensaio caso fosse necessária a introdução de uma resistência externa no lado de Baixa Tensão	76

Lista de Tabelas

2.1	Símbolos utilizados para indicar os tipos de refrigeração	6
5.1	Valores dos expoentes m e w em função do valor de g	39
6.1	Condições atmosféricas de cada ensaio e resultados dos parâmetros necessários à correção da tensão de ensaio a aplicar	48
6.2	Condições atmosféricas de cada ensaio e resultados dos parâmetros necessários à correção da tensão de ensaio a aplicar	51
6.3	Valores de tensão, tempo de subida e tempo de cauda registados nos ensaios no lado de AT	52
6.4	Valores de tensão, tempo de subida e tempo de cauda registados nos ensaios no lado de BT	59
6.5	Confirmação dos resultados obtidos nos ensaios no LAT com os especificados pelas normas internacionais	61
A.1	Valores dos expoentes m e w em função do valor de g	69
B.1	Valores dos expoentes m e w em função do valor de g	74

Abreviaturas e Símbolos

AC	Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
cm	Centímetro
DIAS	Sistema digital de análise do impulso
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
f.e.m.	Força eletromotriz
f.m.m.	Força magnetomotriz
g/m^3	Grama por metro cúbico
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt-ampere
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LI	Lightning Impulse
m	Metro
mbar	Milibar
mm	Milímetro
mm^2	Milímetro quadrado
s	Segundo
SiC	Carboneto de Silício
TET	Trabalhos em Tensão
V	Volt
ZnO	Óxido de Zinco
μs	Microsegundo
$^{\circ}C$	Graus Celsius

δ	Densidade relativa do ar calculada
ϵ_0	Permeabilidade elétrica relativa
h	Humidade absoluta calculada
h_0	Humidade absoluta de referência
$h\%$	Humidade relativa medida
k_1	Coefficiente de correção da densidade do ar
k_2	Coefficiente de correção da humidade do ar
K_t	Coefficiente de correção da tensão de disrupção calculado
L	Distância mínima do arco
O_1	Origem virtual de uma onda de impulso
p	Pressão atmosférica absoluta medida
p_0	Pressão absoluta de referência
t	Temperatura medida
T	Intervalo de tempo entre os instantes em que a onda de impulso atinge 30% e 90% do valor de pico
t_0	Temperatura de referência
T_1	Tempo de frente de uma onda de impulso
T_2	Tempo de cauda de uma onda de impulso
U	Valor de tensão a aplicar corrigido em função das condições atmosféricas presentes
U_0	Valor de tensão de ensaio estipulada
U_{50}	Valor de tensão cuja probabilidade de disrupção é igual a 50%

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

Os transformadores são máquinas elétricas que alteram, à saída, os valores de tensão e corrente da energia elétrica em corrente alternada de entrada, mantendo-se o valor da potência. Caso provoquem um aumento do valor da tensão, designam-se transformadores elevadores, caso contrário, dá-se o nome de transformadores abaixadores.

Assumiram, desde cedo, uma elevada importância no desenvolvimento das redes elétricas, uma vez que permitem uma grande economia no transporte de energia elétrica, tornando-se, dessa forma, absolutamente indispensáveis nas mesmas. Essa economia é conseguida de duas formas que advêm do princípio de que para o mesmo valor de potência, quanto mais elevado for o valor da tensão, menor será o da corrente. Assim, realizando o transporte de energia elétrica com valores de tensão muito elevados, é possível, por um lado, reduzir a secção dos cabos condutores e, conseqüentemente, o seu custo, e por outro lado, reduzir as perdas nas linhas, as quais dependem diretamente do valor da intensidade da corrente.

Tendo em conta a importância deste equipamento numa rede elétrica, é importante que a sua taxa de avarias seja a mínima possível. Torna-se imperativo que sejam bem dimensionados e fabricados, diminuindo, assim, a possibilidade da sua saída de serviço, algo que pode acarretar elevados encargos. Ainda, interessa ter conhecimento das principais causas de avaria, como diagnosticá-las e quais as suas conseqüências, podendo, dessa forma, evitá-las, ou pelo menos reduzir a deterioração do transformador, e, finalmente, como proteger o equipamento.

Neste contexto, alguns tipos de avarias, nomeadamente por defeitos no fabrico ou montagem dos transformadores, podem ser detetados ainda antes dos mesmos serem comercializados. São, assim, sujeitos a uma panóplia de testes de rotina com o intuito de verificar se se encontram em plenas condições de funcionamento, testes esses realizados na própria fábrica ou em laboratórios independentes.

Enquanto entidade independente, é necessário criar no Laboratório de Alta Tensão da FEUP condições para que sejam alargadas as suas áreas de atuação. Após a realização da presente dissertação, pretende-se que seja possível o LAT fazer a análise dielétrica de transformadores de

potência, efetuando, para tal, os ensaios necessários.

A realização desses ensaios deve respeitar as diretrizes impostas nas normas internacionais referentes ao equipamento em questão, pelo que é indispensável fazer um estudo cuidadoso das mesmas, percebendo precisamente quais os materiais necessários, os esquemas de montagem e procedimentos a utilizar.

No presente trabalho pretende-se caracterizar o desempenho de um transformador de potência da empresa EFACEC, mais particularmente, confirmar os seus níveis de isolamento, através dos ensaios dielétricos passíveis de ser realizados no LAT. Com essa finalidade, é feita uma revisão bibliográfica acerca do funcionamento dos transformadores e seus aspetos construtivos, as suas causas prováveis de avarias e sistemas de proteção dos mesmos.

Para que os ensaios decorressem dentro do estipulado, foi feita, antecipadamente, uma familiarização com o LAT, realizando um estudo sobre os equipamentos lá presentes, bem como o seu funcionamento.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em 7 capítulos.

Após terem sido apresentadas as motivações e objetivos da dissertação, são descritos no capítulo 2 os aspetos construtivos dos transformadores, os seus princípios de funcionamento e uma ligeira abordagem aos transformadores trifásicos.

No capítulo 3 é feita uma descrição sobre os métodos de deteção de avarias nos transformadores mais comuns hoje em dia, e é realizada uma compilação dos principais sistemas de proteção dos mesmos.

O capítulo 4 descreve o Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, bem como o seu equipamento e respetivo funcionamento.

No capítulo 5 são apresentadas as normas internacionais segundo as quais os ensaios dielétricos foram realizados, bem como os respetivos esquemas de montagem e procedimentos.

O capítulo 6 dedica-se à realização dos ensaios dielétricos, à apresentação dos seus resultados e à análise crítica dos mesmos.

Finalmente, no capítulo 7 são discutidas as conclusões que puderam ser retiradas da análise dos resultados obtidos nos ensaios ao transformador Ainda, foram descritos possíveis trabalhos futuros que podem ser efetuados no LAT.

Capítulo 2

Transformadores

Existem três tipos de máquinas elétricas: motor, gerador e transformador. Enquanto o primeiro permite transformar energia elétrica em energia mecânica, o segundo realiza o inverso. Por outro lado, um transformador possibilita a alteração dos valores de tensão e corrente da energia elétrica em corrente alternada de entrada, obtendo à saída uma elevação ou redução dos mesmos, em função do seu propósito.

Os transformadores mostraram-se, desde logo, indispensáveis no desenvolvimento das redes elétricas, já que possibilitam uma elevada redução de encargos no transporte de energia elétrica. Sabendo que a potência de entrada e saída dum transformador é a mesma, aumentando-se o valor da tensão reduz-se o valor da corrente, o que permite diminuir a secção dos condutores e, conseqüentemente, o seu custo, e reduzir as perdas nas linhas, as quais dependem diretamente do valor da intensidade da corrente.

2.1 Aspetos Construtivos

Um transformador é constituído por:

- Circuito magnético;
- Enrolamentos;
- Terminais de ligação;
- Sistema de isolamento e Sistema de refrigeração;
- Outros elementos construtivos.

2.1.1 Circuito Magnético

O sistema que forma o circuito magnético denomina-se núcleo do transformador. Na generalidade dos casos, o núcleo é laminado o que permite reduzir as correntes parasitas, podendo as chapas ser ferromagnéticas ou de materiais amorfos. É constituído por colunas, onde se dispõem

os enrolamentos, e pelas colaças. Tendo em consideração a posição relativa do núcleo e dos enrolamentos, os transformadores podem ser do tipo Coluna ou Couraçado, como se pode observar nas figuras 2.1 e 2.2, respetivamente.

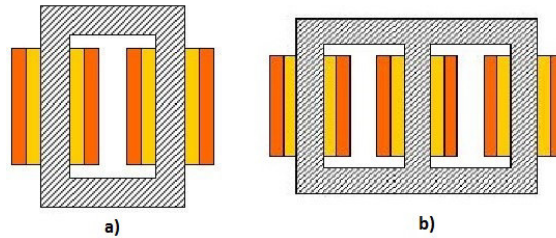


Figura 2.1: Transformador do tipo Coluna: a) monofásico ; b) trifásico. [1]

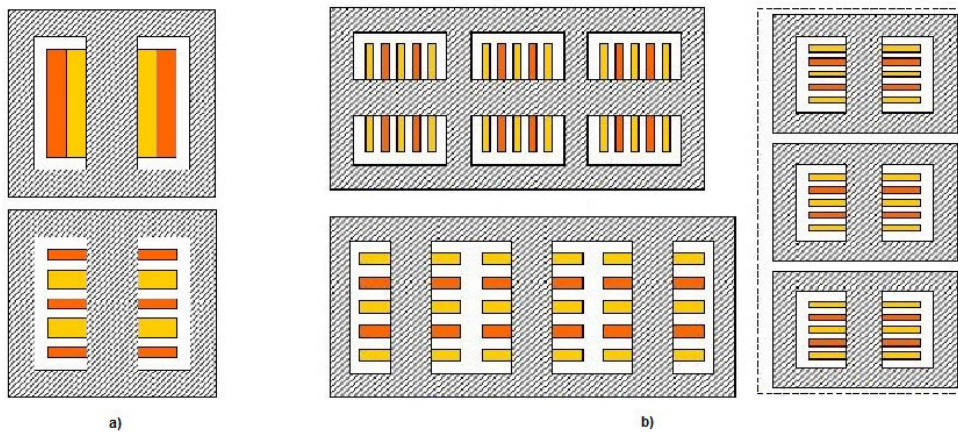


Figura 2.2: Transformador do tipo Couraçado: a) monofásico ; b) trifásico. [1]

À união entre as colunas e as colaças denomina-se junta. De forma a minimizar a relutância do circuito magnético, esta deve ter a mínima espessura possível, podendo ser:

- Plana;
- Imbricada reta clássica;
- Imbricada clássica, montagem de topo, com canto a $45/45^\circ$ (eventualmente $30/60^\circ$);
- Imbricada, montagem do tipo "step lap", com canto a $45/45^\circ$.

Verifica-se que que a junta tipo "step lap" apresenta um melhor desempenho, comparando com a junta imbricada normal, uma vez que reduz as perdas magnéticas até um valor máximo de 10% e reduz, também, a componente magnetizante da corrente em vazio até 50% [1].

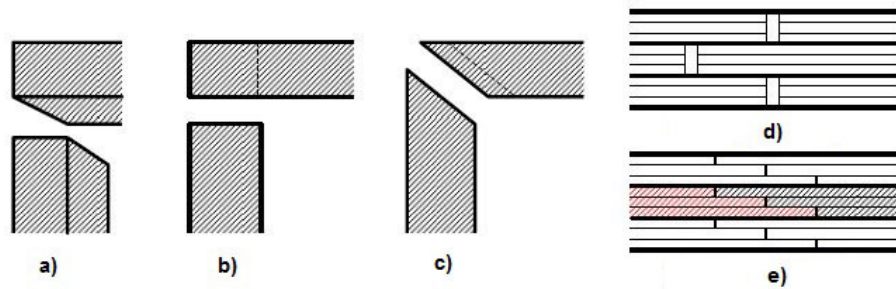


Figura 2.3: Juntas: a) plana ; b) imbricada reta clássica ; c) imbricada clássica, montagem de topo; d) imbricada clássica, montagem de topo ; e) imbricada, montagem do tipo "step lap". [1]

2.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos podem ser fios, barras ou bandas de cobre ou alumínio. Constituem o circuito elétrico do transformador e segundo a disposição relativa entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, as bobinas podem ser concêntricas ou alternadas. [2] Dá-se o nome de primário ao enrolamento através do qual é efetuada a alimentação e secundário ao outro.

2.1.3 Terminais de ligação

Os terminais de ligação são constituídos por cobre e encontram-se afastados do molde para assegurar um isolamento elétrico eficaz entre si. Incorporam os isoladores de travessia, que serão tanto maiores quanto maior for o nível de tensão, daí que se distingam os de AT e BT pela respetiva altura. [2]

2.1.4 Sistema de isolamento e Sistema de arrefecimento

Tomando consciência da inevitabilidade do aquecimento de qualquer máquina elétrica durante o seu funcionamento, torna-se imprescindível dotar um transformador de um sistema de arrefecimento ou refrigeração apropriado, evitando, assim, que se atinjam temperaturas tais que afetem os isolamentos dos enrolamentos.

Em máquinas de pequenas potências que, por consequência, produzem menos calor (comparativamente com as de grandes potências), este consegue ser escoado pelas superfícies da primeira, sendo, então, um transformador a seco. Por outro lado, nas máquinas de potências mais elevadas, é utilizado um meio refrigerante, o óleo, que tem uma dualidade de funções, garante o arrefecimento e o isolamento do transformador. Têm a designação de transformadores a óleo.

A envolver os enrolamentos é utilizado um papel isolante, que constitui o isolamento sólido do transformador. O processo de envelhecimento do óleo ocorre devido às temperaturas elevadas, à humidade - proveniente da degradação do papel - e ao contacto com o ar, e tem como consequência uma redução das suas propriedades refrigerantes e isoladoras. Para combater essa redução, utilizam-se produtos químicos inibidores e procede-se à colocação de um depósito de expansão no topo do transformador. Este depósito garante que a cuba se encontre repleta de óleo, de forma

a que apenas exista uma pequena superfície de contacto do mesmo com o ar, e, ainda, permite que a máquina "respire". Isto é, quando se dá o aquecimento do óleo, ocorre, naturalmente, uma dilatação do mesmo, o que significa que aquando do seu arrefecimento, haverá a penetração de ar dentro do transformador. Uma vez que a humidade presente no ar é nociva para o óleo, é colocado à entrada do depósito um exsicador. [2,3]

Os tipos de arrefecimento são denominados, segundo as Normas IEC, por 4 letras, as duas primeiras referindo-se à refrigeração interna e as duas últimas à refrigeração externa.

A primeira e a terceira letras dizem respeito à natureza do meio refrigerante e a segunda e quarta letras à natureza da circulação. Por exemplo, ONAN significará que é do tipo Óleo Natural Ar Natural, ONAF será Óleo Natural Ar Forçado. A nomenclatura pode ser consultada na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Símbolos utilizados para indicar os tipos de refrigeração

Natureza do refrigerante	Símbolo	Natureza da circulação	Símbolo
Óleo	O		
Líquido isolante sintético não inflamável	L	Natural	N
Gás	G	Forçada	F
Água	W	Forçada com fluxo de óleo dirigido	D
Ar	A		

2.1.4.1 Transformadores a seco vs Transformadores a óleo [2,4]

Transformadores a seco

Os transformadores a seco são adequados para instalações que requerem um grande nível de segurança, principalmente em indústrias química e petroquímicas, plataformas offshore e locais públicos como hospitais e centros comerciais.

As principais vantagens deste tipo de transformadores são:

- Garantem maior segurança e fiabilidade — não propagam o fogo, não apresentam risco de explosão, são auto-extinguíveis;
- Preservação do meio ambiente — não há vazamento de material inflamável nem contaminante em caso de avaria;
- Manutenção muito rara;
- Facilidade na manutenção;
- Baixo custo de instalação;

- Baixo nível de descargas parciais.

Desvantagens:

- Custo de produção elevado;
- Não são utilizados para grandes potências.

Aplicações:

- Plantas industriais, químicas e petroquímicas;
- Prédios comerciais;
- Hospitais;
- Aeroportos;
- Plataformas offshore.

Transformadores a óleo

Os transformadores a óleo são mais utilizados em transformadores com potências mais elevadas e utilizam no seu sistema de isolamento um fluido que funciona, simultaneamente, como refrigerante, e papel envolvendo e protegendo os enrolamentos.

Vantagens:

- Menor poluição sonora — possuem, em funcionamento, menor nível sonoro;
- Maior economia do espaço — Uma vez que óleo tem uma rigidez dielétrica superior à do ar, é possível construir, para o nível de potência, transformadores a óleo com dimensões mais reduzidas do que um transformador a seco;
- Custo de produção mais reduzido;
- Menores perdas por efeito de Joule.

Desvantagens:

- Maior necessidade de manutenção;
- Maiores perdas constantes;

- Apresenta grandes riscos de incêndio e poluição.

Aplicações:

- Transformadores de maior potência — Transformadores de potência e distribuição.

2.1.5 Outros elementos construtivos

Existem, ainda, outros elementos construtivos que interessa referir:

- Chapa de características — inclui dados de potência e tensão estipuladas, frequência, queda de tensão relativa em curto-circuito, o esquema de conexões internas, a especificação do tipo de transformador, classe de refrigeração, nome do fabricante, série e código. Caso o transformador possua tomadas de regulação de tensão, inclui, ainda, as tensões das diferentes derivações [2];
- Aparelhagem de manobra, regulação e proteção;
- Chassis de apoio;
- Cuba (para transformadores imersos) contendo um líquido ou gás eletro-isolante.

2.2 Princípio de Funcionamento

Considere-se um transformador monofásico com as características representadas na figura 2.4. O enrolamento primário tem N_1 espiras, uma resistência r_1 e reactância x_1 . Da mesma forma, secundário tem N_2 espiras, uma resistência r_2 e reactância x_2 . Ainda, seja Φ o fluxo de indução mútua.

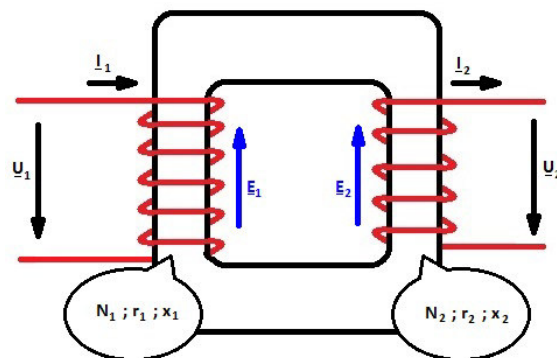


Figura 2.4: Transformador monofásico

A passagem da corrente pelos enrolamentos gerará uma força magnetomotriz e induzirá no núcleo um fluxo de indução magnética. Da variação desse fluxo resultará o aparecimento de uma força eletromotriz segundo a seguinte equação:

$$e = -\frac{\delta\Phi}{\delta t} \quad (2.1)$$

Esta equação respeita as Leis de Faraday e de Lenz, sendo que a primeira afirma que quando existe uma variação do fluxo magnético, é originada uma f.e.m. proporcional a essa variação; e a segunda estabelece que o sentido dessa f.e.m. é tal que a corrente por ela produzida crie um campo magnético que se oponha a essa variação. Isto é, se o fluxo estiver a aumentar, a corrente irá induzir um campo magnético contrário para compensar esse aumento. Se o fluxo estiver a diminuir, a corrente criará um campo magnético no mesmo sentido, de forma a nivelar esse decréscimo. [5]

Quando existem dois circuitos elétricos próximos e o fluxo magnético produzido pela corrente que percorre um deles envolve o outro, observa-se que a variação da corrente num dos circuitos induz uma f.e.m. no outro.

Assim, e respeitando as leis de Kirchhoff, em regime alternado sinusoidal, a equação de tensão no primário é igual a:

$$U_1 = r_1 I_1 + jx_1 I_1 - E_1 \quad (2.2)$$

A equação de tensão do secundário é a seguinte:

$$E_2 = r_2 I_2 + jx_2 I_2 + U_2 \quad (2.3)$$

As f.e.m. determinam-se através das seguintes expressões:

$$E_1 = -j\omega N_1 \Phi \quad (2.4)$$

$$E_2 = -j\omega N_2 \Phi \quad (2.5)$$

Designa-se relação de transformação ao quociente entre as f.e.m. do primário e secundário.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.6)$$

2.2.1 Circuito equivalente de um transformador

O desenvolvimento e elaboração de circuitos que representem perfeitamente uma máquina e o seu funcionamento não é algo recente. O circuito equivalente de um transformador, como se pode

observar na figura 2.5 engloba todos os fenômenos físicos que ocorrem realmente no mesmo, o que permite poder prever a sua resposta a determinadas condições de funcionamento. [2]

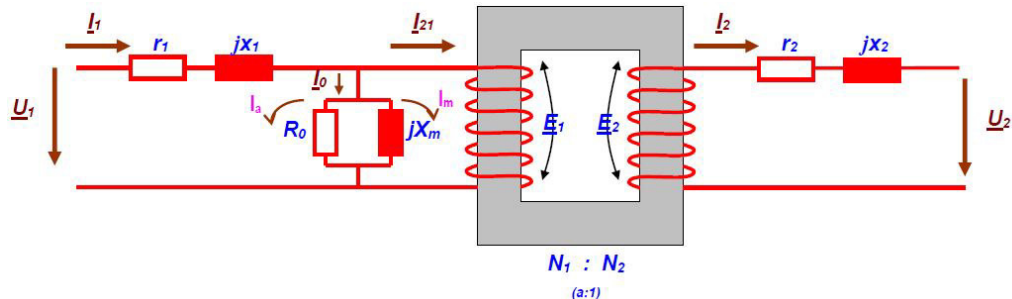


Figura 2.5: Modelo exato de um transformador ideal [1]

Onde:

- r_1 Resistência do enrolamento primário, representando as perdas Joule no primário.
- x_1 Reactância parcial de fugas do enrolamento primário, representando os efeitos do fluxo magnético de fugas do primário.
- r_2 Resistência do enrolamento secundário, representando as perdas Joule no secundário.
- x_2 Reactância parcial de fugas do enrolamento secundário, representando os efeitos do fluxo magnético de fugas do secundário.
- R_0 Resistência associadas às perdas no ferro, representando as perdas no ferro do transformador.
- X_m Reactância de magnetização, representando o fluxo magnético de indução mútua.

Para obter o circuito equivalente de um transformador, começa-se por igualar o número de espiras de ambos os enrolamentos, o que obriga a um ajuste dos valores das grandezas do novo enrolamento, de forma a que o novo transformador seja equivalente ao original. De forma a reduzir o circuito equivalente do transformador ao primário, iguala-se o número de espiras do secundário ao do primário, como se observa na figura 2.6. [2]

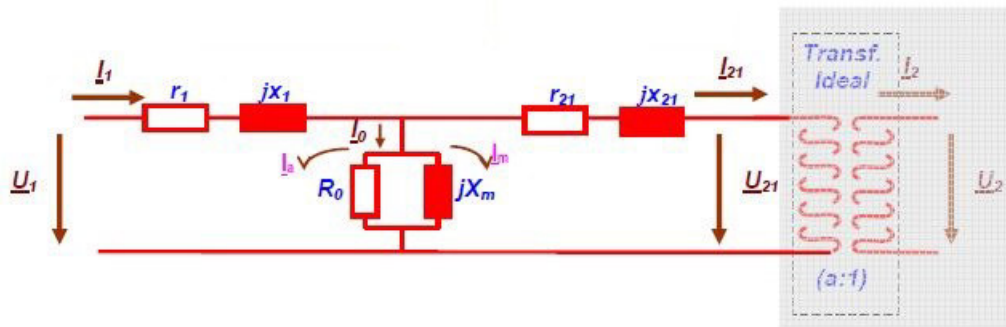


Figura 2.6: Circuito equivalente reduzido ao primário [1]

As diversas grandezas vêm, assim, afetadas de um fator dependente da relação de transformação, da seguinte forma:

$$I_{21} = -\frac{1}{a}I_2 \quad (2.7)$$

$$U_{21} = -aU_2 \quad (2.8)$$

$$r_{21} = a^2r_2 \quad (2.9)$$

$$x_{21} = a^2x_2 \quad (2.10)$$

É possível realizar um estudo paralelo a este, reduzindo o circuito equivalente do transformador ao secundário. Para isso, iguala-se o número de espiras do primário ao do secundário e ajusta-se os valores das grandezas utilizando equações análogas às primeiras.

2.3 Transformadores Trifásicos

A transformação das tensões e correntes nos sistemas trifásicos pode ser alcançada de duas formas, através de um transformador trifásico ou de um banco de três transformadores monofásicos.

A primeira forma consiste em utilizar apenas um núcleo magnético com três colunas onde se encontrarão os enrolamentos primário e secundário de cada uma das fases, como se pode observar na figura 2.7.

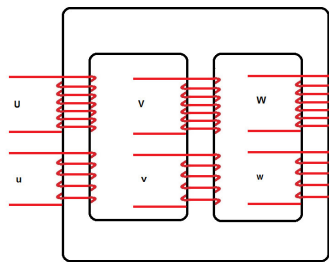


Figura 2.7: Transformador trifásico

A segunda consiste em utilizar um transformador monofásico em cada uma das fases, dando origem a circuitos magnéticos independentes, como é visível na figura 2.8.

As vantagens da unidade trifásica são [1]:

- Menor peso e volume;
- Menor atravancamento;
- Maior facilidade de manobra.

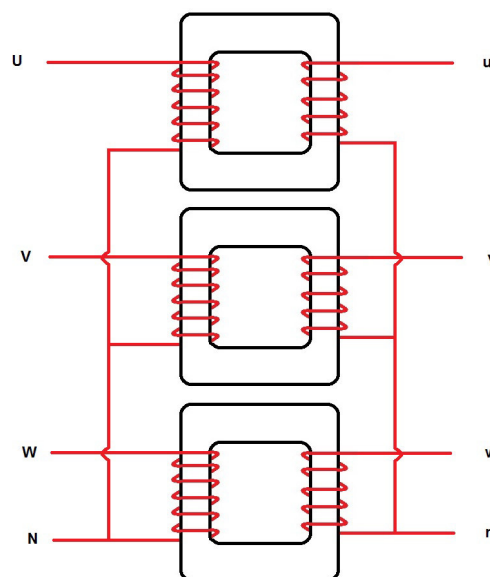


Figura 2.8: Exemplo de um Banco de transformadores

As vantagens do banco de transformadores monofásicos são [1]:

- Maior facilidade de transporte — uma vez que cada unidade monofásica é mais leve e ocupa menos espaço que a unidade trifásica e as três unidades podem ser transportadas separadamente;

- Menor preço de troca e reparações, por unidade — em caso de avaria, é possível trocar-se apenas a unidade avariada, em vez de todo o sistema, resultando num custo mais reduzido.

As ligações entre os enrolamentos podem ser feitas em estrela (com ou sem neutro), em triângulo ou em zig-zag (com ou sem neutro).

Verifica-se que para estabelecer as ligações em estrela e em triângulo se utiliza o mesmo volume de cobre, sendo na ligação em triângulo o comprimento maior e a secção menor do que na ligação em estrela. Uma vez que para a ligação zig-zag é necessário mais cobre, esta apresenta-se mais cara e, na prática, só é utilizada nos enrolamentos de mais baixa tensão, para tensões nominais abaixo dos 500 V, geralmente no enrolamento BT de alguns transformadores de distribuição. A ligação em estrela, por implicar menor tensão por enrolamento, é ideal para tensões nominais superiores a 20 kV. A ligação em triângulo utiliza-se, preferencialmente, em enrolamentos de potências elevadas e tensões razoáveis, uma vez que é possível aplicar uma secção menor, reduzindo o respetivo custo. Nos restantes casos, a escolha entre ligação em estrela ou em triângulo é indiferente. [1]

A ligação em estrela é representada por um "y", a ligação em triângulo por um "d", a ligação em zig-zag por um "z" e a existência de neutro pela letra "n". Veja-se que, fazendo referência ao enrolamento primário, a letra representativa da respetiva ligação deve ser maiúscula, sendo, por sua vez, a do secundário minúscula. Ainda, se a ligação em estrela ou em zig-zag possuir neutro, também a sua letra será maiúscula ou minúscula, caso se refira ao enrolamento primário ou secundário, respetivamente.

Alguns tipos de ligação podem introduzir um desfasamento entre as tensões simples do primário e secundário, desfasamento esse que ocorrerá sempre em múltiplos de 30° . Definindo a referência de fases na vertical orientado de baixo para cima, coincidente com o fasor de tensão simples do enrolamento de AT, é possível estabelecer-se uma relação entre a posição do fasor da tensão simples da mesma fase mas do enrolamento de BT, com as horas num relógio analógico, daí representar-se o desfasamento por um índice denominado Índice horário. [1]

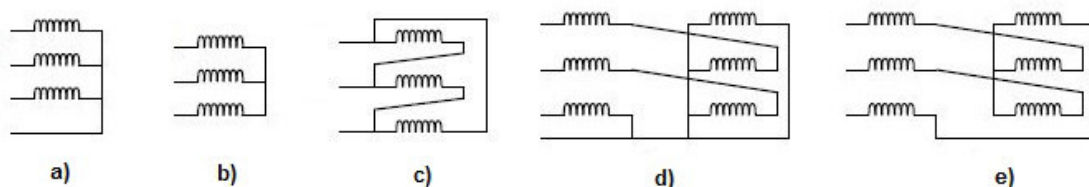


Figura 2.9: Tipos de ligações dos transformadores trifásicos: a) estrela com neutro ; b) estrela sem neutro ; c) triângulo ; d) zig-zag com neutro ; e) zig-zag sem neutro. [1]

2.4 Tipos de Transformadores

Os transformadores podem ser divididos em transformadores de potência e transformadores de medida.

Os transformadores de potência mantêm a potência constante do primário para o secundário, alterando a amplitude da tensão. Mediante a sua finalidade, são atribuídos diferentes nomes aos transformadores de potência, distinguindo-se os transformadores de potência e os transformadores de distribuição. Um transformador de potência da empresa EFACEC poderá atingir tensões na ordem de grandeza dos 525 kV, enquanto que um transformador de distribuição não ultrapassará os 36 kV. Os transformadores de distribuição são transformadores abaixadores de tensão, que se destinam à distribuição da energia elétrica ao consumidor final, isto é, têm como objetivo reduzir o nível de tensão para valores adequados para uso doméstico, comercial ou industrial. Nesta categoria, incluem-se, ainda, os autotransformadores (monofásicos ou trifásicos).

Os transformadores de medida incluem os transformadores de tensão e de intensidade. Ambos produzem tensão e corrente, respetivamente, no secundário proporcional à do primário. A diferença entre um transformador de potência e de tensão é que o último só funciona com um valor muito baixo de corrente. [6]

Capítulo 3

Avárias e Proteção de Transformadores

O conhecimento das principais causas de avaria que ocorrem nos transformadores e dos respectivos métodos de diagnóstico torna-se bastante importante na maximização da vida útil destas máquinas, bem como na sua fiabilidade, na medida em que permite criar uma estratégia de deteção e manutenção adequada ao equipamento, o que permite, ainda, prevenir e evitar o aparecimento do mesmo tipo de avarias em unidades similares. [7]

Assim, neste capítulo são identificadas, inicialmente, as principais causas prováveis de avarias dum transformador de potência, fazendo-se, de seguida, uma abordagem aos diversos métodos de deteção das mesmas e dos sistemas de proteção utilizados.

3.1 Avárias

A taxa de avarias de um transformador, tal como para tantos outros componentes eletrónicos, pode ser representado pela vulgarmente chamada curva da banheira, como se pode observar na figura 3.1. Nesta curva, é possível reconhecer-se três períodos distintos: a infância, a vida útil e a velhice.

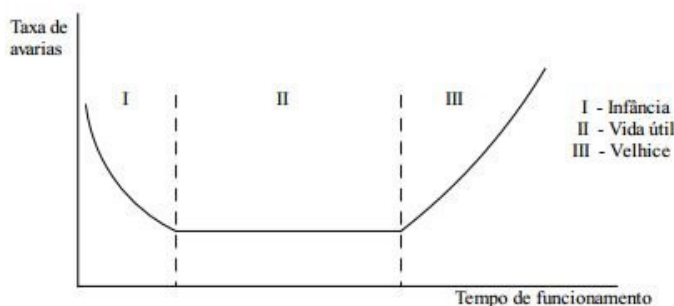


Figura 3.1: Taxa de avarias dum transformador, em função do tempo de funcionamento [7]

No primeiro período, designado "Infância", verifica-se que inicialmente a taxa de avarias é bastante elevada, mas diminui muito rápida e significativamente. Durante a infância, as avarias devem-se, principalmente, a defeitos de fabrico, montagem, instalação ou erros no projeto.

Durante a "Vida Útil", a taxa de avarias estabiliza num valor constante. Neste período, as avarias são de origem externa, nomeadamente erros de manutenção e operação.

Finalmente, na "Velhice", a taxa acentua-se como consequência do desgaste e fadiga do equipamento. [7]

O tempo de vida útil dum transformador é determinado pelo seu sistema de isolamento, constituído pelo óleo e pelo papel isolante que envolve os enrolamentos. Se, por um lado, o óleo é facilmente substituído, o mesmo não se verifica com o papel isolante, sendo, portanto, a sua preservação da maior importância.

Existem vários fatores que podem afetar e acentuar a degradação do papel isolante de um transformador, tais como os esforços térmicos, mecânicos e elétricos a que está sujeito ao longo dos anos.

Podem ser definidas três etapas no processo de degradação do papel: [8]

- Primeiro ocorre o envelhecimento térmico, que pode decorrer durante largos anos e que vai reduzindo a sua rigidez mecânica. Quando são atingidas temperaturas elevadas, o papel perde elasticidade, ficando mais vulnerável a ruturas quando sujeitas a esforços mecânicos. Verifica-se que a um aumento de 6°C na temperatura corresponde uma duplicação da velocidade de degradação do isolante sólido. [9];
- Os esforços mecânicos a que este está sujeito, por exemplo aquando do transporte do transformador e das suas vibrações, vão reduzindo a rigidez mecânica e dielétrica do isolante; [7];
- Por fim, a terceira etapa corresponde à disrupção do papel, que pode ser estimulada por um esforço externo, como por exemplo uma descarga atmosférica ou um curto-circuito externo [7].

O processo de envelhecimento do isolante sólido é acelerado pelo aumento da temperatura e pelo seu contacto com oxigénio e humidade [7].

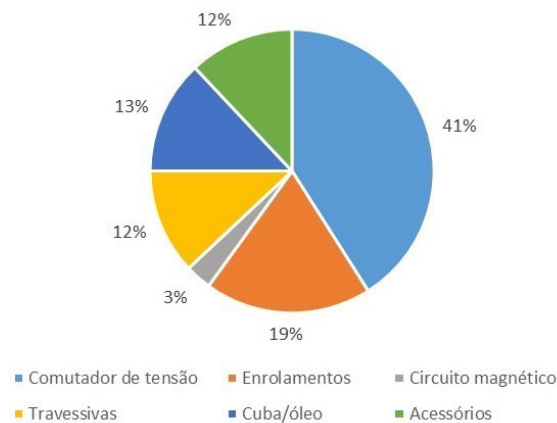
Por um lado, aquando da degradação térmica do papel, são libertados diversos fluidos como óxidos de carbono e hidrogénio, água e compostos furânicos. [7] Por outro lado, o contacto duma molécula de água com um monómero de glucose na molécula de celulose do papel, dará origem a uma nova molécula de água. Por sua vez, essa nova molécula de água entrando em contactando com outro monómero de glucose formará mais uma molécula de água e assim sucessivamente. [10].

Quando a concentração de água no óleo é superior à concentração de saturação e o transformador se encontra em serviço, pode dar-se o aparecimento de descargas parciais, isto é, descargas elétricas que ocorrem apenas numa porção do meio isolante, quer seja fluído ou sólido, as quais contribuem para a degradação do papel e decomposição do óleo, de onde advirá a produção de gases como o hidrogénio. [10]

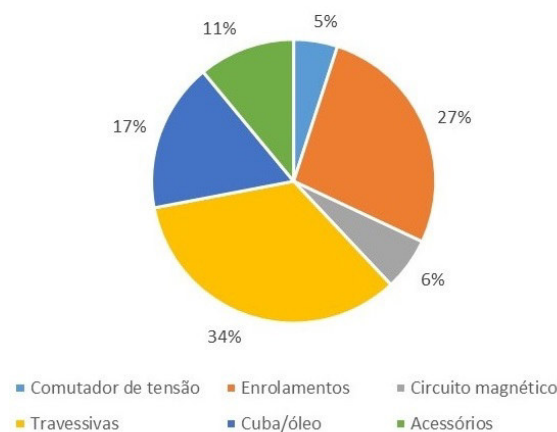
Assim, cria-se um ciclo vicioso: quando ocorre a degradação do isolante sólido é libertada água, que provocará a decomposição do óleo, processo no qual são libertados gases que aceleram a degradação do papel. [11, 12]

A taxa de avarias dos transformadores varia, hoje em dia, entre 1% e 2%. Existem alguns fatores que influenciam este valor, como por exemplo o nível de tensão, potência e a idade do transformador. Verifica-se que à medida que estes fatores aumentam, aumenta, também, a taxa de avarias. [7]

De seguida apresentam-se as distribuições das localizações das avarias em transformadores de centrais sem comutador de tensão em carga, figura 3.2; e em transformadores de subestações com comutador de tensão em carga, figura 3.3.



a)



b)

Figura 3.2: Distribuição de avarias em transformadores: a) de subestações com regulação de tensão ; b) de centrais sem regulação de tensão [13]

Ainda, verifica-se que uma elevada percentagem das avarias se deve a erros de projeto, fabrico e manutenção incorreta. [13, 14]

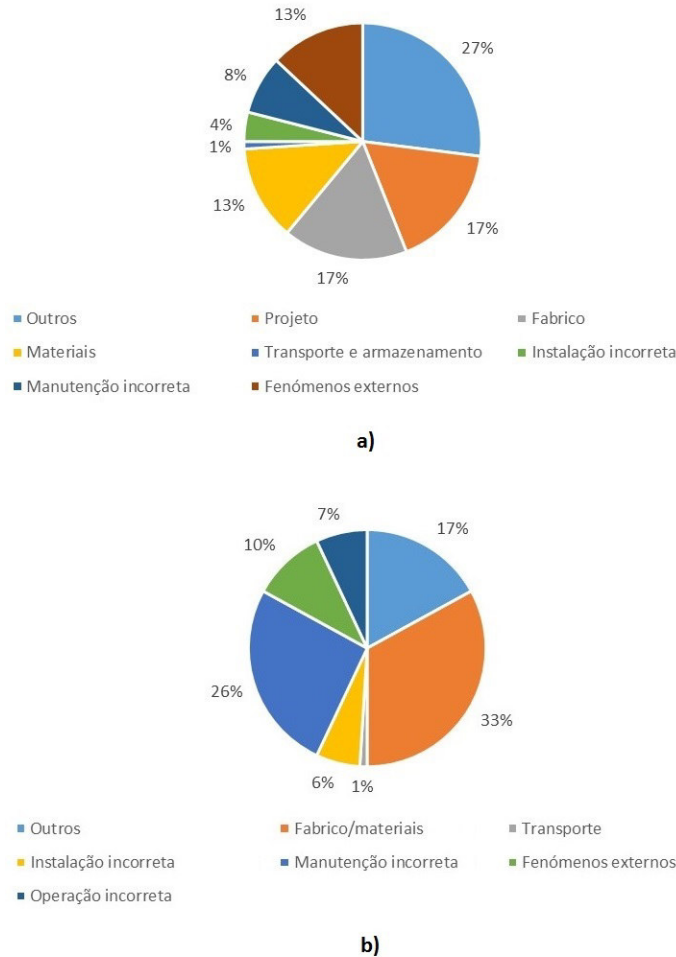


Figura 3.3: Causas das avarias em: a) transformadores de centrais e subestações [13] ; b) transformadores de utilização industrial [14]

3.1.1 Métodos de diagnóstico [7]

Uma vez que a vida útil de um transformador depende, como já foi mencionado acima, do seu sistema de isolamento, torna-se imprescindível ter noção do seu estado. Dessa forma, é possível prevenir determinadas avarias, ou então, caso sejam inevitáveis, saber-se durante quanto tempo o transformador ainda poderá estar em funcionamento.

Existem inúmeros métodos de diagnóstico, alguns já abundantemente utilizados, outros ainda em estudo e desenvolvimento. Entre eles, contam-se os apresentados de seguida.

3.1.1.1 Análise de gases dissolvidos no óleo

As concentrações totais, a proporção relativa e as velocidades de incremento da concentração dos gases libertados durante o envelhecimento térmico do papel isolante e degradação do óleo são fatores que permitem avaliar o estado do transformador. A interpretação dos resultados obtidos na análise não é imediata e exata, depende do técnico que a realiza e é fruto da sua experiência. [7] Geralmente, este tipo de análise é feito anualmente. [15]

3.1.1.2 Análise do óleo

De forma a perceber o estado das características elétricas do óleo e do seu nível de degradação e contaminação, realizam-se testes à rigidez dielétrica, índice de acidez, fator de potência, humidade relativa, cor, teor de partículas, entre outros.

3.1.1.3 Grau de polimerização

Neste teste, é medido o comprimento médio dos polímeros das moléculas de celulose para precisar o grau de degradação do isolante sólido. Para a sua realização é necessário tirar o transformador de serviço e a amostra analisada pode não ser indicativa do verdadeiro estado de deterioração do papel, uma vez que existem zonas mais danificadas que outras. [16]

3.1.1.4 Análise dos compostos furânicos

O grau de polimerização pode, também, ser medido através de cromatografia de alta pressão e alta resolução dos gases furânicos, gases libertados durante a degradação do papel isolante. [17]

3.1.1.5 Resistência de isolamento e índice de polarização

O valor da corrente de fugas no isolamento depende diretamente da resistência de isolamento, daí a importância da sua determinação. Define-se como índice de polarização o quociente entre as resistências de isolamento após 10 minutos e após 1 minuto da aplicação da tensão. Se o isolamento não estiver danificado, primeiramente o valor da resistência será reduzido, aumentando depois com o a diminuição da componente capacitiva da corrente de fugas.

3.1.1.6 Fator de perdas do dielétrico ou $\tan(\delta)$

O fator de perdas do dielétrico é definido como o quociente entre a componente resistiva e a componente capacitiva da corrente de fugas, quando é aplicada uma tensão alternada. Este quociente representa, ainda, a $\tan(\delta)$, sendo δ o ângulo de perdas. Uma vez que o desgaste do isolamento provoca um aumento da componente resistiva da corrente de fugas, se o valor de $\tan(\delta)$ for elevado, quer dizer que haverá problemas com o isolamento.

3.1.1.7 Resistência dos enrolamentos

Este ensaio baseia-se na comparação entre valores da resistência elétrica dos enrolamentos. O valor desta grandeza poderá alterar-se devido a curto-circuitos entre espiras, ligações soltas e desgaste nos contactos do comutador de tensão. Após ter sido feita a devida correção da resistência com a temperatura para um valor padrão, estabelece-se uma comparação com o valor fornecido pelo fabricante ou com a medida de anos anteriores. Se a variação for superior a 2%, admite-se que existe um problema no enrolamento. [15]



Figura 3.4: Degradação do papel por avaria nos enrolamentos do transformador [18]

3.1.1.8 Relação entre espiras

A relação entre espiras deve ser medida para todas as fases e tomadas do regulador de tensão. Se a variação entre o valor obtido e o quociente entre as tensões nominais não for superior a 0.5%, considera-se está dentro da normalidade. Este ensaio permite detetar curto-circuitos entre espiras ou circuitos abertos nos enrolamentos.

3.1.1.9 Temperatura

Serve para determinar a temperatura dos enrolamentos. É medida a temperatura do óleo no topo e no fundo da cuba e afere-se um valor de temperatura dos enrolamentos. Atualmente, esta medida é largamente feita através do uso de câmaras termográficas, não sendo este procedimento intrusivo.

3.1.1.10 Indutância de fugas

Neste ensaio pretende-se determinar o valor da indutância de fugas para avaliar possíveis alterações na geometria dos enrolamentos. Aquando dum curto-circuito, o diâmetro do enrolamento

interior tende a diminuir e do exterior a aumentar, conduzindo a um aumento do fluxo de fugas entre os mesmos e, portanto, a um aumento da reactância de fugas do transformador.

3.1.1.11 Corrente de excitação

A corrente de excitação é determinada realizando um ensaio em vazio monofásico e interessa comparar os resultados obtidos nas três fases do transformador trifásico. Isto permite diagnosticar problemas no circuito magnético do transformador ou nos seus enrolamentos. De salientar que é necessário ter em consideração a posição do comutador de tensão, uma vez que este influencia a amplitude da corrente de excitação. [19]

3.1.1.12 Descargas parciais

Com o desgaste do isolamento, o número de descargas parciais, descargas elétricas de pequena intensidade que não compreende toda a estrutura isolante entre dois condutores, vai aumentando, indicando a sua ocorrência o estado do sistema de isolamento.

3.1.1.13 Análise de resposta em frequência

A função de transferência é obtida estabelecendo a relação entre a saída e entrada dum sistema. Quando a geometria dos enrolamentos é afetada, a resposta sofrerá alterações, pelo que a função de transferência do "sistema" será diferente. Assim, é possível detetar-se que existem problemas nos enrolamentos.

3.1.1.14 Tensão de restabelecimento e correntes de polarização

Neste ensaio o objetivo é avaliar a concentração de água no óleo e o grau de deterioração do isolamento do transformador. Esta avaliação é conseguida, aplicando um impulso de tensão ao isolamento, criando seguidamente um curto-circuito através de uma impedância externa, e analisando o sinal de tensão quando esta é retirada. [11, 16, 20, 21]

3.1.1.15 Diagnóstico de avarias nas travessias e reguladores de tensão em carga

Para realizar diagnóstico de avarias nas travessias, são adaptados alguns ensaios referidos anteriormente, como por exemplo os testes do óleo, temperatura e descargas parciais. Por se localizarem, em parte, no exterior da cuba, estão bastante sujeitas a agentes externos e a sua avaria pode conduzir a incêndios ou mesmo explosão do transformador. Entre as suas avarias mais comuns contam-se as fugas de óleo e o envelhecimento do isolante.

Ao comutador de tensão realizam-se ensaios à sua resistência elétrica, gases dissolvidos no óleo, análise da temperatura, entre outros. Por ser operado através de movimentos mecânicos sofre um grande desgaste, podendo conduzir a avarias.

3.1.1.16 Sistema de monitorização contínua

Hoje em dia já é possível encontrar no mercado sistemas de monitorização contínua que acompanham e supervisionam os valores de determinadas grandezas como os gases dissolvidos nos óleos, humidade, temperatura, intensidade de corrente, tensão, posição do regulador de tensão em carga, entre outros. [15, 22–24] A monitorização destas grandezas é de extrema importância para uma diminuição de indisponibilidades na rede, de manutenção e respetivos encargos.

O preço destes sistemas é, ainda, bastante elevado, rondando os 45000 € [7], pelo que só é utilizado nas unidades de maior importância estratégica da rede elétrica. Por outro lado, acarreta a desvantagem da incompatibilidade com transformadores de fabricantes distintos. [7]

O diagnóstico de avarias e a identificação das suas principais causas apresentam-se, assim, como duas ferramentas importantíssimas na gestão da utilização dos transformadores. Dominando as duas, é possível ter consciência do tempo de vida útil dos transformadores, isto é, quanto tempo ainda estarão em funcionamento, e, ao mesmo tempo, prevenir avarias, reduzindo o número de interrupções de serviço e os custos de manutenção. [7]

Particularmente no caso dos transformadores de distribuição, máquinas relativamente baratas (em comparação com o custo dos ensaios), pequenas e de fácil transporte em caso de avaria, por vezes o diagnóstico de avarias não compensa devido ao seu custo elevado. Pode dizer-se que o custo dos ensaios representa aproximadamente um terço do custo do transformador em si, pelo que por vezes se mostra mais vantajoso trocar o equipamento em vez de fazer o despiste da avaria, isto é, tentar localizar onde esta ocorreu.

3.2 Proteção de Transformadores [25, 26]

As avarias dos transformadores podem ter origens internas, como por exemplo o contacto dos enrolamentos à massa e contacto entre dois enrolamentos, e externas, por exemplo sobrecargas e curto-circuitos externos. Os sistemas de proteção não previnem a avaria em si, uma vez que eles mesmos só atuam quando esta ocorre. Têm, por outro lado, o objetivo de preservar o transformador das suas consequências, que poderiam provocar uma indisponibilidade momentânea ou permanente, sendo, em último caso, necessária a saída de serviço do mesmo.

Particularmente no caso dos transformadores, é possível falar em:

- Proteção de transformadores terra — Utiliza-se este tipo de transformador para criar uma referência de terra nos transformadores de potência. Geralmente é em zig-zag, podendo ou não possuir uma resistência do neutro à terra;
- Proteção do regulador — Atua caso detete um fluxo anormal de óleo dentro da cuba;
- Proteção contra sobretensões;
- Proteção diferencial de transformador;
- Proteção contra sobreintensidades;

- Proteção de Buchholz;
- Imagem térmica;
- Proteção integrada — Combinação entre relé de pressão, relé detetor de gás e relé térmico.

3.2.1 Proteção contra sobretensões

Os transformadores são, por vezes, sujeitos a sobretensões que podem ocorrer devido a descargas atmosféricas ou manobras na rede. Assim, torna-se imperioso dotar as instalações de proteções contra as mesmas. Atualmente, são utilizados, nas redes elétricas, três tipos de dispositivos para este fim:

- Hastes de guarda, figura 3.5;
- Descarregadores de sobretensões de carboneto de silício (SiC), figura 3.6;
- Descarregadores de sobretensões de óxido de zinco (ZnO), figura 3.8.

As hastes de guarda têm como objetivo criar um circuito de escoamento da corrente para a terra, evitando que os altos níveis de tensão verificados danifiquem os isolamentos dos aparelhos e os transformadores. Assim, quando ocorre uma sobretensão, estabelece-se um arco entre as hastes, e a energia acumulada é escoada. Este dispositivo tem a vantagem de ter um preço mais reduzido, quando comparado com os descarregadores. Por outro lado, apresenta uma grande desvantagem relacionada com a variação das características dielétricas do ar. Uma vez que a tensão para a qual o ar é ionizado não tem um valor constante, torna-se difícil realizar um dimensionamento correto e preciso da distância entre as hastes. [27]

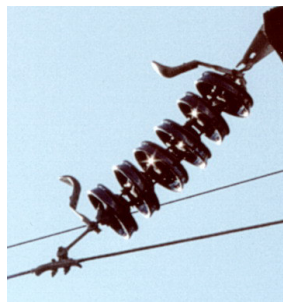


Figura 3.5: Hastes de guarda [28]

Os descarregadores de sobretensões de carboneto de silício consistem numa ligação em série de resistências de SiC e de explosores. Aquando de uma sobretensão, dá-se a disrupção dos explosores e os blocos de SiC são ligados à rede, criando um circuito de ligação à terra de baixa impedância. O arco elétrico criado durante a disrupção dos explosores é dissipado quando a sobretensão é escoada. O envelhecimento e a deterioração dos explosores podem, eventualmente, não permitir que tal aconteça, o que constitui uma desvantagem deste tipo de dispositivos. E,

verifica-se ainda que são bastante sensíveis à poluição que se vai acumulando no seu invólucro. Este tipo de dispositivos já não é usado em instalações novas, utilizando-se apenas descarregadores de sobretensões de óxido de zinco. [27]

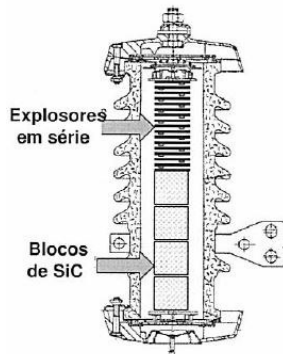


Figura 3.6: Descarregadores de sobretensões de carboneto de silício [27]

Os descarregadores de sobretensões de óxido de zinco são compostos por colunas de pastilhas de ZnO e apresentam uma característica resistiva não-linear, podendo o seu desempenho ser descrito em três regiões:

- Região 1 — o descarregador apresenta uma característica de alta impedância para a tensão à frequência industrial;
- Região 2 — o descarregador inicia o escoamento da corrente para a terra quando a tensão aplicada é superior à estipulada;
- Região 3 — o descarregador apresenta uma característica resistiva não-linear.

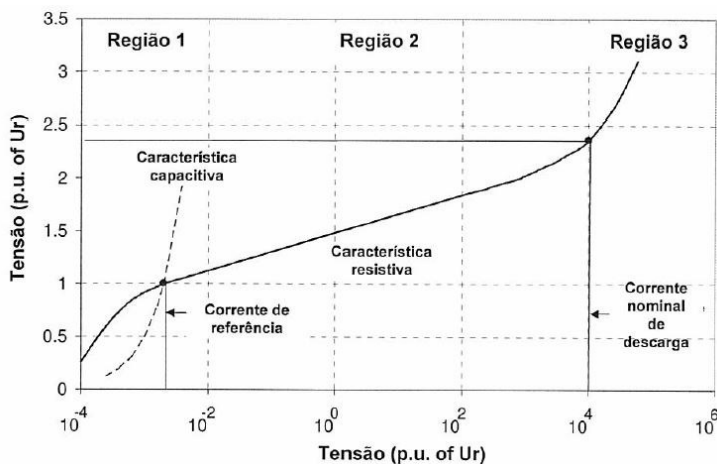


Figura 3.7: Característica resistiva não-linear de um descarregadores de sobretensões de óxido de zinco [27]

As vantagens deste tipo de dispositivo relativamente aos descarregadores de SiC são: [27]

- Construção mais simples, reduzindo a possibilidade de infiltração de humidade;
- Maior capacidade de dissipação de energia;
- Melhores características de proteção, uma vez que a característica não-linear mais acentuada dos descarregadores de sobretensões de ZnO permite eliminar mais eficazmente os explosores;
- Não são sensíveis à poluição.

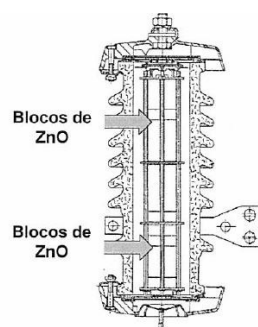


Figura 3.8: Descarregadores de sobretensões de óxido de zinco [27]

3.2.2 Proteção diferencial de transformador

A proteção diferencial destina-se apenas a verificar se a corrente de entrada e de saída são coincidentes. É aconselhável para transformadores trifásicos com potência acima de 1 MVA e apresentam-se economicamente viáveis em transformadores de potência superior a 5 MVA. [25]

Existem dois tipos de relés diferenciais: o amperimétrico e o percentual. O relé diferencial amperimétrico responde instantaneamente quando deteta um valor de corrente acima do estabelecido. É largamente utilizado, no entanto verificam-se determinados erros sistemáticos inerentes ao seu funcionamento, nomeadamente erros de medição nos transformadores de medida que provocam a atuação desnecessária do mesmo. Este problema pode ser eliminado introduzindo uma bobina de restrição ou retenção, como se verifica nos relés diferenciais percentuais. Os últimos foram desenvolvidos especificamente para transformadores com o objetivo de potenciarem o seu desempenho.

3.2.3 Proteção contra sobreintensidades

Existe uma sobreintensidade quando o valor da corrente é superior ao nominal. Isto pode ocorrer devido a sobrecargas, curto-circuitos e defeitos no sistema.

Num transformador, a proteção pode ser feita de duas formas: ou com três relés, um para cada fase, ou com um único relé trifásico. Geralmente, o circuito da proteção inicia-se nos transformadores de medida, que podem ser de tensão ou de corrente, e que se apresentam como uma alternativa economicamente viável à aparelhagem de medida de tensões e correntes de linha. Quando se dá a ocorrência de uma sobrecarga, o relé carregará a bobina de um relé auxiliar, que após um determinado período de tempo retirará o transformador de potência de serviço. [25, 26]

Se o defeito permanecer após a atuação do relé auxiliar, deduz-se que o defeito ocorreu entre o transformador e as buchas de entrada dos disjuntores gerais. De forma a isolar do transformador, usa-se outro relé (temporizador), que é carregado na operação dos relés principais e atua simultaneamente com o auxiliar. [25]

3.2.4 Proteção de Buchholz

O relé de Buchholz, figura 3.9, é largamente utilizado nos transformadores a óleo para os proteger contra defeitos internos. Compreende as funções e vantagens de um relé de pressão e de um relé de detecção de gás: responde celeremente a um aumento da pressão de óleo do transformador, sendo insensível a variações lentas de pressão, trabalha conjuntamente com os relés diferenciais e de sobrecorrente para responder aos defeitos que ocorrem no interior da cuba, e quando é identificada a presença de um gás, é acionado um alarme que previne uma maior deterioração do isolamento, e é feita uma análise ao gás de forma a perceber o tipo do defeito e a quantidade de gás libertado.

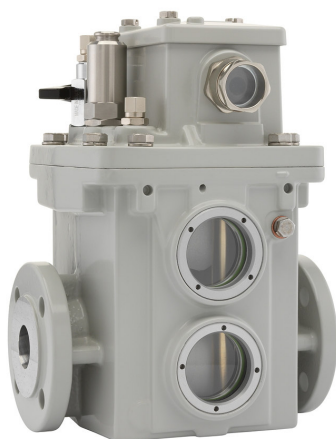


Figura 3.9: Relé de Buchholz da marca Maschinenfabrik Reinhausen [29]

3.2.5 Imagem térmica

Quando um transformador é submetido a sobrecargas prolongadas, verifica-se um aumento da sua temperatura, o que pode provocar danos severos nas propriedades dos isolantes dos enrolamentos. Tendo em vista a proteção desses isolantes, tão importantes para o bom funcionamento e preservação do estado do transformador, utiliza-se o processo da imagem térmica, 3.10, que determina a temperatura através da temperatura do óleo e da corrente de carga do transformador, prevenindo, assim, possíveis estragos.

Quando o termómetro, que se situa no topo do óleo, mede um valor de temperatura acima do desejado, tem capacidade de acionar o alarme, acionar o contacto para ligar os ventiladores ou para ligar as bombas de circulação de óleo.

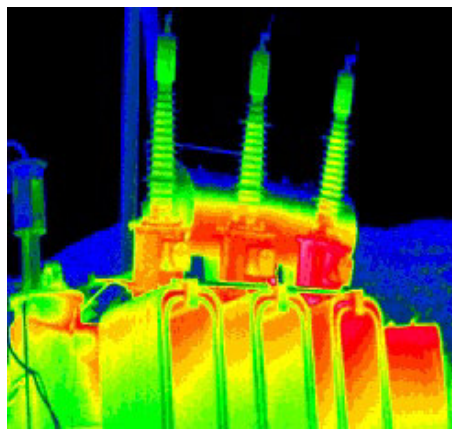


Figura 3.10: Imagem térmica dum transformador [30]

Capítulo 4

Laboratório de Alta Tensão

O Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) surgiu da necessidade de acompanhar o estudo teórico da unidade curricular “Técnicas de Alta Tensão” com trabalhos experimentais que o suportassem. Com o apoio da FEUP e de várias entidades empresariais, concluiu-se a sua construção em 2013. [31]

Hoje em dia, é possível realizar no LAT ensaios à rigidez dielétrica de isoladores, ensaios a seccionadores, cabos, transformadores e celas, e efetuar inspeções periódicas em equipamentos TET. Para tal, devem ser cumpridas as diretrizes impostas nas normas internacionais referentes a cada tipo de ensaio e equipamento. O objetivo será caracterizar os equipamentos, verificando se o seu funcionamento se encontra de acordo com as mesmas.

Neste capítulo será feita uma descrição sobre a constituição do LAT e seus equipamentos, e de que forma é assegurada a segurança durante os ensaios.

4.1 Constituição do LAT

O LAT situa-se no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores e é constituído por 3 salas: sala de ensaios, sala de comando e sala de observação, como se pode observar na figura 4.1.

Na sala de ensaios podem identificar-se quatro zonas distintas: entrada, zona do sistema de choque, zona do sistema de frequência industrial e zona do material de TET, reserva e armazenamento. Existe ainda uma porta de passagem para a sala de comando, onde é feito o controlo dos equipamentos, a medição das grandezas durante os ensaios e se encontra o quadro elétrico. A sala de observação situa-se acima da sala de comando.

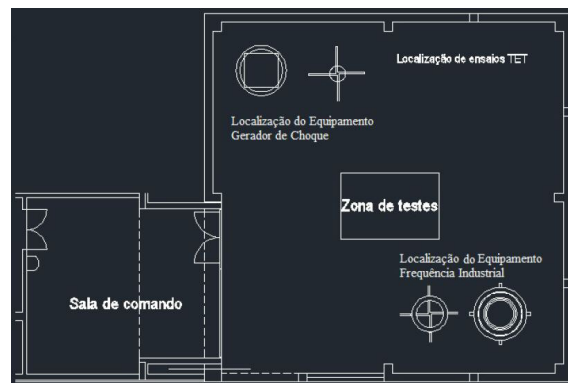


Figura 4.1: Planta da sala de ensaios do LAT [32,33]

4.2 Medidas de Proteção Passiva

Compreendendo os riscos que este tipo de ensaios acarretam, para a sua realização em segurança, foi necessário recorrer a determinadas medidas de proteção passiva.

Em primeiro lugar, foi feita uma blindagem do laboratório, construindo uma gaiola de Faraday. A gaiola tem como objetivo escoar as cargas elétricas para a terra em segurança e é constituída por chapas metálicas de zinco com 1,5 mm de espessura nas paredes, estando estas eletricamente ligadas por soldadura, e 2,5 mm no chão, que se encontram ligadas da mesma forma. Na zona da passagem para a sala de comando, a proteção é feita por uma malha metálica de 5x5 cm. Esta malha permite a visualização dos ensaios quer da sala de comando como da sala de observação. Finalmente, também serve de revestimento para o portão de acesso ao exterior e os rolamentos estabelecem a ligação à terra, como se observa na figura 4.2.



Figura 4.2: Aspetto da malha metálica utilizada para a visualização dos ensaios nas salas de comando e observação e como revestimento do portão de acesso ao exterior

Ainda, foi criado um barramento principal em anel que circunda todo o laboratório, a aproximadamente 20 cm do chão. Está pregado às chapas das paredes através de isoladores orgânicos (figura 4.3a)), e a sua interligação às mesmas é feita através de tranças. Na zona da porta que dá acesso à sala de comando, a interligação é feita no chão e o isolamento conseguido através de uma tinta própria para o efeito (figura 4.3b)).

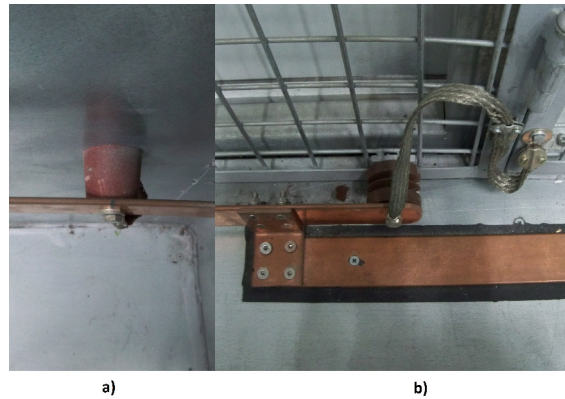


Figura 4.3: a) Isoladores orgânicos de ligação do anel principal às chapas da parede ; b) isolador do anel à malha metálica e tinta isoladora do anel principal às chapas do pavimento

O anel é constituído por barras de cobre, tem de secção 5x50 mm e a sua ligação à terra é estabelecida em 3 pontos distintos, de forma a assegurar a equipotencialização da sala de ensaios, do edifício e do PT que alimenta o laboratório: ligação às fundações metálicas do edifício, sendo a sua impedância sensivelmente igual a $0,7 \Omega$ (medida no Verão); ligação exclusiva à terra exterior do edifício com elétrodo simples; e ligação à terra do PT que alimenta o laboratório. [31,32]

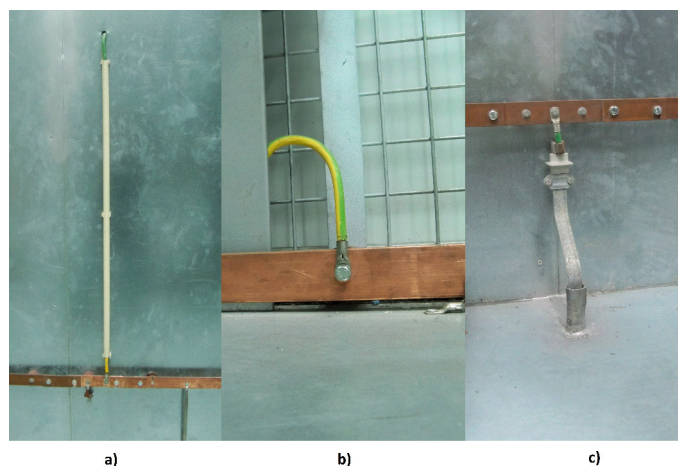


Figura 4.4: Ligação a) exclusiva à terra exterior do edifício com elétrodo simples ; b) às fundações metálicas do edifício ; c) à terra do PT que alimenta o laboratório

Existe, também, outro barramento em anel (chamado secundário) constituído por um cabo de cobre com secção de 10 mm^2 , situado acima do primeiro, que estabelece a ligação de todas

as partes metálicas na parte superior da gaiola. A sua ligação ao principal é feita através de 4 baixadas.

4.3 Medidas de Proteção Ativa

Este tipo de medidas foi implementado por dois motivos: para assegurar a proteção dos utentes do LAT contra erros que eles mesmos possam executar; depois, e pelo facto do LAT não possuir as dimensões necessárias para se realizar simultaneamente ensaios à frequência industrial e ao choque mantendo o espaçamento adequado entre os equipamentos. [31–33]

A proteção referida é conseguida através de relés e contactores que atuam segundo condições lógicas, estando os relés relacionados com os comandos e sensores e os contactores com a alimentação dos equipamentos. [32]

Em primeiro lugar, existem dois sensores, um no portão que dá acesso ao exterior e outro na porta que dá acesso à sala de comando, que impedem a alimentação dos equipamentos caso um deles se encontre aberto ou a interrompem caso um deles seja aberto durante um ensaio.

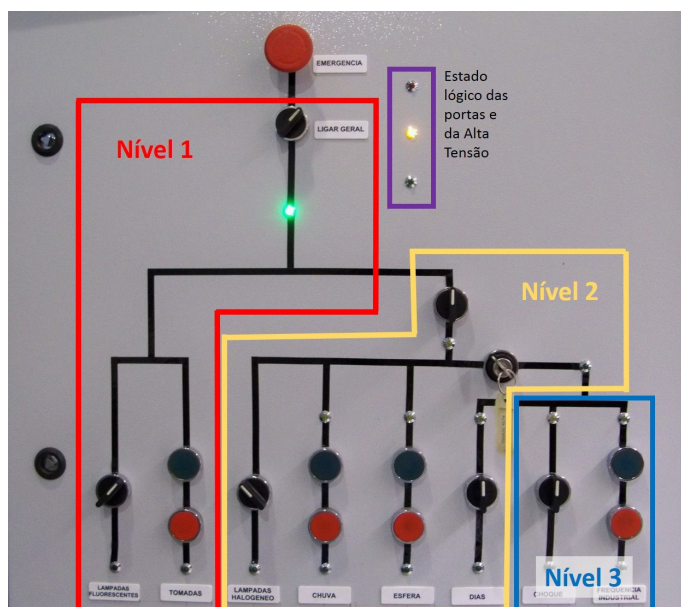


Figura 4.5: Quadro de controlo de equipamentos do LAT e representação dos seus níveis de segurança

Repartiu-se o comando em três níveis de segurança distintos, como se pode ver na figura 4.5. O nível 1 permite apenas o controlo das lâmpadas fluorescentes presentes no teto do LAT e das tomadas da sala de ensaios. Para o seu acionamento não existe a necessidade da porta da sala de comandos ou do portão de acesso ao exterior estarem fechados.

O segundo nível requer que o portão do LAT esteja fechado e que seja ligado um interruptor sem retenção. Assim, é possível ligar as lâmpadas de halógeno distribuídas pelas paredes do

laboratório, as tomadas de acionamento do sistema de chuva artificial e a alimentação da esfera de calibração.

O nível 3 exige que para além do portão do LAT se encontre fechado, seja acionado um interruptor de chave. Caso a porta da sala de comando esteja aberta, apenas é possível ligar o DIAS (Digital Impulse Analyser System). Quando a mesma é fechada, passam a ser executáveis ensaios em tensão, procedendo à alimentação do gerador de choque ou do transformador, mediante o ensaio que se pretende realizar. Como referido anteriormente, a logística da sala de ensaio não permite que ambos funcionem simultaneamente, pelo que quando se aciona um dos sistemas, fica limitado o acionamento do outro. [31–33]

4.4 Equipamentos

4.4.1 Gerador de Impulso

O sistema gerador de impulso (4.6) pretende ensaiar a rigidez dielétrica de diversos equipamentos, produzindo ondas que simulam descargas atmosféricas ou sobretensões de manobra. Este sistema é constituído por um gerador de Marx (gerador de impulso), um retificador de carregamento, um divisor de tensão de impulso, um módulo de controlo e um Sistema Digital de Análise de Impulso (DIAS).

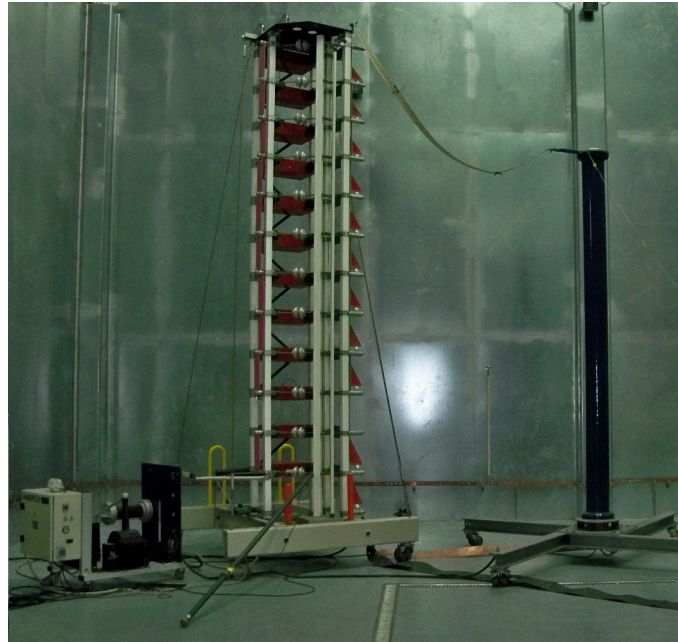


Figura 4.6: Gerador de impulso: à esquerda o retificador, ao centro a torre e à direita o divisor de tensão

O gerador de impulso é composto por uma torre de doze andares, cada um deles possuindo um condensador de $75 \mu\text{F}$, conseguindo armazenar até 100 kV; duas esferas de descarga, cuja

distância definirá a tensão de cada andar; resistências em paralelo, as quais influenciarão a forma da cauda da onda; e resistências em série.

O retificador de carregamento é parte constituinte da unidade de alimentação do gerador de Marx. É alimentada através do quadro de comando do LAT e carrega os condensadores, gerando a alta tensão. É, ainda, possível alterar a polaridade da onda reajustando a posição dos díodos.

O divisor de tensão é ligado à torre através duma resistência que permite a aquisição de valores fidedignos de tempo de frente da onda de impulso. Consiste em vários condensadores em série que transformam a onda de impulso num sinal passível de ser medido.

A unidade de controlo permite definir a tensão armazenada nos condensadores, sendo a distância mínima entre as esferas explosoras dos diversos andares fixada em função desse valor; o seu tempo de carregamento; a polaridade da onda gerada e se o disparo será manual ou automático.

Finalmente, o DIAS (figura 4.7) transmite informação à torre relativa a distância das esferas explosoras; efetua a análise da onda de tensão, designadamente a sua forma de onda, tempos de frente e de cauda e seu valor máximo. [31–33]



Figura 4.7: Sistema Digital de Análise de Impulso

Funcionamento

A tensão por andar é fixada na unidade de controlo, bem como o tempo de carregamento. O DIAS transmite essa informação ao retificador que dá início ao carregamento em paralelo dos condensadores. Uma vez carregados, atuará um trigger, que consiste na injeção de mais 2 kV ao primeiro andar, que provocará uma disrupção controlada entre as esferas explosoras e colocará os condensadores em série. O descarregamento dos mesmos será feito, portanto, também em série, pelo que a tensão máxima de saída será a soma das tensões armazenadas em cada andar. Já que cada andar poderá suportar até 100 kV, o gerador é capaz de produzir ondas com uma tensão

máxima igual a 1200 kV. Caso não se pretenda originar uma onda com este valor de tensão, poder-se-á reduzir o número de andares em funcionamento curto circuitando-se os andares superiores. Ainda, é de referir que para se atingir um determinado valor de tensão de saída, é preferível utilizar-se um número mais reduzido de andares, carregando os condensadores com um valor mais elevado de tensão, já que o rendimento dos condensadores é superior para tensões superiores. [32]

4.4.2 Sistema de frequência industrial

O sistema de frequência industrial (4.8) permite estudar a rigidez dielétrica dum determinado material, realizando ensaios dielétricos que podem ser sob chuva ou a seco. Nestes ensaios, o material é submetido a uma onda sinusoidal de amplitude regulável, sendo os resultados essenciais para efetuar um dimensionamento apropriado dos sistemas de energia e garantir os níveis de segurança necessários à manutenção de equipamentos para trabalhos em tensão. [32]

Este sistema é composto por um transformador de 300 kVA, um divisor, um regulador e um controlador de tensão.



Figura 4.8: Sistema de frequência industrial: à esquerda o transformador e à direita o divisor de tensão

O transformador de 300 kVA é constituído por dois módulos em cascata, da marca Phenix, que juntos conseguem gerar 600 kV para um valor de intensidade de 0.5 A. No entanto, é possível utilizar apenas um deles, atingindo-se 300 kV. A sua alimentação é feita apenas por uma fase à frequência industrial.

O divisor de tensão modifica a tensão à qual o material em ensaio está sujeito, através de vários condensadores, tornando-o num sinal de menor amplitude capaz de ser lido pela aparelhagem de medida. Possibilita, ainda, a ligação a um osciloscópio que permite observar e analisar a forma de onda aplicada ao objeto em questão. [32]

A alimentação do transformador é feita pelo regulador, o qual funciona como um autotransformador. É possível regular a tensão de saída através do controlador (figura 4.9) que se encontra na sala de comando, que possui dois botões de regulação: um de subida e outro de descida.

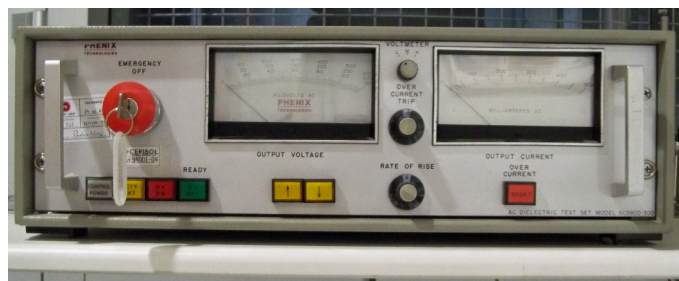


Figura 4.9: Regulador de tensão de saída do sistema de frequência industrial

Finalmente, importa referir um equipamento que não é parte integrante deste sistema, mas é fundamental para uma utilização correta do mesmo. O espinterómetro de esferas vertical tem como objetivo a calibração da aparelhagem de medida, sendo que uma delas se encontra suspensa e é alimentada pelo transformador, e a outra está ligada à terra e é passível de ser deslocada dentro do LAT. Esta calibração é feita periodicamente, de 6 em 6 meses. [32, 33]

Capítulo 5

Ensaio Dielétricos a Transformadores de Potência

Tendo em consideração as capacidades e limitações do LAT, procurou-se realizar diversos ensaios dielétricos a um transformador de distribuição, de acordo com as normas IEC 60060-1 e IEC 60076-3, com o objetivo de comprovar se o comportamento do mesmo se encontra em conformidade com as normas referidas. Verificou-se que seria possível realizar o Ensaio ao Impulso Atmosférico e o Ensaio à Frequência Industrial.

Neste capítulo serão descritas, em detalhe, as implementações dos ensaios dielétricos a realizar, referindo os respetivos esquemas de montagem e procedimentos.

5.1 Ensaio em Alta Tensão

Existe uma série de requisitos gerais para a realização dos ensaios a seco em AT, nomeadamente o posicionamento do objeto em estudo e as condições atmosféricas a que são feitos.

5.1.1 Posicionamento do Objeto em Ensaio

O posicionamento do objeto em estudo pode afetar as características da sua descarga disruptiva. As distâncias a considerar do objeto em estudo, quando ensaiado à frequência industrial, a qualquer outro objeto de diferente potencial, são definidas no gráfico da figura 5.1.

Uma vez que a tensão máxima atingida pelo transformador Phenix é igual a 600 kV, efetuando uma linearização da curva que no início é praticamente uma reta, determina-se que a distância mínima de segurança em torno do transformador e, da mesma forma, em torno divisor de tensão é igual a 2m. Verifica-se ainda que nos ensaios ao choque atmosférico, este valor se mantém, sendo necessário garantir uma distância mínima ao Gerador de Marx e divisor de tensão de 2m de qualquer material a um potencial diferente. [32]

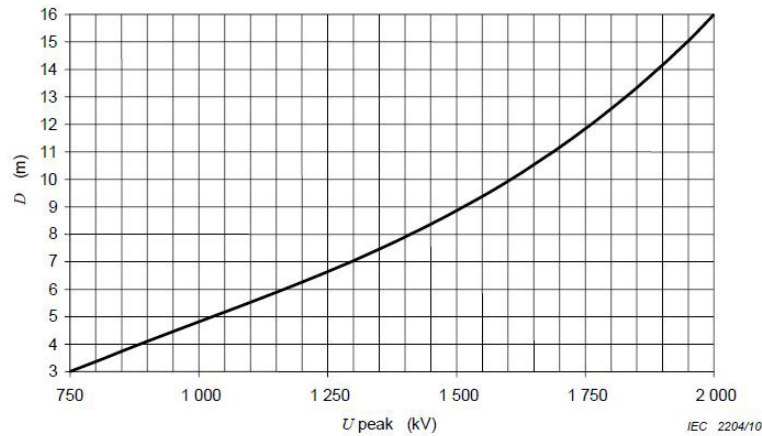


Figura 5.1: Distâncias recomendadas do objeto ensaiado à frequência industrial a qualquer outro objeto com diferente potencial [34]

5.1.2 Correções Atmosféricas

Os valores normalizados para temperatura, pressão e humidade são:

- Temperatura $t_0 = 20^\circ C$
- Pressão absoluta $p_0 = 1013mbar$
- Humidade absoluta $h_0 = 11g/m^3$

Uma vez que também as condições atmosféricas podem afetar as características da descarga disruptiva, os valores de tensão de ruptura obtidos devem sofrer uma correção em função das mesmas, tornando possível estabelecer uma comparação com os valores standard apresentados em cima.

O valor de tensão corrigido em função das condições atmosféricas, U_0 , é igual ao valor medido, U , alterado por um fator K_t .

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (5.1)$$

Este último depende de dois coeficientes k_1 e k_2 que representam fatores de correção da densidade do ar e da humidade, respetivamente.

$$K_t = k_1 k_2 \quad (5.2)$$

O fator k_1 é calculado através da seguinte equação:

$$k_1 = \delta^m \quad (5.3)$$

Sendo δ a densidade relativa do ar e m um expoente que pode ser consultado na tabela 5.1.

$$\delta = \frac{p}{p_o} \frac{273 + t_o}{273 + t} \quad (5.4)$$

A correção é considerada fiável se $0,8 < k_1 < 1,05$. [34]

Ainda, o fator de correção de humidade pode ser obtido através da equação:

$$k_2 = k^w \quad (5.5)$$

Sendo h a humidade absoluta, k pode ser calculado da seguinte forma:

- AC $k = 1 + 0,012(h/\delta - 11)$ para $1g/m^3 < h/\delta < 15g/m^3$
- Impulso $k = 1 + 0,010(h/\delta - 11)$ para $1g/m^3 < h/\delta < 20g/m^3$

Finalmente, o parâmetro g depende do valor de tensão cuja probabilidade de disrupção é igual a 50%, U_{50} , e da distância mínima do arco através do ar, L , em metros, e pode ser definido da seguinte forma:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (5.6)$$

Caso o valor de U_{50} não esteja disponível, admite-se que é igual a 1,1 vezes o valor da tensão de teste, U_0 . [34]

Tabela 5.1: Valores dos expoentes m e w em função do valor de g [34]

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 - 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 - 1,2	1,0	1,0
1,2 - 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2.0	1,0	0

Caso o aparelho de medida presente, apenas, o valor da humidade relativa, $h\%$, é possível estabelecer uma relação entre esta e a humidade absoluta, em g/m^3 :

$$h = \frac{6,11 \times h\% \times e^{\frac{17,6t}{243+t}}}{0,4615 \times (273 + t)} \quad (5.7)$$

5.2 Ensaio à frequência industrial

A tensão aplicada nos ensaios à frequência industrial deve ser aproximadamente sinusoidal, com um valor de frequência entre os 45 Hz e os 65 Hz e a diferença entre os valores máximos positivo e negativo não deve exceder os 2%. [34]

Inicialmente, o valor da tensão aplicada deve ser baixo, de forma a evitar possíveis efeitos de sobretensões, por aparecimento de transitórios. Deve aumentar-se esse valor lentamente, de tal maneira que seja perceptível a sua leitura nos instrumentos de medição e que não provoque uma solicitação elétrica prolongada desnecessária no objeto de ensaio. Usualmente, após atingir-se o valor correspondente a 75% da tensão de teste, provoca-se uma elevação de 2% da mesma por segundo. A duração dos ensaios é especificada nas normas que dizem respeito ao objeto em ensaio. Caso não seja identificado nenhum período de tempo, admite-se que é igual a 60s. [34]

Existem dois tipos de ensaios passíveis de ser realizados à frequência industrial:

Teste com descarga disruptiva

Neste tipo de ensaio, aumenta-se a tensão até ocorrer uma descarga disruptiva, repetindo o ensaio tantas vezes quantas for indicado nas normas correspondentes ao objeto em estudo. O objetivo deste teste é determinar o valor de tensão a partir do qual ocorre uma descarga disruptiva no equipamento em ensaio. [34]

Teste de resistência à tensão estipulada

Neste tipo de teste, procura-se verificar se o objeto em ensaio consegue resistir a um determinado valor de tensão. O equipamento deve ser submetido a esse valor durante 60s e o ensaio é bem sucedido se durante esse período de tempo não ocorrer uma descarga disruptiva. Depois, a tensão deve ser diminuída rapidamente, ser cortada repentinamente, de forma a não originar transitórios que deteriorem o equipamento. [34]

5.2.1 Ensaio com tensão AC induzida de curta duração em transformadores de potência [35]

Este ensaio é um teste de resistência à tensão estipulada. Geralmente, o seu valor é fornecido na chapa de características do equipamento, no seu nível de isolamento a seguir à indicação "AC" para ambos os lados de Alta e Baixa Tensão. Caso não seja fornecido, deve ser consultada a tabela presente na figura 5.2, adaptada das Normas IEC 60076-3.

Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s.	Rated lightning impulse withstand voltage kV peak	Rated short duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s.
3,6	20	10
7,2	40	20
12	60	28
17,5	75	38
24	95	50
36	125	70
	145	
	170	

Figura 5.2: Tensões suportáveis estipuladas para enrolamentos de transformadores com tensão máxima inferior a 170kV. [35]

Os esquemas de montagem dos circuitos para os ensaios aos lados de Alta e Baixa Tensão são os seguintes:

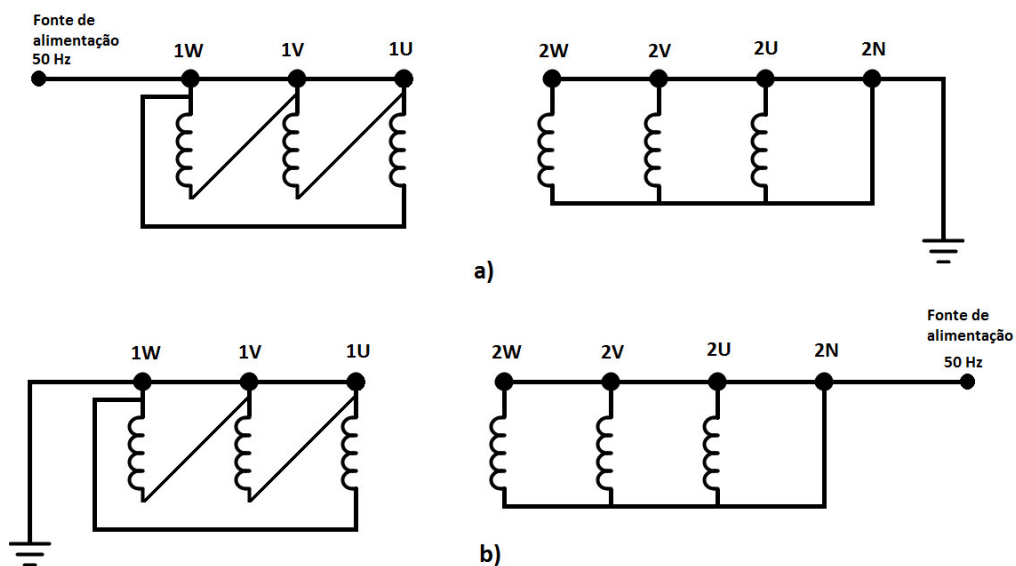


Figura 5.3: Esquema de montagem para o ensaio com tensão AC induzida de curta duração ao enrolamento: a) AT de um transformador de potência ; b) BT de um transformador de potência

5.3 Ensaio ao impulso atmosférico

A onda de impulso pretende simular o desempenho duma descarga atmosférica, sendo o objetivo deste ensaio perceber quais os seus efeitos no equipamento. É uma onda aperiódica que cresce muito rapidamente até ao valor de pico, decrescendo até zero de forma mais lenta. [34] Na figura 5.4 é possível observar-se a sua forma de onda típica.

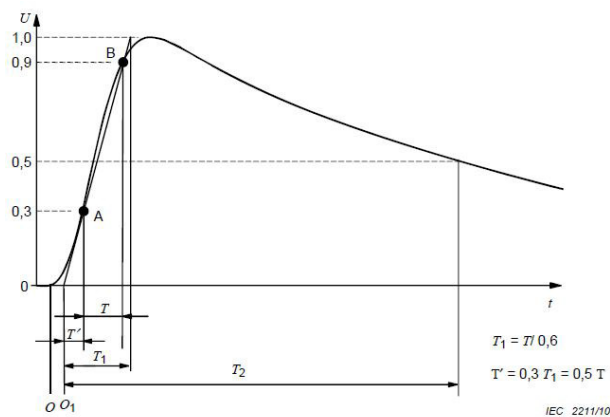


Figura 5.4: Onda de impulso completa [34]

Seja T o intervalo de tempo entre os instantes em que a onda atinge 30% e 90% do valor de pico. Define-se tempo de frente, T_1 , como o quociente entre T e a constante 0,6. Para que se trate de uma onda de impulso atmosférico, o seu valor terá de ser inferior a $20 \mu\text{s}$. Linearizando estes dois pontos, obtém-se uma origem virtual, O_1 , quando a reta intersecta o eixo dos tempos. O tempo de cauda, T_2 , é o intervalo de tempo compreendido entre a origem virtual e o instante em que a tensão de teste, quando está a decrescer, é igual a 50% do seu valor de pico. [34]

Será visível uma forma de onda completa se não houver uma disrupção no objeto durante o ensaio. Isto quer dizer que os tempos de frente e cauda obtidos estarão de acordo com o dimensionamento efetuado. [32] Caso haja disrupção, o impulso de tensão será cortado, passando o seu valor a ser igual a zero. Note-se que o corte pode ocorrer na subida, no pico ou na cauda da onda, como se pode observar na figura 5.5.

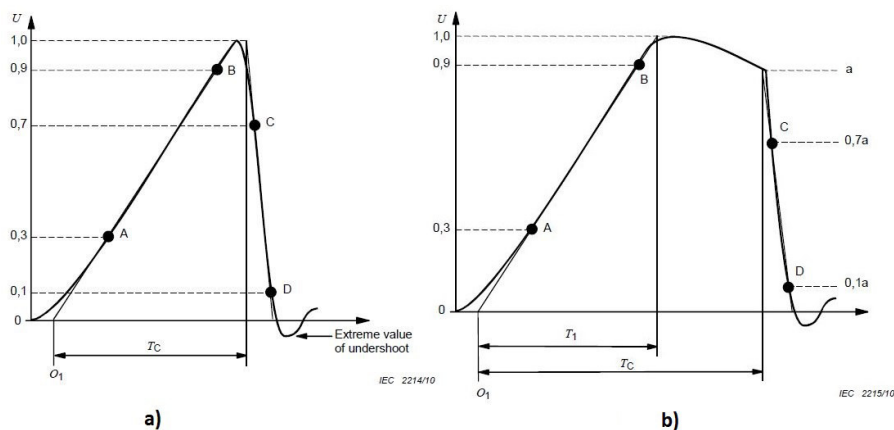


Figura 5.5: Onda de impulso cortada: a) na frente ; b) na cauda [34]

Define-se tempo de corte, T_c , como o intervalo entre a origem virtual e o instante em que ocorre o corte.

Os valores normalizados para uma onda de impulso atmosférico são $1,2 \mu\text{s}$ para o tempo de frente e $50 \mu\text{s}$ para o tempo de cauda. Vulgarmente representa-se esta onda por $1,2/50 \mu\text{s}$. As tolerâncias previstas pela norma IEC 60060-1 para os valores da onda são:

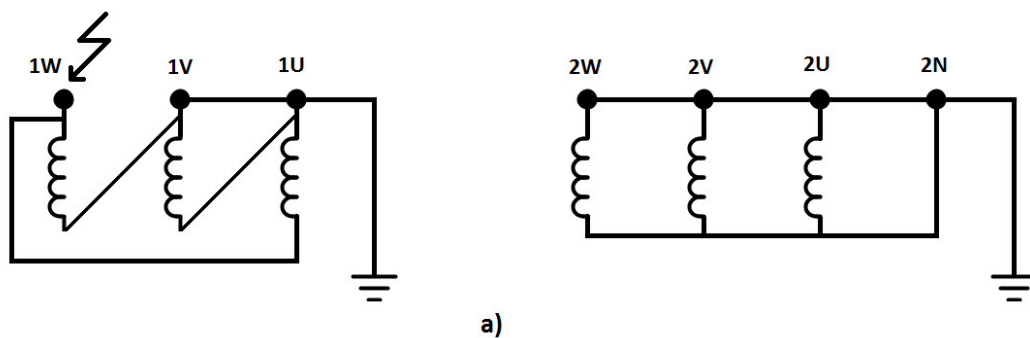
- Tensão de teste: $\pm 3\%$
- Tempo de frente: $\pm 30\%$
- Tempo de cauda: $\pm 20\%$

Estes valores podem ser alcançados através do dimensionamento das resistências em paralelo e em série do gerador de Marx, dependendo o tempo de frente das resistências em série, e o tempo de cauda das resistências em paralelo. [32]

5.3.1 Ensaio ao impulso atmosférico em transformadores de potência [35]

Este tipo de ensaio só pode ser realizado em enrolamentos cujos terminais sejam exteriores à cuba do transformador. A tensão de ensaio deve corresponder a uma onda completa normalizada $1,2/50 \mu\text{s}$, e em transformadores a óleo, deve ter polaridade negativa de forma a reduzir o risco de descargas externas no circuito de teste. [35] Normalmente, esse valor é indicado na chapa de características do equipamento, no seu nível de isolamento a seguir a "LI" para os ensaios aos lados de AT e BT. Caso não seja fornecido, deve ser consultada a tabela presente na figura 5.2, mediante a tensão máxima para o enrolamento em ensaio.

Os esquemas de montagem para este tipo de ensaio podem ser observados na figura 5.6.



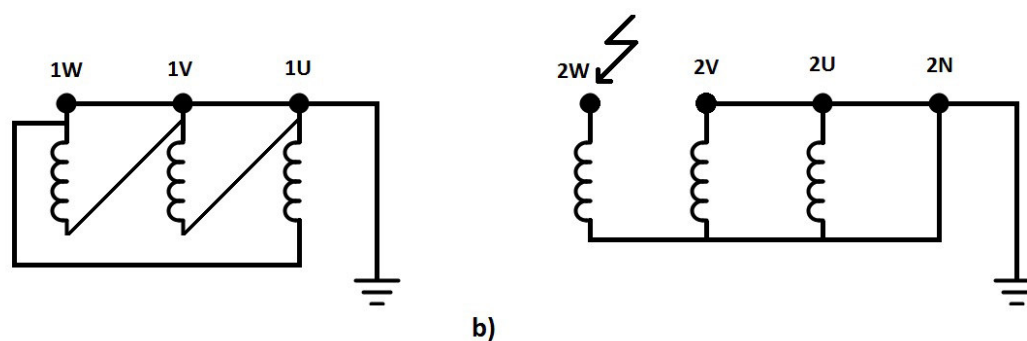


Figura 5.6: Esquemas de montagem para o ensaio ao choque atmosférico em transformadores de potência: a) na fase 1W do enrolamento AT ; b) na fase 2W do enrolamento BT

A sequência de teste consiste na aplicação de um impulso de tensão entre 50% e 75% do valor da tensão de teste, seguido de três impulsos a 100%. Os ensaios devem decorrer sem que haja disrupção. [35]

Este procedimento deve ser repetido para cada uma das fases dos enrolamentos de Alta e Baixa Tensão. Na figura 5.6 observa-se a montagem para o ensaio às fases 1W e 2W, nos lados de AT e BT, respetivamente. Deve reproduzir-se o mesmo esquema para o ensaio às outras fases, aplicando-se a onda à fase que se pretende ensaiar, curto-circuitando-se as outras duas do mesmo enrolamento e estabelecendo-se uma ligação à terra. No caso do lado de BT, curto-circuita-se ainda as restantes fases ao neutro, ligando-se depois à terra.

Para cada ensaio, devem ser registadas as formas de onda da tensão e corrente, sendo que se não houver grandes diferenças entre as obtidas com o valor de tensão entre 50% e 75% do valor da tensão de teste e a 100%, prova-se que o isolamento suportou o teste. [35]

Capítulo 6

Ensaio e Resultados

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios dielétricos efetuados ao objeto em estudo (figura 6.1), bem como uma descrição das características do mesmo.

Serão descritos ainda os processos de criação das condições necessárias à realização ensaios ao impulso atmosférico e à frequência industrial, respeitando as normas internacionais IEC 60060-1 e 60076-3, nomeadamente como foi possível criar a onda 1,2/50 μ s e os esquemas de montagem.

Finalmente, será feita uma análise aos resultados, verificando se o desempenho do objeto em estudo está de acordo com as normas que lhe dizem respeito.

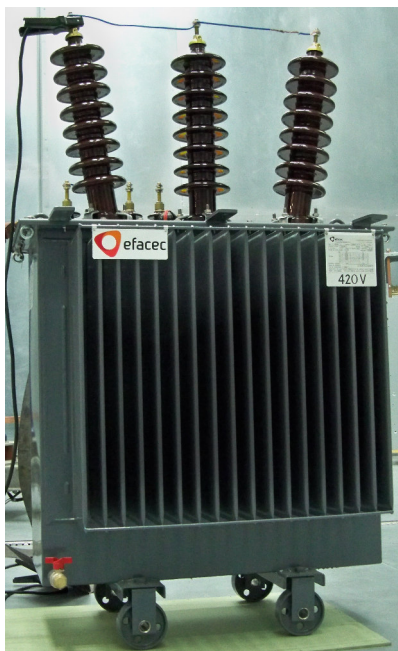


Figura 6.1: Transformador de distribuição da EFACEC em estudo

6.1 Objeto em estudo

O objeto em estudo na presente dissertação é um transformador trifásico de distribuição, tendo como objetivo fornecer energia elétrica em BT a uma rede de distribuição de energia ou a uma instalação de utilização que, como se pode observar na sua chapa de características na figura 6.2, possui as seguintes características:

- Potência nominal igual a 100 kVA;
- Tensão no lado AT igual a 30 kV e no lado BT igual a 420 V;
- Corrente nominal no lado AT igual a 1,924 A e no lado BT igual a 137,5 A;
- Nível de isolamento do lado AT: LI 170 AC 70 e do lado BT: LI 30 AC 10 — representando LI o teste ao impulso atmosférico e AC o teste à frequência industrial;
- Tipo de arrefecimento ONAN — Óleo Natural Ar Natural;
- Grupo de ligação Dyn5 — o primário está ligado em triângulo, o secundário está ligado em estrela com neutro acessível e o desfasamento entre as tensões simples do primário e secundário é igual a 150°. [5] A conexão Dy é bastante utilizada em transformadores de distribuição uma vez que a ligação em estrela no lado de mais baixa tensão permite alimentar cargas monofásicas (entre fase e neutro) e trifásicas, sendo que a ligação em triângulo no lado de mais alta tensão compensa os desequilíbrios gerados pelas cargas monofásicas. [2];
- O enrolamento BT é em banda e o enrolamento AT é em fio.

efacec Transformadores PORTUGAL

Transformador de distribuição

Tipo Número Ano

Potencia nominal Normas

N. de fases Grupo de ligação Frequencia

Tensão de curto circuito Montagem

Norm.	AT	BT	
<input type="checkbox"/>	1	31500	420 V
<input type="checkbox"/>	2	30750	420 V
<input checked="" type="checkbox"/>	3	30000	420 V
<input type="checkbox"/>	4	29250	420 V
<input type="checkbox"/>	5	28500	420 V
<input type="checkbox"/>	6		V
<input type="checkbox"/>	7		V
Correntes nominais		1.924	137.5 A

Níveis de isolamento

Tipo de arrefecimento

Aquecimento diel. sup./cobre Nivel de potência sonora

Massas: total descubagem dielétrico NYNAS TAURUS

420 V

Figura 6.2: Chapa de características do transformador de distribuição da EFACEC em estudo

6.2 Ensaio com tensão AC induzida de curta duração

Inicialmente começou-se por isolar o transformador, colocando uma placa de madeira por baixo do mesmo. Uma vez que a cuba se encontra ligada à terra através das rodas, existiam diversos pontos que estabeleciam essa ligação, o que se revela um inconveniente do ponto de vista de eventuais perturbações. Assim, evita-se o seu contacto com as chapas metálicas do pavimento e passa a haver apenas um ponto de ligação à terra, como recomendam as boas práticas internacionais.



Figura 6.3: Montagem do ensaio com o sistema de frequência industrial

Através da chapa de características observa-se que para o lado de AT, neste ensaio, a tensão a aplicar é igual a 70 kV, e para a BT 10 kV.

Antes de se dar início aos ensaios, interessa fazer a correção destes valores mediante as condições atmosféricas em que cada um dos testes foram feitos. Os parâmetros intermédios necessários a essa correção, bem como o valor de tensão a aplicar ao equipamento, U , encontram-se na tabela [6.1](#)

Veja-se que a distância mínima do arco através do ar será a distância entre dois terminais de fase do mesmo nível de tensão. No caso da BT será 9 cm e da AT 36 cm.

Considerou-se, ainda, que $U_{50} = 1,1 * U_0$.

Tabela 6.1: Condições atmosféricas de cada ensaio e resultados dos parâmetros necessários à correção da tensão de ensaio a aplicar

	Frequência Industrial lado AT	Frequência Industrial lado BT
t (°C)	24,4	24,4
h % (%)	44	44
h (g/m³)	9,76	9,76
p (mbar)	1005	1005
δ	0,98	0,98
h/δ	9,99	9,99
k	0,99	0,99
U₀ (kV)	70	10
U₅₀ (kV)	77	11
L (m)	0,36	0,09
g	0,44	0,25
m	0,135	0,017
w	0,135	0,017
k₁	0,997	1,000
k₂	0,998	1,000
k_t	0,995	0,999
U (kV)	69,67	9,99

Caso o equipamento consiga resistir aos valores de tensão corrigidos durante 60 segundos sem que ocorra contornamento, verifica-se, com este teste, o desempenho do seu isolamento.

6.2.1 Ensaio do lado AT

Neste caso, a alimentação é feita pelo lado AT, estando todos os seus terminais de fase curto-circuitados, e no lado BT todos os terminais de fase e neutro estão, também, curto-circuitados e ligados à terra.

Aumentou-se progressivamente a tensão até alcançar o valor de ensaio previsto de 70 kV, que corrigido para as condições atmosféricas presentes correspondeu a 69,67 kV. O transformador foi sujeito a esse valor de durante 60s não se tendo verificado qualquer descarga disruptiva.

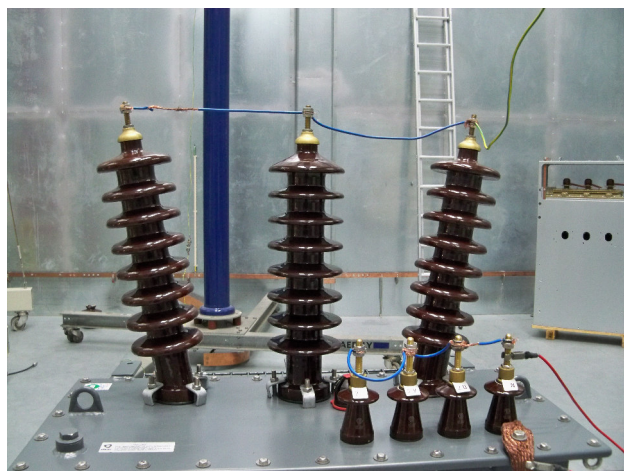


Figura 6.4: Montagem do ensaio para o lado de Alta Tensão

6.2.2 Ensaio do lado BT

Neste ensaio, a alimentação, efetuada pelo fio amarelo e verde, observável na figura 6.5, é realizada pelo lado BT, estando todos os seus terminais de fase e de neutro curto-circuitados. No lado AT todos os terminais de fase estão, igualmente, curto-circuitados e ligados à terra.



Figura 6.5: Montagem do ensaio para o lado de Baixa Tensão

A tensão foi aumentada lentamente até atingir o valor de ensaio previsto de 10 kV, que corrigido para as condições atmosféricas presentes correspondeu a 9,99 kV, tendo o equipamento estado sujeito a esta tensão durante 60s sem que ocorresse uma descarga disruptiva.

6.3 Ensaio ao impulso atmosférico

Analogamente aos ensaios com tensão AC induzida de curta duração, isolou-se o transformador do pavimento com uma placa de madeira, obtendo, assim, apenas um ponto de ligação à terra. De salientar que os ensaios são realizados com uma onda de polaridade negativa, como referido no capítulo 5.

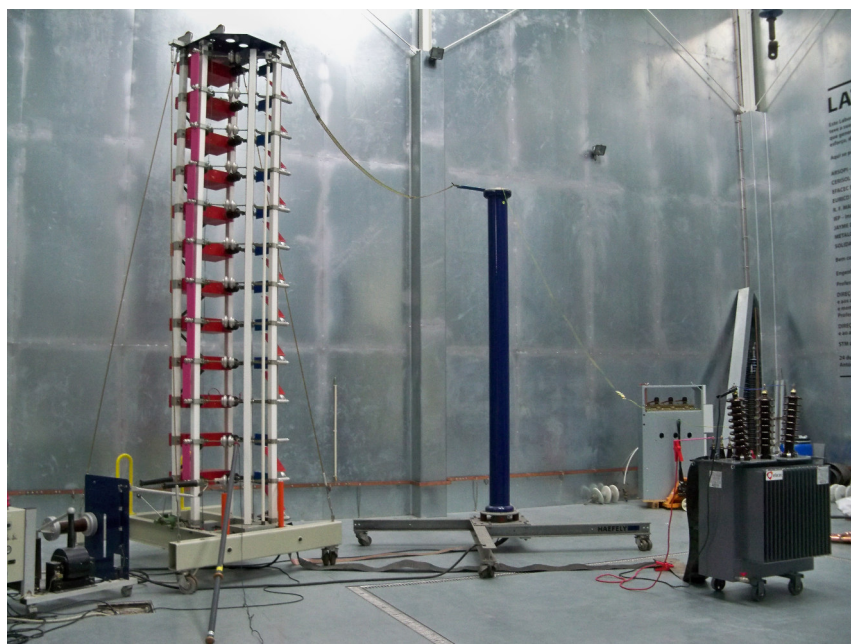


Figura 6.6: Montagem do ensaio ao impulso atmosférico antes do transformador ter sido isolado

Como é possível consultar na chapa de características do transformador de distribuição, a tensão a aplicar no lado de AT será 170 kV, e no lado de BT 30 kV. Os ensaios comprovarão o seu nível de isolamento se o equipamento suportar a sequência de testes indicada nas normas sem que haja descargas disruptivas.

De forma a atingir-se o valor de teste máximo para o lado de AT, utilizou-se dois andares do Gerador de Marx, que no total poderiam perfazer 200 kV. Foi definido um tempo de carregamento dos condensadores igual a 25 segundos.

Os valores de tensão de teste foram corrigidos mediante as condições atmosféricas a que foram realizados os ensaios e podem ser consultados na tabela 6.2

Tabela 6.2: Condições atmosféricas de cada ensaio e resultados dos parâmetros necessários à correção da tensão de ensaio a aplicar

	Impulso Atmosférico lado AT	Impulso Atmosférico lado BT
t (°C)	23,4	21,3
h% (%)	46	47
h (g/m³)	9,64	8,73
p (mbar)	1000	1005
δ	0,98	0,99
h/δ	9,88	8,84
k	0,99	0,98
U₀ (kV)	170	30
U₅₀ (kV)	187	33
L (m)	0,36	0,09
g	1,08	0,76
m	1	0,530
w	1	0,530
k₁	0,98	0,99
k₂	0,99	0,99
k_t	0,96	0,98
U (kV)	164,04	29,46

Deveria ter sido feito igualmente um registo das formas de onda da corrente verificada com a tensão reduzida e a 100% do valor da tensão de ensaio, mas devido às limitações do equipamento existente no LAT em termos de shunts de corrente, tal não foi possível.

6.3.1 Ensaio do lado AT

Neste tipo de teste, as fases são ensaiadas individualmente, ao contrário do que acontece nos ensaios à frequência Industrial. A sequência de ensaio de fases foi *IW*, *IV*, e finalmente *IU*.

A tensão é aplicada à fase em ensaio, estando as outras curto-circuitadas e ligados à terra. As fases do lado de BT, encontram-se, da mesma forma, curto-circuitadas entre si e o neutro e ligadas à terra, como se pode observar na figura 6.16.

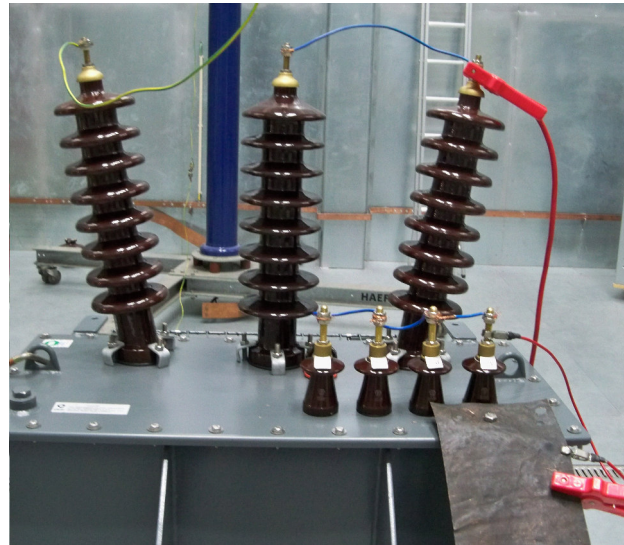


Figura 6.7: Montagem do ensaio para o lado de Alta Tensão

A sequência de teste consiste na aplicação de um impulso de tensão entre 50% e 75% do valor da tensão de ensaio, neste caso entre 85 kV e 127,5 kV, tendo sido o valor utilizado igual a 90 kV, seguido de três impulsos a 100%, isto é, 170 kV. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Valores de tensão, tempo de subida e tempo de cauda registados nos ensaios no lado de AT

	1W			1V			1U		
	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1º ensaio	-87,8	1,25	49,62	-87,8	1,26	49,58	-87,8	1,24	49,58
2º ensaio	-163,9	1,26	49,14	-163,9	1,3	49,02	-163,9	1,23	48,94
3º ensaio	-163,9	1,26	49,06	-163,9	1,32	48,88	-163,9	1,22	49,13
4º ensaio	-163,9	1,25	49,2	-163,9	1,29	49,01	-163,9	1,23	49,08

Verificou-se que não ocorreram descargas disruptivas em nenhum dos ensaios às três fases. Ainda, como se pode observar na figura 6.8, as formas de onda não apresentam grandes discrepâncias, pelo que se pode concluir que o isolamento conseguiu suportar o teste.

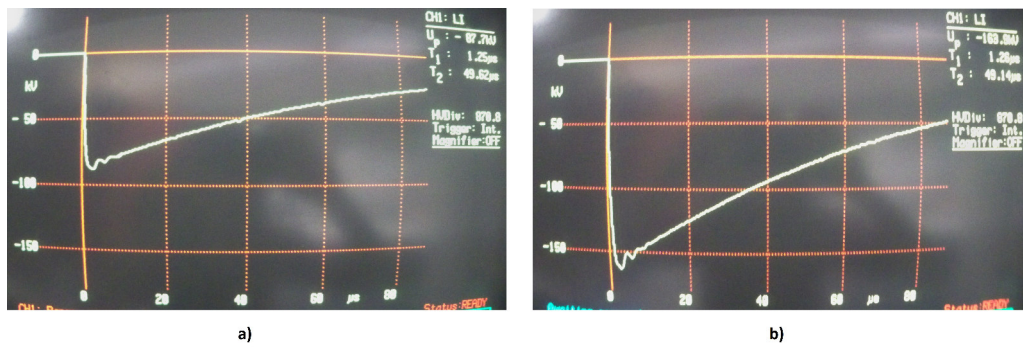


Figura 6.8: Formas de onda de tensão obtidas na fase 1W, para tensões aplicadas de: a) 90 kV ; b) 170 kV

6.3.2 Ensaio do lado BT

Neste ensaio, aplica-se a tensão à fase que se pretende testar, curto-circuitando-se as outras com o neutro e ligando-as à terra. Ainda, os terminais do lado de AT encontram-se curto-circuitados e ligados à terra, como se pode observar na figura 6.9.

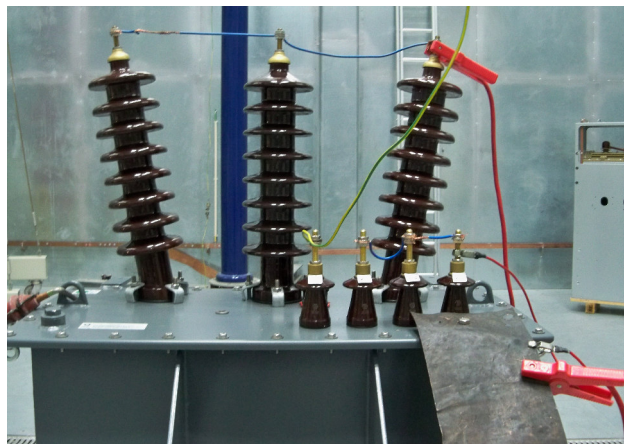


Figura 6.9: Montagem do ensaio para o lado de Baixa Tensão

O primeiro impulso de tensão teria de ter um valor entre 50% e 75% do valor da tensão de teste, neste caso entre 15 kV e 22,5 kV, tendo sido o valor utilizado igual a 21 kV, e os três impulsos seguintes a 100%, isto é, 30 kV. A sequência de ensaio de fases foi 2W, 2V e 2U.

Começou-se pelo ensaio à fase 2W, à qual se aplicou o valor de tensão correspondente ao primeiro ensaio, 21 kV. O resultado obtido é visível na figura 6.10.

Os valores obtidos foram:

- $U_p = -12,2 \text{ kV}$
- $T_1 = 1,55 \mu\text{s}$
- $T_2 = 2,22 \mu\text{s}$

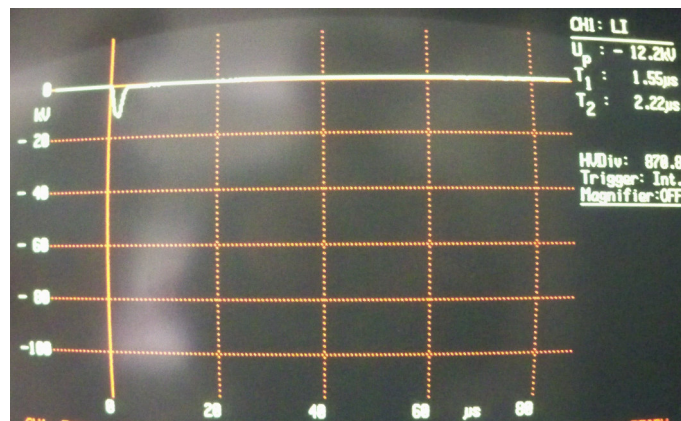


Figura 6.10: Forma de onda de tensão obtida na fase 2W quando aplicado um impulso atmosférico de 21 kV

Verificou-se que a tensão de pico e o tempo de cauda atingiram valores mais baixos do que o pretendido, e a forma de onda era desadequada, ainda que não tenha ocorrido uma descarga disruptiva. É provável que este fenómeno se fique a dever ao facto dos enrolamentos BT serem em banda, caso em que a capacidade série, isto é, entre espiras, é bastante elevada, o que resulta numa impedância tão baixa, que corresponde praticamente um curto-circuito. Tornou-se necessário, então, aumentar o valor dessa impedância e, para isso, colocou-se uma resistência externa, R_{ext} , inicialmente de valor mais ou menos reduzido para verificar o seu efeito na forma de onda.

O esquema de montagem pode ser observado na figura 6.11.

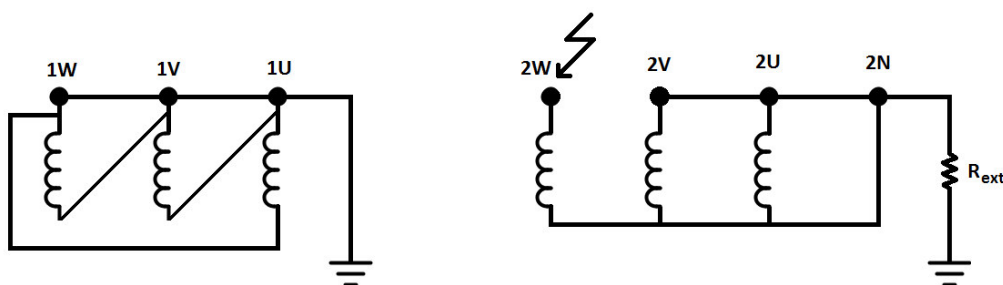
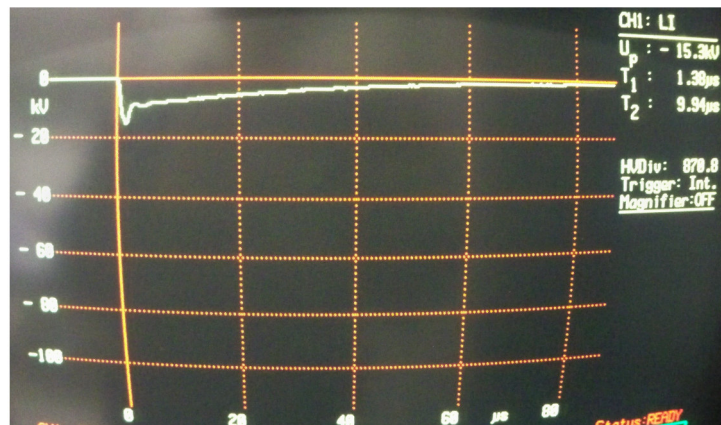


Figura 6.11: Esquema de montagem do ensaio ao impulso atmosférico à fase 2W, com uma resistência externa

Inicialmente, utilizou-se uma resistência externa de valor igual a 115Ω . A montagem e os resultados obtidos podem ser consultados na figura 6.12.



a)



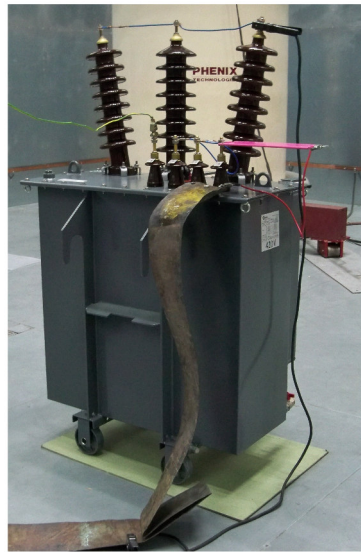
b)

Figura 6.12: a) Montagem do ensaio ao impulso atmosférico à fase 2W, com uma resistência externa de 115Ω ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV

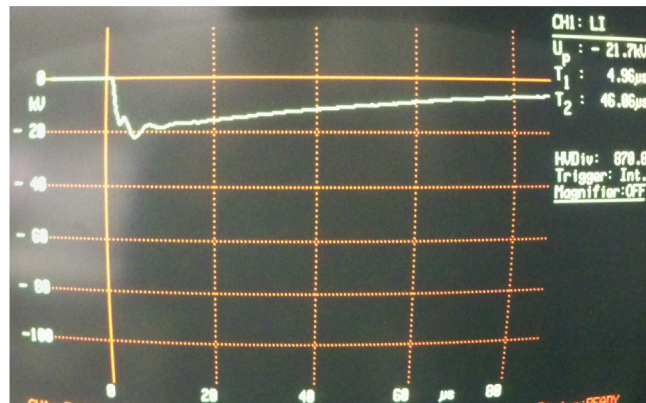
Os valores obtidos foram com a nova montagem foram:

- $U_p = -15,3 \text{ kV}$
- $T_1 = 1,38 \mu\text{s}$
- $T_2 = 9,94 \mu\text{s}$

Uma vez confirmado que a introdução da resistência produzia os resultados desejados, isto é, o aumento T_2 , mas que esse aumento era, ainda, bastante inferior ao pretendido, aumentou-se o valor da resistência externa para 8400Ω . A nova forma de onda foi a seguinte:



a)



b)

Figura 6.13: a) Montagem do ensaio ao impulso atmosférico à fase 2W, com uma resistência externa de 8400Ω ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV

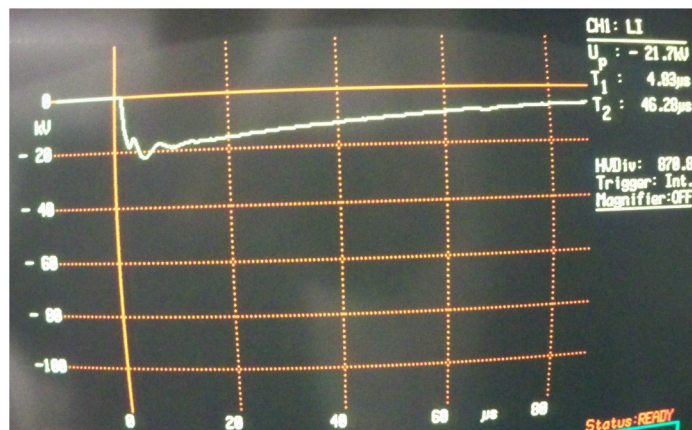
Sendo os valores verificados:

- $U_p = -21,7 \text{ kV}$
- $T_1 = 4,96 \mu\text{s}$
- $T_2 = 46,06 \mu\text{s}$

Verifica-se que o ajuste do valor de T_2 provoca uma alteração em T_1 , ficando o seu valor fora do intervalo de tolerância especificado na norma IEC 60060-1. Para atingir o valor desejado, redimensionou-se a resistência de série externa do sistema gerador de impulso atmosférico. Uma vez que se pretende diminuir T_1 , ter-se-ia de diminuir, também, essa resistência. Para tal, curto-circuitou-se uma parte e verificaram-se novamente os resultados obtidos:



a)

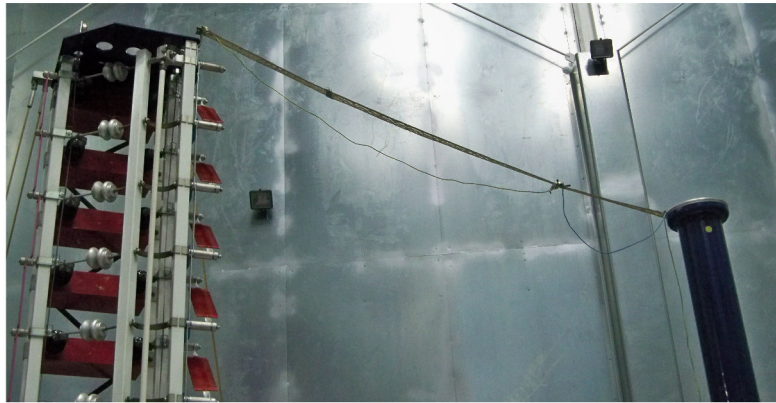


b)

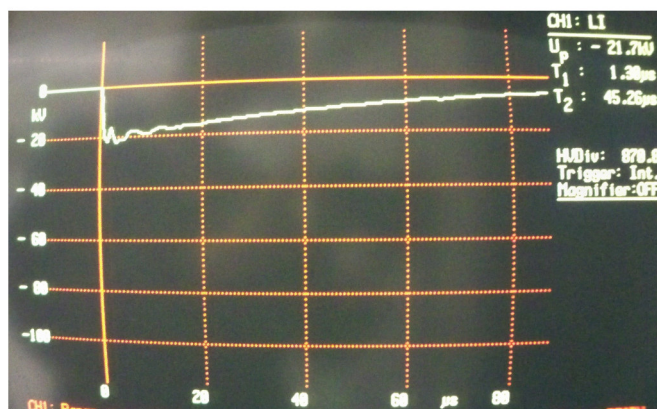
Figura 6.14: a) Resistência em Série Externa parcialmente curto-circuitada ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV

- $U_p = -21,7 \text{ kV}$
- $T_1 = 4,83 \text{ } \mu\text{s}$
- $T_2 = 46,28 \text{ } \mu\text{s}$

Como T_1 ainda não se encontrava dentro dos valores aceites, curto-circuitou-se toda a Resistência em Série Externa, alcançando-se, finalmente, valores de tempo de subida e de cauda dentro do intervalo admitido pelas normas referentes a este tipo de ensaios:



a)



b)

Figura 6.15: a) Resistência em Série Externa totalmente curto-circuitada ; b) Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 21 kV

- $U_p = -21,7 \text{ kV}$
- $T_1 = 1,30 \mu\text{s}$
- $T_2 = 45,26 \mu\text{s}$

Uma vez normalizada a onda de impulso atmosférico, foi possível prosseguir com a realização da sequência de testes ao lado de Baixa Tensão. Assim, aplicou-se um impulso de 30 kV à fase 2W e verificou-se que a forma de onda obtida vinha, mais uma vez, desajustada, não tendo os parâmetros esperados e indicando uma possível cedência, ainda que não tivesse sido visível no exterior qualquer arco elétrico, como se pode comprovar na figura 6.16.

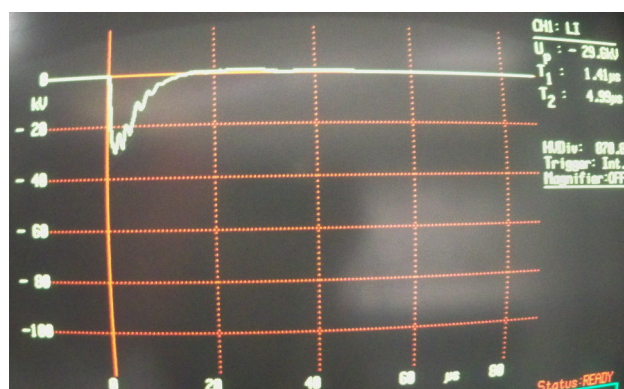


Figura 6.16: Forma de onda obtida com a nova montagem, para um valor de tensão aplicada de 29,5 kV

Em face disto, procederam-se a medições da resistência de isolamento e das resistências dos enrolamentos entre fases, confirmando-se que os valores obtidos estavam de acordo com o Boletim de Ensaio fornecido pela EFACEC. Assim, e uma vez que o problema não se encontrava nos enrolamentos, e os ensaios não estavam a sobrecarregar o transformador, foi-se diminuindo progressivamente o módulo da tensão aplicada em 1 kV por ensaio, de forma a perceber qual seria a tensão máxima a que a forma de onda de saída teria as características previstas. Concluiu-se que esse valor era sensivelmente igual a 26 kV.

Durante a realização dos ensaios às outras fases, $2V$ e $2U$, verificou-se que as formas de onda eram equivalentes às da primeira fase. Seguiu-se o mesmo procedimento, confirmando, de igual forma, para as duas fases restantes, o valor de 26 kV. Este foi, portanto, o valor de ensaio máximo utilizado para os ensaios ao impulso atmosférico ao lado Baixa Tensão do transformador de distribuição.

O novo intervalo de valores para o 1º ensaio passa a ser entre 13 kV e 19,4 kV. Aplicando uma onda de 19 kV observou-se que o DIAS não conseguia efetuar a sua leitura e não retornava qualquer forma de onda. O valor de aplicação a partir do qual tal acontecia foi 20,2 kV, pelo que esse foi o valor de tensão estabelecido para o 1º ensaio ao lado de BT.

Os resultados obtidos nos testes às 3 fases de Baixa Tensão são apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4: Valores de tensão, tempo de subida e tempo de cauda registados nos ensaios no lado de BT

	2W			2V			1U		
	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1º ensaio	-20,6	1,32	45,36	-20,6	1,32	46,31	-21,2	1,34	40,05
2º ensaio	-25,9	1,33	44,54	-25,9	1,33	44,19	-25,9	1,36	43,78
3º ensaio	-25,9	1,32	44,56	-25,9	1,38	44,16	-25,9	1,34	43,76
4º ensaio	-25,9	1,3	44,59	-25,9	1,34	44,58	-25,9	1,3	44,19

6.4 Análise dos resultados

Relativamente aos ensaios à frequência industrial para ambos os níveis de tensão, interessa salientar que a sua realização decorreu dentro da normalidade e do esperado. Não se verificou nenhum fenómeno imprevisto e quer o lado de Baixa Tensão, quer o lado de Alta Tensão, suportaram o teste, confirmando o bom dimensionamento do seu nível de isolamento.

O mesmo se pode afirmar para o ensaio ao impulso atmosférico realizado ao lado de Alta Tensão do transformador de distribuição. A sequência de testes e respetivas especificações foram cumpridas sem que ocorresse qualquer não conformidade.

Finalmente, no ensaio ao impulso atmosférico para o lado de Baixa Tensão verificaram-se algumas dificuldades. As dificuldades iniciais referiam-se à possibilidade de atingir as características da onda, e as seguintes de atingir a tensão de teste.

Devido às características dos enrolamentos BT, a forma de onda do impulso aparecia deformada, tendo de ser ajustada. Introduziu-se uma resistência externa corrigindo T_2 , o que provocou uma alteração no tempo de frente, estando agora o seu valor muito acima do especificado. Sabendo que as resistências em série influenciam a frente da onda, e dado que não seria possível modificar as resistências de amortecimento, ou resistências em série internas, por inexistência de outro conjunto de valor diferente no LAT, alterou-se o valor da resistência de limitação, ou resistência em série externa. Assim, foram atingidos os parâmetros necessários para se iniciar a sequência de testes ao lado de BT.

Por fim, foi possível ensaiar o equipamento, não se verificando qualquer problema na primeira aplicação de tensão com 21 kV. Testando a 100% da tensão de teste, isto é, a 30 kV, observou-se que resultava uma forma de onda completamente descaracterizada, e que poderia sugerir uma cedência de isolamento no objeto em ensaio. Reduziu-se a tensão até que a forma de onda obtida tivesse os seus parâmetros dentro das tolerâncias indicadas nas normas internacionais. Assim, o equipamento foi ensaiado com uma tensão máxima igual a 26 kV em vez dos 30 kV previstos.

Uma vez que o transformador é novo, o facto de não suportar a tensão estipulada para este teste pode sugerir duas interpretações baseadas em fenómenos distintos:

- Possível falha a nível do projeto, tendo sido o nível de isolamento mal dimensionado;
- Possível falha na fase de fabrico que conduziu à impossibilidade do equipamento suportar a tensão máxima de teste.

Uma vez que não foi observável nenhuma descarga no exterior do transformador, mas a forma de onda registada sugeria uma possível descarga disruptiva, pode supor-se que a mesma aconteceu no óleo do transformador. Isto porque após a redução da tensão aplicada, verificava-se que o comportamento do transformador para esse nível de tensão era o mesmo que antes da suposta descarga. Uma vez que o óleo é o único constituinte com propriedades regenerativas, conclui-se que essa seria a única hipótese fisicamente viável, ainda que não tenha sido possível comprová-la de modo efetivo.

Neste caso teria sido interessante observar a forma de onda da corrente, uma vez que esta é mais sensível, podendo dar indicações de possíveis defeitos, que a forma de onda da tensão por si só não consegue fornecer. Todavia, tal não foi possível devido às limitações anteriormente referidas do Laboratório de Alta Tensão.

Tabela 6.5: Confirmação dos resultados obtidos nos ensaio no LAT com os especificados pelas normas internacionais

	Ensaio à frequência industrial	Ensaio ao impulso atmosférico
lado BT	Verificou	Não verificou
lado AT	Verificou	Verificou

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as conclusões que foram sendo retiradas ao longo da realização da presente dissertação, bem como são descritos possíveis trabalhos futuros nesta área.

7.1 Considerações finais

Os principais objetivos da presente dissertação correspondiam à análise dielétrica de um transformador de potência, confirmando os seus níveis de isolamento, ao mesmo tempo que se criava no LAT a experiência e as condições necessárias para que esse estudo pudesse ser feito no futuro a outras unidades.

De forma a efetuar uma análise rigorosa, foi necessário fazer, inicialmente, um estudo profundo acerca dos aspectos construtivos dos transformadores, nomeadamente do seu funcionamento e das possíveis causas de avarias. Esse estudo forneceu as bases teóricas indispensáveis para a compreensão e bom desenvolvimento dos ensaios a realizar.

Como qualquer máquina, também os transformadores são sujeitos a uma série de testes de rotina antes de serem comercializados, de forma a perceber se o seu desempenho se encontra em pleno. Esses testes contam, entre outros, com ensaios à resistência de isolamento, rigidez dielétrica, relação de transformação, resistência dos enrolamentos entre fases, ensaio em vazio e ensaio em curto-circuito.

Existem, ainda, outros testes que são realizados apenas caso sejam solicitados, onde se incluem diversos ensaios dielétricos, nomeadamente o ensaio ao impulso atmosférico.

Tendo em consideração os equipamentos existentes no LAT e algumas das suas limitações, mostrou-se possível efetuar dois tipos de testes, tanto ao lado de mais baixa tensão, como de mais alta tensão: ensaio à frequência industrial, isto é, ensaio à rigidez dielétrica; e ensaio ao impulso atmosférico. Não sendo este último um teste de rotina, torna-se uma mais valia o LAT estar apto a realizá-lo.

Durante os ensaios à rigidez dielétrica não se verificou qualquer não conformidade, tendo suportado os dois níveis de tensão, Alta e Baixa, o valor estipulado respetivo, durante o período estabelecido.

Relativamente aos testes ao impulso atmosférico, começou-se por ensaiar o lado de mais alta tensão. Os resultados foram os esperados, as três fases foram ensaiadas separadamente, tendo todas suportado a sequência de testes: primeiro a aplicação duma onda com valor de tensão entre 50% e 75% do valor de teste, seguido de três impulsos sucessivos a 100%. Verificou-se ainda, após ter sido feita uma comparação entre as formas de onda do 1º e 2º ensaios, que estas eram praticamente idênticas, o que indica que o sistema de isolamento suportou perfeitamente o teste.

É de notar que deveria ter sido feito, da mesma forma, um registo e comparação das formas de onda da corrente durante os ensaios. A forma de onda da corrente apresenta-se mais sensível a determinados fenómenos, podendo evidenciar certas avarias ou falhas que não são perceptíveis através da forma de onda da tensão. Esse registo não foi feito por falta de condições no LAT para que tal acontecesse.

No ensaio ao impulso atmosférico ao lado de mais baixa tensão, verificaram-se diversas adversidades. Inicialmente, foi necessário ajustar a forma de onda do impulso até os seus parâmetros estarem de acordo com os estabelecidos nas normas internacionais. Não existindo um método exato de aplicação nestes casos, esse ajuste foi efetuado através dum processo de tentativa e erro. Inicialmente, apenas o valor do tempo de cauda era desadequado e, percebendo a origem do problema, isto é, o facto dos enrolamentos serem em banda e apresentarem capacidade série muito elevada e, portanto, uma impedância demasiado baixa, introduziu-se uma resistência externa para a aumentar e, conseqüentemente, aumentar T_2 . De seguida, mostrou-se necessário ajustar o valor do tempo de frente, que se sabe ser influenciado pelas resistências em série. Uma vez que não era viável modificar as resistências em série internas, por não existir nenhum outro conjunto disponível no LAT, alterou-se a resistência em série externa. Uma vez que o valor de T_1 era extremamente elevado, curto-circuitou-se a referida resistência, de forma a possibilitar a redução desse valor.

Atingida a forma de onda desejada, deu-se início à sequência de testes, verificando que nenhuma das três fases suportava a tensão de teste. Com o objetivo de excluir a possibilidade de existência de uma qualquer avaria nos enrolamentos, foram feitas medições à resistência de isolamento e às resistências dos enrolamentos entre fases. Observou-se que todos os valores se encontravam adequados e dentro do esperado, registando-se valores em concordância com o indicado no Boletim de Ensaio fornecido pelo fabricante.

Foram realizados diversos testes, de forma a determinar-se a tensão a partir da qual o equipamento suportava a onda completa, passando essa a ser a tensão de teste. Os restantes ensaios foram efetuados tendo em consideração essa alteração. Não foi possível realizar o 1º ensaio com um valor de tensão entre 50% e 75% da nova tensão de teste uma vez que o Sistema Digital de Análise de Impulso (DIAS) não conseguia fazer a sua leitura. O 1º ensaio para cada uma das fases foi realizado com o valor mínimo de tensão em que o DIAS conseguia fazer o registo de uma forma de onda.

Uma vez excluída a possibilidade do problema verificado ter ocorrido nos enrolamentos, supõe-se que terá sido no sistema de isolamento, nomeadamente no óleo. De facto, verificou-se que após não ter suportado a primeira tensão de teste, o desempenho do transformador não se

alterou minimamente, sendo a sua resposta igual para tensões menores, o que sugere que o problema só pode ter ocorrido num local com propriedades auto-regenerativas, isto é, no óleo. Caso o isolamento a papel estivesse degradado, tendo havido uma descarga disruptiva, teria necessariamente de se verificar, também, para outros níveis de tensão. Trata-se de uma questão que valeria a pena aprofundar, embora tal não fosse possível por não existirem meios adequados no LAT para precisar a origem do problema. Uma vez que este não é um teste de rotina, pode não existir qualquer avaria no transformador, restando as hipóteses de ter sido eventualmente mal dimensionado, ou então ter ocorrido qualquer defeito durante o seu fabrico.

Pode assim dizer-se que mediante os resultados obtidos nos ensaio no LAT, o lado de Baixa Tensão apresenta uma não conformidade relativamente a este ensaio em específico. Note-se que a calibração dos equipamentos presentes no LAT foi validada pela EDP, pelo que podem considerar-se os resultados obtidos válidos.

Como comentário final, gostaria de deixar uma reflexão baseada no facto de ter sido possível constatar que a unidade em ensaio pode ser uma fonte inesgotável de temas a estudar minuciosamente. Se por um lado o transformador de potência é uma máquina que à frequência industrial funciona de forma completamente conhecida, sem grandes surpresas no seu desempenho, por outro, quando sujeito ao impulso atmosférico, a situação muda radicalmente, e o mesmo apresenta um comportamento de grande complexidade, com aspetos de bastante difícil interpretação, justificando um estudo delicado e cauteloso, e sólidos conhecimentos teóricos de eletromagnetismo para a sua compreensão. Todavia, esta questão coloca-se fora do âmbito da presente dissertação, embora constitua um desafio de grande vulto para trabalhos futuros.

7.2 Trabalho Futuro

Tendo o LAT sido inaugurado apenas há um ano, existem diversos aspetos que podem ser alvo de melhorias, nesta área.

O mais importante, e primeiro ponto de investimento, deveria ser a criação de condições para a medição da corrente nos ensaios ao Impulso Atmosférico. Uma vez que o DIAS apenas possui um canal de entrada, não seria possível registar as formas de onda de tensão e corrente para o mesmo impulso, no entanto, seria uma mais valia conseguir analisar o desenvolvimento da corrente nestes ensaios, pois como foi referido no capítulo 6, esta é mais sensível e fornece informação sobre possíveis avarias que a tensão não fornece. O LAT possui ao dia de hoje um dispositivo shunt, cedido pela EFACEC, para o efeito, sendo apenas necessário estabelecer as ligações necessárias.

Veja-se ainda que é parte constituinte das normas internacionais a comparação das formas de onda de corrente do 1º ensaio e dos restantes, não devendo haver discrepâncias de elevado grau. Uma vez que este teste não está incluído nos testes de rotina, torna-se uma mais valia o LAT poder fornecer esse serviço, cumprindo rigorosamente as normas, como entidade independente.

Uma vez concluído esse trabalho, o LAT apresentar-se-á apto a realizar uma análise dielétrica minuciosa e precisa a transformadores de potência.

Por fim, perante as dificuldades encontradas aquando dos ensaios ao impulso atmosférico, seria interessante realizar um estudo exaustivo relativamente ao comportamento dos transformadores quando sujeitos a uma onda desse tipo, nomeadamente na Baixa Tensão, de forma a retirar algumas ilações quanto ao seu desempenho e a agilizar, facilitar e tratar com mais precisão este processo de análise.

Anexo A

Guião de ensaio com tensão AC induzida de curta duração em transformadores de potência no LAT

1. Isolar o transformador de potência, de forma a criar apenas um ponto de ligação à terra, colocando uma placa isolante entre o mesmo e o pavimento.
2. Efetuar as ligações necessárias correspondentes ao ensaio que se pretende efetuar (ao lado de BT ou AT).

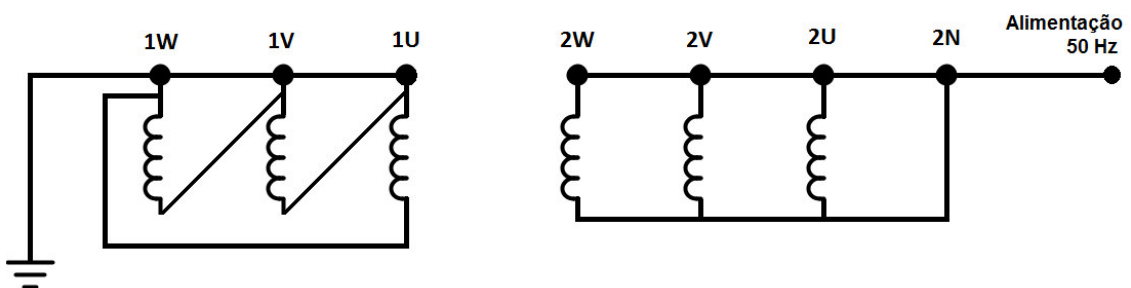


Figura A.1: Esquema de montagem do ensaio ao lado de Baixa Tensão

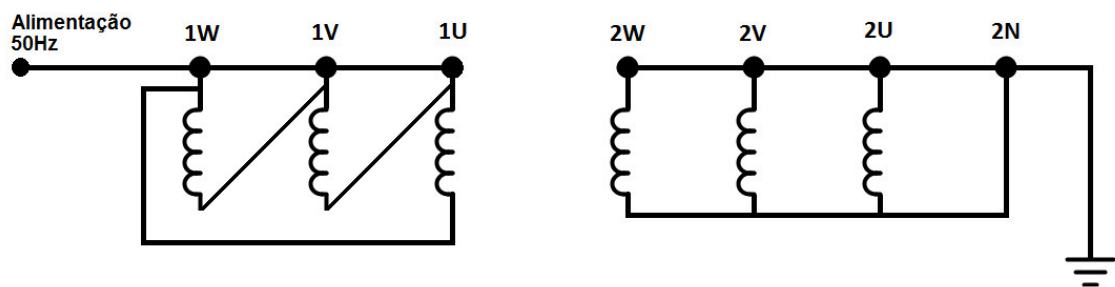


Figura A.2: Esquema de montagem do ensaio ao lado de Alta Tensão

3. Consultar na chapa de características os valores de tensão de ensaio a aplicar, U_0 , nos lados de BT e AT, após a indicação "AC". Caso tal não seja possível, consultar esses valores na tabela A.3, tendo em conta que, se qualquer um dos níveis de tensão do transformador não constar da mesma, deve ser considerada a tensão de ensaio correspondente ao nível imediatamente a seguir ao que está a ser testado.

Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s.	Rated lightning impulse withstand voltage kV peak	Rated short duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s.
3,6	20	10
7,2	40	20
12	60	28
17,5	75	38
24	95	50
	125	
36	145	70
	170	
52	250	95
60	280	115
72,5	325	140
100	380	150
123	450	185
145	550	230
170	650	275
	750	325

NOTE Dotted lines may require additional phase-to-phase withstand tests to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met.

Figura A.3: Valores de tensão de ensaio ao transformador mediante o seu nível de tensão U_m

4. Registrar as condições atmosféricas e as distâncias mínimas do arco através do ar, sendo essas iguais às distâncias entre dois terminais de fase consecutivos do nível de tensão em ensaio (BT ou AT).

5. Fazer as correções atmosféricas.

- Caso o aparelho de medida apresente o valor da humidade relativa, $h\%$, determinar a humidade absoluta, em g/m^3 , através da seguinte expressão:

$$h = \frac{6.11 \times h\% \times e^{\frac{17.6t}{243+t}}}{0,4615 \times (273+t)} \quad (A.1)$$

- Determinar a densidade relativa do ar, δ

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (A.2)$$

- Calcular o parâmetro k:

– AC $k = 1 + 0,012(h/\delta - 11)$ para $1g/m^3 < h/\delta < 15g/m^3$

– Impulso $k = 1 + 0,010(h/\delta - 11)$ para $1g/m^3 < h/\delta < 20g/m^3$

- Calcular o parâmetro g através da expressão:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (A.3)$$

Sendo L a distância mínima do arco através do ar e U_{50} o valor de tensão cuja probabilidade de disrupção é igual a 50%. Caso esse valor não seja fornecido, usar:

$$U_{50} = 1,1U_0 \quad (A.4)$$

- Determinar os parâmetros m e w consultando a seguinte tabela:

Tabela A.1: Valores dos expoentes m e w em função do valor de g

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 - 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 - 1,2	1,0	1,0
1,2 - 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2.0	1,0	0

- Calcular k_1 :

$$k_1 = \delta^m \quad (\text{A.5})$$

A correção é considerada fiável se $0,8 < k_1 < 1,05$.

- Calcular k_2 :

$$k_2 = k^w \quad (\text{A.6})$$

- Determinar K_t :

$$K_t = k_1 k_2 \quad (\text{A.7})$$

- Calcular o valor da tensão a aplicar corrigido em função das condições atmosféricas presentes, U :

$$U = U_0 K_t \quad (\text{A.8})$$

6. Aplicar tensão com um valor de frequência entre os 45 Hz e os 65 Hz e em que a diferença entre os valores máximos positivo e negativo não deve exceder os 2%.
7. Aumentar lenta e progressivamente a tensão. Após atingir-se o valor correspondente a 75% da tensão de teste, provocar uma elevação de 2% da mesma por segundo.
8. Submeter o equipamento a esse valor de tensão durante 60s, sendo o ensaio bem sucedido se durante esse período de tempo não ocorrer uma descarga disruptiva.
9. Após esse período, diminuir a tensão rapidamente, ser ser cortada repentinamente, de forma a não originar transitórios que deteriorem o equipamento.

Anexo B

Guião de ensaio ao impulso atmosférico em transformadores de potência no LAT

Este tipo de ensaio só pode ser realizado em enrolamentos cujos terminais sejam exteriores à cuba do transformador.

1. Isolar o transformador de potência, de forma a criar apenas um ponto de ligação à terra, colocando uma placa isolante entre o mesmo e o pavimento.
2. Consultar na chapa de características os valores de tensão de ensaio a aplicar, U_0 , nos lados de BT e AT, após a indicação "LI". Caso tal não seja possível, consultar esses valores na tabela [B.1](#), tendo em conta que, se qualquer um dos níveis de tensão do transformador não constar da mesma, deve ser considerada a tensão de ensaio correspondente ao nível imediatamente a seguir ao que está a ser testado.

Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s.	Rated lightning impulse withstand voltage kV peak	Rated short duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s.
3,6	20	10
7,2	40	20
12	60	28
17,5	75	38
24	95	50
	125	
36	145	70
	170	
52	250	95
60	280	115
72,5	325	140
100	380	150
123	450	185
145	550	230
170	650	275
	750	325

NOTE Dotted lines may require additional phase-to-phase withstand tests to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met.

Figura B.1: Valores de tensão de ensaio ao transformador mediante o seu nível de tensão U_m

- Determinar o número de andares necessários a utilizar no gerador de Marx, sabendo que cada um tem capacidade de produzir até 100 kV.
- Efetuar as ligações necessárias correspondentes ao ensaio que se pretende efetuar (ao lado de BT ou AT).

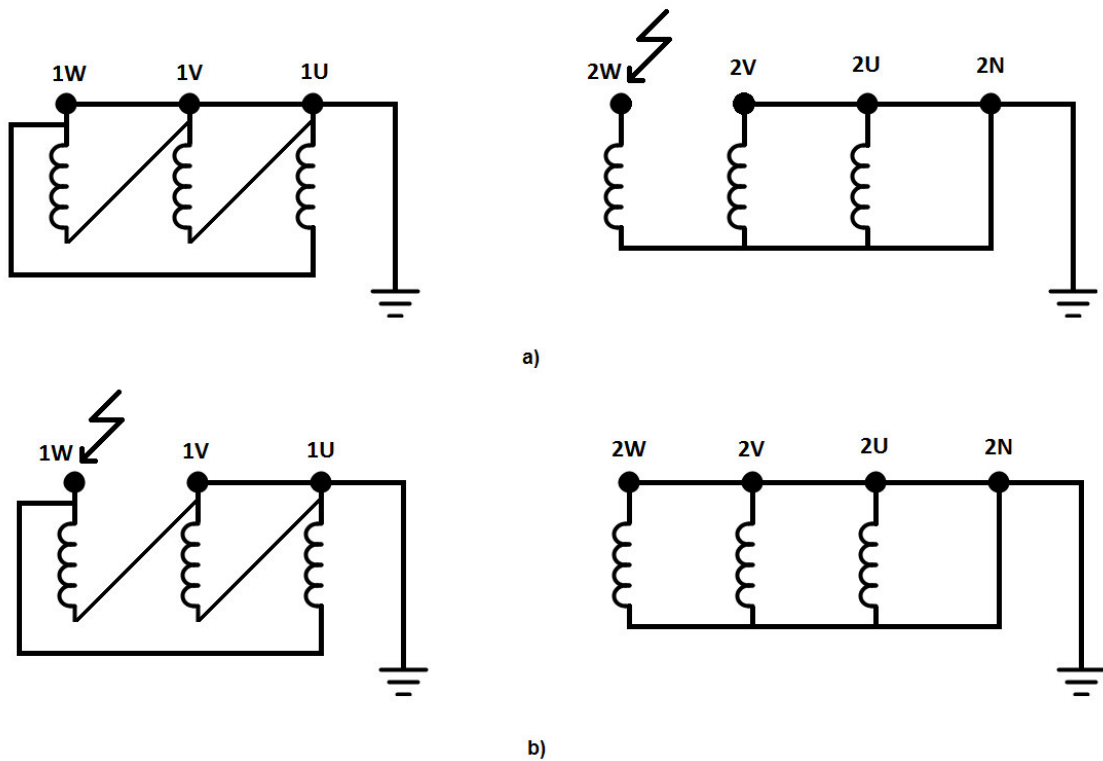


Figura B.2: Esquema de montagem do ensaio ao lado de: a) Baixa Tensão ; b) Alta Tensão

5. Registrar as condições atmosféricas e as distâncias mínimas do arco através do ar, sendo essas iguais às distâncias entre dois terminais de fase consecutivos do nível de tensão em ensaio (BT ou AT).
6. Fazer as correções atmosféricas.

- Caso o aparelho de medida apresente o valor da humidade relativa, $h\%$, determinar a humidade absoluta, em g/m^3 , através da seguinte expressão:

$$h = \frac{6.11 \times h\% \times e^{\frac{17.6t}{243+t}}}{0,4615 \times (273+t)} \quad (B.1)$$

- Determinar a densidade relativa do ar, δ

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (B.2)$$

- Calcular o parâmetro k :
 - AC $k = 1 + 0,012(h/\delta - 11)$ para $1g/m^3 < h/\delta < 15g/m^3$
 - Impulso $k = 1 + 0,010(h/\delta - 11)$ para $1g/m^3 < h/\delta < 20g/m^3$
- Calcular o parâmetro g através da expressão:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (\text{B.3})$$

Sendo L a distância mínima do arco através do ar e U_{50} o valor de tensão cuja probabilidade de disrupção é igual a 50%. Caso esse valor não seja fornecido, usar:

$$U_{50} = 1,1U_0 \quad (\text{B.4})$$

- Determinar os parâmetros m e w consultando a seguinte tabela:

Tabela B.1: Valores dos expoentes m e w em função do valor de g

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 - 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 - 1,2	1,0	1,0
1,2 - 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2,0	1,0	0

- Calcular k_1 :

$$k_1 = \delta^m \quad (\text{B.5})$$

A correção é considerada fiável se $0,8 < k_1 < 1,05$.

- Calcular k_2 :

$$k_2 = k^w \quad (\text{B.6})$$

- Determinar K_t :

$$K_t = k_1 k_2 \quad (\text{B.7})$$

- Calcular o valor da tensão a aplicar corrigido em função das condições atmosféricas presentes, U :

$$U = U_0 K_t \quad (\text{B.8})$$

7. Aplicar um impulso de tensão entre 50% e 75% do valor da tensão de ensaio, seguido de três impulsos a 100%.

A onda de tensão 1,2/50 μs , de polaridade negativa, com as seguintes tolerâncias:

- Tensão de teste: $\pm 3\%$
- Tempo de frente: $\pm 30\%$
- Tempo de cauda: $\pm 20\%$

Caso o tempo de frente esteja:

- muito elevado — Diminuir a resistência em série externa, substituindo-a por uma de valor inferior ou curto-circuitando-a parcial ou totalmente.
- muito reduzido — Aumentar a resistência em série externa, substituindo-a por uma de valor superior.

Caso o tempo de cauda esteja:

- muito elevado — Diminuir as resistências em paralelo, substituindo-as por umas de valor inferior
- muito reduzido — Aumentar as resistências em paralelo, substituindo-as por uma de valor superior ou introduzindo uma resistência externa, como se pode observar na figura B.3. Isto pode acontecer, por exemplo, quando os enrolamentos são em banda, em que a sua capacidade série (entre espiras) é muito elevada, provocando uma impedância bastante reduzida.

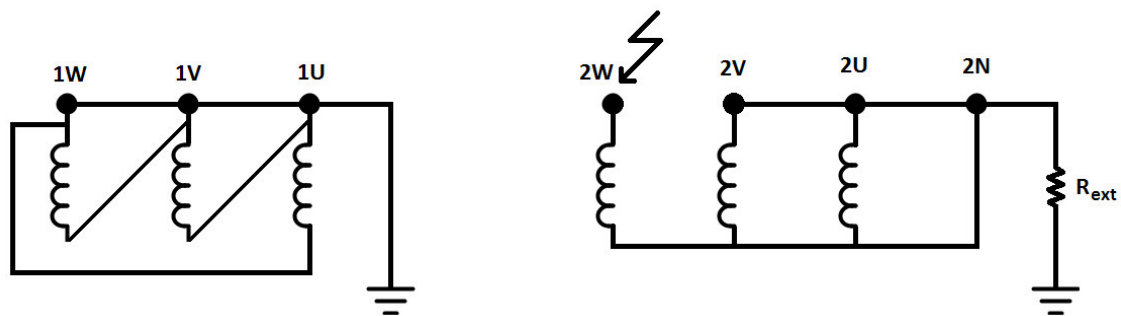


Figura B.3: Esquema de montagem do ensaio caso fosse necessária a introdução de uma resistência externa no lado de Baixa Tensão

8. Registrar as formas de onda de tensão e corrente. Caso não haja grandes discrepâncias entre as obtidas com o valor de tensão entre 50% e 75% do valor da tensão de teste e a 100%, prova-se que o isolamento suportou o teste.
9. Repetir o procedimento para cada uma das fases dos enrolamentos de Alta e Baixa Tensão.
10. O ensaio é bem sucedido caso não ocorra qualquer descarga disruptiva.

Referências

- [1] Artur Fernandes Costa. *Transformadores Eléctricos - Apontamentos*. Deec - feup edição.
- [2] J. F. Mora. *Máquinas Eléctricas*. 2003.
- [3] E. Ras. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Marcombo, 1994.
- [4] M.R.; Nunn T.; Kern J. Wimmer, J.; Tanner. *Dry-type vs. liquid-immersed transformers: Specification installation and operational impact in a marine environment*. 2011.
- [5] M.V. Guedes. *Máquina Eléctricas I - Apontamentos*. 2003.
- [6] S.J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [7] L.M.R. Oliveira. *Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Protecção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos*. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2013.
- [8] M.R. McNutt, W.J. ; Patel. *The combined effects of thermal aging and short-circuit stresses on transformer life*. 1976.
- [9] Working Group 09 of Study Committee 12. *Lifetime evaluation of transformers*. 1993.
- [10] M.A. Martins. *Manutenção de Transformadores de Potência. Tratamentos de Óleo e do Papel dos Enrolamentos*. 2001.
- [11] E. Smit J.J. Bolhuis, J.P. ; Gulski. *Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation*.
- [12] M.A. Martins. *Envelhecimento térmico do papel isolante de transformadores. Investigação experimental. Modelos de degradação*. 2010.
- [13] CIGRE/SC12/WG05. *An international survey on failures in large power transformers in service*. 1983.
- [14] IEEE Standard 493-2007. *IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems*. 2007.
- [15] P. Gill. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. 2009.
- [16] A.J. Wang, M. ; Vandermaar. *Review of condition assessment of power transformers in service*. 2002.
- [17] M.A. Martins. *Gestão da vida útil dos transformadores*. 2009.
- [18] Global Spec, 2010. URL: <http://cr4.globalspec.com/thread/49397>.

- [19] M.F. Lachman. *Field measurements of transformer single-phase exciting current as diagnostic tool, and influence of load tap changers*. 1994.
- [20] T.K. Saha. *Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers*. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, No. 5, 2003.
- [21] B.H. Ward. *A survey of new techniques in insulation monitoring of power transformers*. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, No. 3, 2001.
- [22] A. ; Lorin P. (editors) Carlzon, L. ; Fazlagic. *Service Handbook for Transformers*. 2007.
- [23] EPRI. *Power Transformer Maintenance and Application Guide*. EPRI Technical Report 1002913, 2002.
- [24] E.A. Crossey, J. ; Mackenzie. *Next generation on-line monitoring and diagnostics for power transformers*. 5th GCC CIGRE International Conference, 2009.
- [25] J.R. Ferreira. *Sistemas de Proteção de Transformadores - Apontamentos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [26] A. C. Stigant, S.; Franklin. *The J&P Transformer Book : a Practical Technology of the Power Transformer*. Newnes Butterworths, 1973.
- [27] EDP distribuiç ao. *Guia de Coordenação de Isolamento - regras de execução e de montagem*, Nov 2007.
- [28] Hewletts with v-s arcing horns. URL: <http://www.r-infinity.com/Hewlett/Page5.htm>.
- [29] Maschinenfabrik Reinhausen, 2013. URL: http://www.highvolt.de/desktopdefault.aspx?aspxerrorpath=/it/desktopdefault.aspx/tabid-1328/1476_read-3722/.
- [30] The Aptgroup Of Companies. URL: http://images1.hellotrader.com/data2/SH/BE/HTVENDOR-3379012/therm_image-250x250.gif.
- [31] N. Queirós, J.; Soares. *Memória Descritiva do Laboratório de Alta Tensão - Aspetos construtivos, coordenação e operação*. 2013.
- [32] J. Queirós. *Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais*. 2013.
- [33] N. Soares. *Inspeções periódicas em equipamento para trabalhos em tensão (TET) - Ensaios Dielétricos*. 2013.
- [34] IEC 60060-1 Edition 3.0 *High Voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*.
- [35] IEC 60076-3 Edition 2 *Power Transformer - Part 3: Insulation levels, dielectric test and external clearances in air*.