

Faculdade de Ciências e Tecnologias  
da Universidade de Coimbra  
*Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores*

# ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área de especialização em Energia orientada pelo Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes e coorientada pelo Engenheiro Ricardo Vítor Craveiro Simões Borges apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade De Coimbra.

## AUTOR

Bruna Cristiana Fraga de Pratas

## JURI

Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Professor Doutor André Manuel do Santos Mendes

setembro de 2019



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



# Agradecimentos

---

Em primeiro lugar, expresso o meu agradecimento ao Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes o papel que teve como orientador da parte do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, bem como a sua orientação científica, compreensão, disponibilidade e apoio prestado ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço também à direção do Centro de Produção de Souselas da Cimpor, pela oportunidade de estagiar nestas instalações, e poder assim experienciar o dia-a-dia numa cimenteira de referência.

O meu sincero agradecimento ao meu supervisor de estágio e Diretor do Serviço de Conservação do Centro de Produção de Souselas, Eng.º Ricardo Borges, pelo tempo disponibilizado, pela colaboração técnica, e por todo o cuidado demonstrado ao longo deste período.

A minha gratidão a todos os meus colegas do gabinete técnico de conservação, pela forma aprazível com que me receberam e integraram no grupo, e pelos conhecimentos e métodos de trabalho transmitidos, contribuindo assim para o meu enriquecimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos e colegas de curso, Sara Santos, Ana Pinho, Elisabete Santos, Ana Rita Silva, e a todos os outros com quem cruzei caminho, o meu muito obrigado por proporcionarem bons momentos e amizade ao longo do meu percurso académico.

Por fim, e tendo a plena consciência de que sem eles nada disto teria sido possível, o meu eterno obrigado à minha avó, Maria Eugénia, à minha mãe, aos meus irmãos e à minha tia Irene por todo esforço, sacrifício e devoção demonstrados muito para além do meu percurso académico.



## Resumo

---

A produção de cimento é uma atividade com bastante história a nível nacional, com a indústria cimenteira a representar uma proporção considerável da economia portuguesa há largos anos. Contudo, esta começa a revelar-se algo obsoleta e surgiram preocupações no paralelo dos sistemas produtivos com as suas concorrentes internacionais.

Na conjuntura da gestão de ativos, a manutenção torna-se necessária na modelação de comportamentos operacionais e na implementação de metodologias que contribuam para uma administração sustentável da fábrica. Desta forma, a política de manutenção assume um papel decisivo na garantia da disponibilidade e da fiabilidade dos equipamentos utilizados nos processos produtivos, influenciando significativamente os custos associados à produção e à qualidade desses mesmos produtos.

Neste sentido, foi proposta pela direção do serviço de conservação do Centro de Produção de Souselas (CPS) a renovação dos planos de manutenção, com o intuito de melhorar e otimizar a manutenção efetuada aos mais diversos equipamentos. Entre estes, os transformadores são absolutamente determinantes para o correto funcionamento da unidade, estando sujeitos a diversas variantes com capacidade de comprometer severamente os níveis de produção da fábrica, acarretando custos não só da avaria como também da falta de produção. Esta particularidade motivou o desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação do estado de condição geral dos transformadores. Entre as diversas atividades realizadas, foram ainda desenvolvidas fichas de procedimentos detalhadas, com o propósito de auxiliar os processos de manutenção preventiva realizada aos transformadores de média tensão, presentes no Centro de Produção.

Propor ao CPS um novo método de diagnóstico de avarias em transformadores de potência, quando estes têm avarias na parte ativa, é o objetivo primordial deste trabalho.

Este trabalho é, portanto, o resultado do enquadramento do estágio em contexto de trabalho, através da integração nas atividades de manutenção dos equipamentos elétricos da fábrica, nomeadamente na otimização dos processos de manutenção dos transformadores, e no acompanhamento de situações reais de manutenção em campo.

**Palavras-chave:** Manutenção; Planos de manutenção; Transformadores; Estado de conservação.



# Abstract

---

Cement production is an activity with a lot of history at the national level, with the cement industry representing a considerable proportion of the Portuguese economy for years now. However, this begins to reveal something dated and concerns have arisen in the parallel of production systems with their international competitors.

At the juncture of asset management, maintenance becomes necessary in the modelling of operational behaviors and in the implementation of methodologies that contribute to a sustainable management of the plant. In this way, the maintenance policy assumes a decisive role in ensuring the availability and reliability of the equipment used in the production processes, significantly influencing the costs associated with the manufacturing and quality of these products.

In this sense, it was proposed by the direction of the conservation Service of the Souselas Production Center to renew the maintenance plans, with the aim of improving and optimizing the maintenance carried out with the most diverse equipment. Among these, the Transformers are absolutely decisive for the correct operation of the unit, being subjected to several variants with the ability to severely compromise the production levels of the factory, resulting in costs not only of the breakdown as Production is also lacking. This particularity motivated the development of a tool to evaluate the state of general condition of the Transformers. Among the various activities performed, detailed procedures were also developed, with the purpose of assisting the preventive maintenance processes performed to the medium voltage transformers, present at the production center.

This work is therefore the result of the framework of the internship in the context of work, through the integration in the maintenance activities of the electrical equipment of the factory, notably in the optimization of the processes of maintenance of the Transformers, and the monitoring of actual field maintenance situations.

**KEYWORDS:** *Maintenance; Maintenance plans; Transformers State of conservation.*





# Índice de Figuras

---

Figura 1. Cimpor - Centro de Produção de Souselas .....	7
Figura 2. Esquema de uma linha de produção de cimento .....	8
Figura 3. Principais componentes de um transformador a óleo. ....	19
Figura 4. Curva da banheira .....	20
Figura 5. Distribuição de falhas típicas para transformadores de subestações. ....	21
Figura 6. Indisponibilidade do transformador associado a cada tipo de avaria. ....	22
Figura 7. Subestação Cimpor Souselas.....	32
Figura 8. Diagrama Unifilar da Subestação do CPS .....	32
Figura 9. Transformador em avaria: Do lado esquerdo, anel metálico de aperto da fase U levantado e do lado direito perno da fase W fundido devido aos esforços de curto circuito criados pelo defeito. ....	37
Figura 10. Relatório exemplificativo de análise ao óleo nos transformadores do CPS .....	38
Figura 11. Transformador de potência 2 (12MVA) da subestação do CPS.....	41
Figura 12. Transformador de potência 3 (30MVA) da subestação do CPS.....	41
Figura 13. Transformador de corrente no lado da alta tensão do TP3. ....	41
Figura 14. Chapa de características do transformador de corrente do TP3 com uma razão de transformação de 300/5A. ....	42
Figura 15. Transformador de corrente no lado da alta tensão do TP3. ....	42
Figura 16. Cabos para medição das correntes do lado da alta tensão(60kV) e da baixa tensão(6kV)..	42
Figura 17. Representação do bloco que determina as componentes transversal e longitudinal da corrente de alimentação. ....	43
Figura 18. Esquema em ambiente de simulação de TI de 300/5A. ....	43
Figura 19. Esquema em ambiente de simulação de TI de 3000/5A. ....	43
Figura 20. Vetor de Park das correntes elétricas de alimentação com o transformador em condições normais.....	44
Figura 21. Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para o mesma severidade de avaria no enrolamento do primário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no primário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.....	45
Figura 22. Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para a mesma severidade de avaria no enrolamento do primário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no secundário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.....	45

Figura 23. Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para a mesma severidade de avaria no enrolamento do secundário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no primário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.....45

Figura 24. Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para a mesma severidade de avaria no enrolamento do secundário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no secundário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c. ....46

Figura 25. Representação da transformada de Park das correntes de alimentação na situação em que a fase b tem uma falha total. ....46

## Índice de Tabelas

---

Tabela 1. Valores típicos de fator de dissipação dielétrica.....	26
Tabela 2. Aquisição de dados referentes aos planos de manutenção dos transformadores no CPS ...	35
Tabela 3. Comparação de métodos de diagnóstico .....	39

## Índice de Organogramas

---

Organograma 1. Classificação dos tipos de manutenção.....	15
Organograma 2. Organização da direção do Serviço de Conservação.....	33



## Lista de Símbolos

---

$t$	Tonelada métrica;
$t/\text{hora}$	Tonelada por hora;
$t/\text{dia}$	Tonelada por dia;
$V_A$	Tensão de alimentação da fase a;
$V_B$	Tensão de alimentação da fase b;
$V_C$	Tensão de alimentação da fase c;
$R_1$	Resistência da fase a;
$R_2$	Resistência da fase b;
$R_3$	Resistência da fase c;
$\delta$	Ângulo de perdas;
$\theta$	Posição angular de referência;
$i_a$	Corrente de alimentação na fase a;
$i_b$	Corrente de alimentação na fase b;
$i_c$	Corrente de alimentação na fase c;
$i_D$	Componente ortogonal da corrente segundo o eixo d;
$i_Q$	Componente ortogonal da corrente segundo o eixo q;



## Lista de Acrónimos

---

CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques ;</i>
CPS	Centro de Produção de Souselas;
CTEC	Comutador de tensão em carga;
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers;</i>
FD	Fator de dissipação;
IP	Inspeção e Preparação;
IPE	Inspeção e preparação elétrica;
IPM	Inspeção e preparação mecânica;
PM	Plano de Manutenção;
RE	Realização Elétrica;
RM	Realização Mecânica;
SAP	Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados;
SC	Serviço de Conservação;





# Índice

---

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE ORGANOGRAMAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>I</b>
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. A INDUSTRIA CIMENTEIRA.....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. INDÚSTRIA CIMENTEIRA EM PORTUGAL [1, 2].....	5
2.3. CIMPOR – CIMENTOS DE PORTUGAL [1].....	6
2.4. CENTRO DE PRODUÇÃO DE SOUSELAS [1] .....	7
2.4.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO [3] .....	8
2.4.1.1. EXTRAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS.....	9
2.4.1.2. BRITAGEM, PRÉ- HOMOGENEIZAÇÃO E MOAGEM DE CRU .....	9
2.4.1.3. MOAGEM DE CARVÃO .....	9
2.4.1.4. COZEDURA .....	9
2.4.1.5. MOAGEM DE CIMENTO .....	9
2.4.1.6. ENSACAGEM E EXPEDIÇÃO .....	10
2.4.1.7. CONTROLO DE QUALIDADE .....	10
2.5. CONCLUSÃO .....	11
<b>3. A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO.....</b>	<b>13</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	13
3.2. FUNÇÃO DA MANUTENÇÃO .....	13
3.3. PLANO DE MANUTENÇÃO.....	14
3.4. TIPOS DA MANUTENÇÃO .....	15
3.4.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	15
3.4.2. MANUTENÇÃO CORRETIVA PALLATIVA .....	16
3.4.3. MANUTENÇÃO CORRETIVA CURATIVA.....	16
3.4.4. MANUTENÇÃO PREVENTIVA .....	16
3.4.5. MANUTENÇÃO PREVENTIVA SISTEMÁTICA .....	16
3.4.6. MANUTENÇÃO PREVENTIVA CONDICIONADA .....	17
3.4.7. MANUTENÇÃO OPORTUNISTA, ESPECIAL OU EXTRAORDINÁRIA.....	17

3.5.	A DISPONIBILIDADE NA REDE ELÉTRICA .....	17
3.6.	CONCLUSÃO .....	18
<b>4.</b>	<b>TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA .....</b>	<b>19</b>
4.1.	INTRODUÇÃO .....	19
4.2.	AVARIAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA .....	20
4.3.	ESTUDOS ESTATÍSTICOS DE FIABILIDADE .....	21
4.4.	MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM TRANSFORMADORES .....	23
4.4.1.	MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO AO ÓLEO MINERAL ISOLANTE .....	23
4.4.1.1.	ANÁLISE DO ÓLEO .....	23
4.4.1.2.	ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO .....	23
4.4.1.3.	ANÁLISE DOS COMPOSTOS FURÂNICOS .....	24
4.4.2.	MÉTODO DE DIAGNÓSTICO AO PAPEL ISOLANTE .....	24
4.4.2.1.	GRAU DE POLIMERIZAÇÃO .....	24
4.4.3.	TEMPERATURA .....	25
4.4.4.	VIBRAÇÕES .....	25
4.4.5.	MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS .....	26
4.4.5.1.	RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO E ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO .....	26
4.4.5.2.	FATOR DE DISSIPAÇÃO DO DIELÉTRICO OU TANGENTE ( $\delta$ ).....	26
4.4.5.3.	RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS.....	27
4.4.5.4.	RAZÃO DE TRANSFORMAÇÃO .....	27
4.4.5.5.	INDUTÂNCIA DE FUGAS.....	27
4.4.5.6.	CORRENTE DE EXCITAÇÃO.....	28
4.4.5.7.	DESCARGAS PARCIAIS.....	28
4.4.5.8.	TENSÃO DE RESTABELECIMENTO E CORRENTES DE POLARIZAÇÃO .....	28
4.4.5.9.	ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA .....	28
4.4.5.10.	VETOR DE $P_{ARK}$ DA CORRENTE ELÉTRICA DO PRIMÁRIO E DO SECUNDÁRIO.....	29
4.4.6.	DIAGNÓSTICO DE AVARIAS NAS TRAVESSIAS E NO COMUTADOR DE TENSÃO EM CARGA .....	29
4.4.7.	SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA.....	29
4.5.	CONCLUSÃO .....	30
<b>5.</b>	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>31</b>
5.1.	INTRODUÇÃO .....	31
5.2.	REDE ELÉTRICA NO CPS .....	31
5.3.	MANUTENÇÃO NO CPS .....	33
5.3.1.	ORGANIZAÇÃO DO SERVIÇO DE CONSERVAÇÃO .....	33
5.3.2.	PLANEAMENTO, PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO .....	34
5.4.	MANUTENÇÃO DE TRANSFORMADORES NO CPS .....	35
5.5.	PROPOSTAS À ALTERAÇÃO DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO .....	39
5.6.	CONCLUSÃO .....	47
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>

6.1.	CONCLUSÕES GERAIS .....	49
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	50
6.3.	OBSERVAÇÃO FINAL .....	51
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>53</b>



# I. INTRODUÇÃO

---

## I.1. Enquadramento

A ideia de uma fábrica de cimento evocava, até há alguns anos atrás, uma paisagem coberta por uma poeira branca, que se depositava sobre as árvores, telhados, pessoas, por todo o lado.

Como tal, as indústrias de cimento em colaboração com os fabricantes de equipamentos têm vindo a reunir esforços no sentido de otimizar o processo, nos seus diferentes componentes, tendo sempre em vista minorar os aspetos incómodos neste tipo de indústria. Atualmente, apenas uma pequena quantidade de vapor esbranquiçado escapa pelas chaminés das fábricas.

Devido ao elevado consumo de energia, houve necessidade de adaptar as ações de gestão empresarial e procurar soluções para o problema energético dado que o valor representa a maior fatia no custo de fabrico de cimento.

Em resposta a estas exigências, a Fábrica de Cimento, desde a pedreira até à expedição do produto acabado, munuiu-se de equipamentos bastante sofisticados utilizando as mais modernas tecnologias existentes.

Entre esses equipamentos encontram-se os transformadores, e todos os outros equipamentos elétricos responsáveis por grande parte das tarefas de uma linha de produção. Nas últimas décadas a indústria tornou-se de tal forma dependente destas máquinas, que uma simples falha, por mais simples que seja, pode comprometer os níveis de produção diários de uma empresa. Desta forma, a sua manutenção deve ser regular, criteriosa, e, se possível, ajustada para cada equipamento, no sentido de evitar defeitos desnecessários.

Dada esta dependência, torna-se essencial que a manutenção seja um alvo constante de estudo e de remodelações que visem o melhoramento das suas práticas e o aumento da sua eficácia nos diversos equipamentos. É neste contexto que se insere esta dissertação, motivada pela constante necessidade de aperfeiçoar a manutenção exercida nas instalações do Centro de Produção de Souselas (CPS), em Coimbra, do grupo Cimpor- Cimentos de Portugal, S.A., local onde o mesmo foi realizado.

A realização deste trabalho, pretende analisar a evolução e as novas estratégias e políticas de manutenção preventiva e preditiva, bem como melhorar a eficácia daquelas praticadas nos transformadores do CPS, através da implementação de uma nova ferramenta de avaliação do estado de condição geral de transformadores de potência.

## 1.2. Objetivo do trabalho

No decorrer deste estágio, foi necessário compreender o funcionamento da linha de produção de cimento, os conceitos e metodologias associados à sua manutenção e às estratégias adotadas.

Ao longo desta dissertação será analisado em detalhe o conceito manutenção, tanto a nível teórico como prático.

Após uma análise histórica, verificou-se a ocorrência de um acidente devido a uma avaria na parte ativa num destes transformadores. Posteriormente, esta dissertação abordará o objetivo principal: a otimização de estratégias de manutenção através de uma ferramenta capaz de diagnosticar sintomas que indicam a possível ocorrência de avarias em transformadores pela aplicação do método baseado na monitorização da Transformada Complexa Espacial (Vetor de Park) da corrente elétrica do primário e do secundário do transformador.

Desta forma visa fornecer-se o conhecimento teórico essencial para aplicação de uma metodologia capaz de diagnosticar sintomas, com antecedência, de ocorrência de avarias em transformadores de potência.

Este trabalho possui contribuições significativas para a indústria, justificando-se pelas seguintes abrangências:

- Na deteção de falhas nos equipamentos ainda em situação incipiente.
- Na redução de gastos com manutenções corretivas, ao evitar intervenções não programadas e propiciar ações preventivas.
- Na diminuição do número de interrupções de serviço por falhas e/ou defeitos em transformadores de potência.
- Na melhoria de desempenho do sistema elétrico em geral.

## 1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação assenta na otimização de planos de manutenção antigos, com o intuito de aplicar ao Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados (SAP) tarefas necessárias para uma manutenção mais eficiente. Consequentemente, mesmo que não seja parte integrante do objetivo inicial, foram corrigidos alguns erros nas salas elétricas de forma a atualizar a árvore dos locais de instalação do SAP.

De seguida, apresenta-se resumidamente a estrutura do relatório:

No segundo capítulo, é feita uma abordagem sobre a fábrica e contextualizada a evolução da indústria cimenteira até aos dias de hoje, com a descrição pormenorizada do processo de produção de cimento.

No capítulo 3, evolução da manutenção, introduz-se o processo de manutenção e a sua evolução ao longo do tempo e define-se os conceitos associados à manutenção, com auxílio das normas europeias.

No quarto capítulo, averiguam-se as principais causas das avarias que ocorrem nos transformadores e são apresentadas as metodologias relevantes para a previsão de problemas com o objetivo de garantir uma manutenção adequada do transformador de potência.

No quinto capítulo é feita uma breve clarificação sobre o modo de funcionamento da manutenção no Centro de Produção de Souselas e apresenta-se e clarifica-se as vantagens da utilização de determinado método de diagnóstico neste tipo de indústria.

Por último, apresenta-se as principais conclusões obtidas com a realização desta dissertação, os desenvolvimentos nos planos de manutenção propostos que possam vir a ser efetuados e a proposta com a vista a trabalhos futuros.





## 2. A INDUSTRIA CIMENTEIRA

---

### 2.1. Introdução

Neste capítulo, pretende-se fazer um enquadramento da indústria cimenteira em Portugal e no Mundo, de modo a melhor elucidar sobre o tema da dissertação e a sua aplicabilidade neste tipo de indústria.

O cimento, obtido através das matérias-primas que a natureza disponibiliza, marcam a era atual tal como a pedra e o ferro marcaram outrora. O calcário, proveniente da exploração de pedreiras, é a principal matéria-prima do cimento.

De acordo com a Norma Portuguesa (NP EN 197-1): *“O Cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que endurece devido a reações e processos de hidratação, depois de endurecido, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água...”*.

Como uma das principais atividades económicas em Portugal, a evolução da indústria cimenteira depende ainda do dinamismo económico do país e do sector da construção civil. Esta indústria tem acompanhado a evolução do mercado interno, inclusive nos altos e baixos da economia nacional com o pico da construção marcado pela urbanização, que se verificou aquando do crescimento da construção civil e do previsível aumento do consumo de cimento entre a década de 60 e início dos anos 90.

A produção de cimento resume-se, atualmente, à exportação, devido principalmente à crise instalada em Portugal. [1]

### 2.2. Indústria cimenteira em Portugal [1, 2]

Em 1866, operou pela primeira vez em Alcântara, a primeira fábrica de produção de cimento em Portugal com recurso à pedra rasca como matéria-prima. Devido à fraca qualidade do cimento esta acabou encerrada prematuramente tal como as duas fábricas que se seguiram.

A primeira fábrica para a produção de cimento tipo Portland artificial surge em 1892 em Alhandra, após a criação da Companhia de Cimentos de Portugal, esta inicia a sua produção com a fábrica em Outão em 1906.

Já em 1970 são constituídas a Cinorte e a Cisul, responsável pela instalação de uma unidade fabril em Souselas e em Loulé, respetivamente.

Na sequência do 25 de Abril, em 1975, dá-se a nacionalização de diversas empresas, entre elas as da indústria cimenteira, como a Cibra, Cimentos de Leiria, Cinorte Tejo e Cabo Mondego originando assim, em 1976, a Cimpor - Cimentos de Portugal, SGPS, SA.

Anos depois, em 1992, e em concordância com um plano de privatização da indústria cimenteira pelo governo português, surge a CMP (Cimentos Maceira e Pataias), constituída pelas fábricas da Maceira e Cibra, grupo este que viria a ser adquirido dois anos depois pela Secil, também agora uma empresa de capital inteiramente privado.

Atualmente estes são os dois grandes grupos cimenteiros a operar em Portugal, totalizando 6 fábricas.

## 2.3. Cimpor – Cimentos de Portugal [1]

A Cimpor - Cimentos de Portugal, SGPS, SA, pertencente ao grupo OYAK Cement, líder no mercado turco com sede em Ancara, contando com 7 fábricas integradas de cimento, três moagens com capacidade anual de produção de 12 milhões de toneladas por ano, 45 centrais de betão e uma fábrica de sacos de papel. O grupo OYAK estende-se do cimento e betão à mineração, metalurgia, automóvel, energia e química, além de serviços financeiros e logísticos e emprega cerca de 30 mil pessoas em 19 países.

Das áreas de negócio da Cimpor, a produção, distribuição e comercialização de cimento constituem o núcleo principal da sua atividade, embora também produza e comercialize betões, agregados, cal hidráulica e argamassas, destacando-se como um dos maiores grupos cimenteiros a nível mundial e líder no mercado nacional.

Em Portugal a Cimpor detém três grandes centros de produção, bem como uma extensa rede de entrepostos de distribuição espalhados pelo território continental, e um centro de moagem nos Açores. Os centros de produção destinam-se essencialmente à produção e distribuição de cimento, estando situados respetivamente em Souselas (Coimbra), Alhandra (Vila Franca de Xira) e Loulé,

produzindo cerca de 4 Mton/ano (das 9,1 Mton/ano instaladas), destinadas essencialmente à exportação.

## 2.4. Centro de Produção de Souselas [1]

O Centro de Produção de Souselas (CPS) integra uma das três unidades de produção da Cimpor em Portugal. Surgiu no início da década de 70 através da Cinorte, empresa esta recém-formada que viria a ser absorvida pela Cimpor nos anos seguintes (Figura 1).



*Figura 1. Cimpor - Centro de Produção de Souselas*

Esta começou a operar com duas linhas de produção idênticas em 1974 e 1975, respetivamente. Devido à necessidade de aumentar a capacidade instalada, em 1982 viria a arrancar uma terceira linha com uma melhor tecnologia e maior capacidade de produção quando comparada às restantes, totalizando uma capacidade de produção instalada superior a 2 Mton/ano, e quatro moagens de clínquer com uma capacidade de produção instalada de 2,85 Mton/ano.

Atualmente, embora o clínquer possa também ser expedido como produto final, o CPS tem como principal atividade a produção e expedição de 3 tipos de cimento distintos, abrangidos e certificados segundo a norma EN 197-1, sendo estes:

- ✓ CEM I 42,5R
- ✓ CEM II/A-L 42,5R
- ✓ CEM II/B-L 32,5N

Juntamente com o Centro de Produção de Loulé, o CPS foi uma das primeiras fábricas do país a produzir cimento pelo processo da “via seca” e a primeira a utilizar a técnica da pré-homogeneização na preparação das matérias-primas, destacando-se assim como uma das principais fábricas da Cimpor desde os seus primórdios, servindo como referência para muitas outras que viriam a ser construídas, entretanto.

### 2.4.1. Processo de produção [3]

A qualidade do cimento depende não só da matéria-prima como também do processo de fabricação e do equipamento nele utilizado e por tal é um processo complexo distribuído por etapas que vão desde a transformação de matérias-primas até à obtenção do produto final.

O processo de fabrico de cimento no CPS é em todo semelhante ao presente noutras cimenteiras, no entanto, este tem como principal particularidade o facto da extração das matérias-primas rochosas ser realizada na própria unidade fabril que só é possível devido à morfologia do terreno circundante. Assim, o CPS acaba por executar o processo de fabrico completo, abrangendo todas as etapas responsáveis pela transformação do calcário e dos restantes compostos em cimento. [3]

De forma resumida pode observar-se na Figura 2 o processo de produção de cimento usado no CPS.

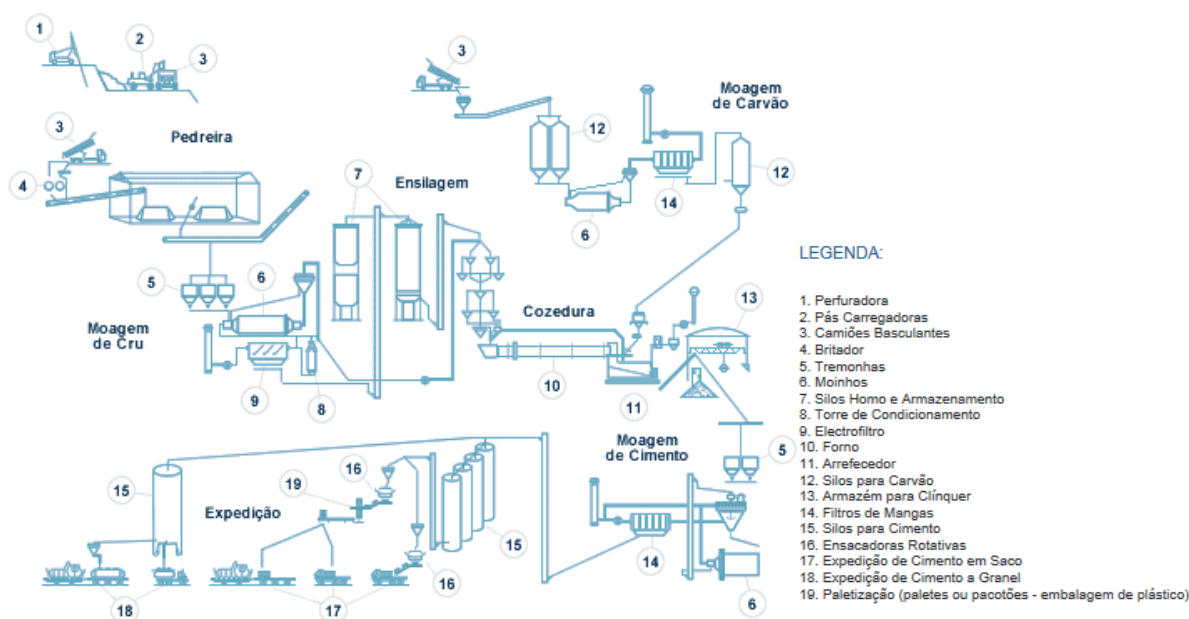


Figura 2. Esquema de uma linha de produção de cimento [3]

O processo produtivo de cimento pode ser dividido em cinco etapas principais, de seguida será apresentado através de tópicos todo o processo de produção do cimento, que, tal como mencionado, coincide com aquele executado no CPS.

#### 2.4.1.1. Extração de matérias-primas

As matérias-primas (calcários, margas, etc.) são extraídas através de desmonte, método que consiste em fragmentar o maciço em exploração com o auxílio a explosivos, da pedreira. Os materiais são desgregados e posteriormente transportados em *dumpers*<sup>1</sup> até à britagem. [3]

#### 2.4.1.2. Britagem, Pré- homogeneização e Moagem de cru

Aquelas matérias-primas, com a eventual adição de corretivos (areias, cinzas de pirite, calcários de alto teor, etc.), são simultaneamente secas e moídas até à obtenção de um pó muito fino (cru ou farinha), que é depois armazenado e homogeneizado.

#### 2.4.1.3. Moagem de carvão

São vários os combustíveis utilizados na indústria cimenteira, mas os mais comuns são o carvão e o coque de petróleo. Qualquer destes combustíveis necessita de uma moagem preliminar, de modo a permitir a sua injeção e ignição no interior do forno, assegurando e otimizando o perfil térmico.

#### 2.4.1.4. Cozedura

Um tratamento térmico adequado transforma a farinha num produto intermédio - o clínquer - no qual já é possível encontrar os constituintes mineralógicos do cimento. A farinha, saída dos silos de homogeneização, entra num permutador de calor (torre de ciclones) em contracorrente com os gases quentes provenientes do forno, iniciando-se o processo de descarbonatação, através da queima de carvão ou dos combustíveis derivados de resíduos (CDR's). De seguida, no forno cilíndrico rotativo (tubo ligeiramente inclinado para facilitar o deslizamento da farinha no seu interior), onde a temperatura atinge valores superiores a 1500°C, ocorre a cozedura (clínquerização) da farinha, dando origem ao clínquer. Este é então arrefecido bruscamente para estabilização da sua estrutura e recuperação parcial da energia térmica. Ao sair do forno este é arrefecido bruscamente num arrefecedor de grelhas, sendo posteriormente armazenado nos armazéns ou silos de clínquer. Os gases quentes que saem da torre de ciclones são despoeirados antes de serem reenviados à atmosfera.

#### 2.4.1.5. Moagem de cimento

O clínquer é transportado para os moinhos de cimento para que finalmente se obtenha o cimento. Contudo, a simples moagem do clínquer puro, resultante da cozedura, origina um cimento extremamente instável, podendo endurecer logo após a combinação com água, ou até simplesmente com o contacto do ar. De forma a evitar estas situações, e como uma das propriedades mais

---

<sup>1</sup> Veículo de grandes dimensões com capacidades de carregamento entre 40 a 50 toneladas.

importantes do cimento é a maneabilidade, o clínquer é transportado para as tremonhas das moagens de cimento, onde se dá a sua junção com certos componentes, como o gesso e outros eventuais aditivos ("*filler*" calcário, cinzas volantes, escórias siderúrgicas, etc.) contendo trióxido de enxofre ( $SO_3$ ).

Estes componentes garantem ao cimento as propriedades requeridas para uma boa qualidade do mesmo.

Após doseado nas proporções requeridas conforme o tipo de cimento pretendido, o clínquer, já misturado com os restantes materiais, é introduzido num moinho onde se dá a moagem e consequente origem do cimento. Os materiais são moídos em volumetrias pré-estabelecidas em concordância com o plano de qualidade, e de forma a satisfazer as normas específicas em vigor. O armazenamento do cimento é de seguida efetuado num dos 9 silos presentes na unidade fabril, onde permanece até ao momento da sua ensacagem e expedição.

#### 2.4.1.6. Ensacagem e expedição

No CPS existem duas formas de comercializar o produto: sob a forma de clínquer, que é vendido a granel, e de cimento, que representa a maior parte das vendas. Este pode ser ensacado em unidades de 25, 35 ou 50 kg, e expedido em paletes normalmente através da via-férrea presente na unidade fabril. O cimento pode ainda ser expedido a granel, que consiste no enchimento dos camiões-cisterna ou vagões-cisterna a partir diretamente dos silos.

#### 2.4.1.7. Controlo de qualidade

O controlo do processo de qualidade, mesmo que não faça parte do diagrama de fabrico, é uma tarefa implícita e executada ao longo de todas as etapas da produção de cimento, mediante a utilização de equipamentos e processos de controlo altamente sofisticados, que lhes permite, a partir do laboratório e das salas de comando presentes nas instalações do CPS, coordenar e controlar todos os todos os equipamentos produtivos garantindo a observação dos limites de segurança e as especificações dos produtos intermédios e finais. Este é um processo extremamente importante para a qualidade do produto, uma vez que define os limites de segurança e as características destes produtos. Por sua vez, como já referido, este controlo estende-se às mais variadas etapas do processo de fabrico, de tal modo que as ações corretivas podem, e devem, sempre que possível, ser efetuadas antes que as restantes fases do processo e/ou produtos sejam afetadas.

## 2.5. Conclusão

Ao longo do presente capítulo foram apresentadas, de forma sucinta, as características da indústria cimenteira, como a sua história, o âmbito em que esta se insere em Portugal e o processo de fabrico associado. Foi atribuído um especial destaque ao grupo Cimpor, mais propriamente ao CPS, uma vez que o estágio curricular referente ao presente relatório se realizou no seio da empresa.

Assim sendo, torna-se importante referir estes detalhes como forma de ambientar e servir como base para o desenvolvimento do trabalho proposto, que vai desde o conhecimento da estrutura de manutenção e da influência dos seus métodos, passando pelo funcionamento e otimização dos planos de manutenção dos transformadores de potência do CPS.





## 3. A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO

---

### 3.1. Introdução

No meio competitivo que se vive nos dias de hoje, um dos requisitos para a sustentabilidade de um negócio é a capacidade de capitalizar face a qualquer circunstância. Manutenção é um conceito muitas vezes associado a um conjunto de métodos e estratégias com a intenção de rentabilizar ao máximo a vertente económica de um determinado projeto. Existem vários significados para o conceito de manutenção, todos eles têm subentendido que a função da manutenção é a garantia da disponibilidade dos equipamentos de produção, através da avaliação das imperfeições no património tecnológico investido. Ou seja, a manutenção pode ser entendida como uma atividade realizada sobre um sistema reparável, de forma a garantir que o mesmo exerça corretamente as suas funções, e/ou amplie características fundamentais como a qualidade, disponibilidade, fiabilidade e segurança.

A Norma Portuguesa 13306/2007 define manutenção como: *“Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida.”*

### 3.2. Função da manutenção [4]

A função da manutenção é garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações a fim de atender a um processo de produção ou serviço com: Confiabilidade, Segurança, Preservação do meio ambiente e Custo adequado. Assim, a manutenção tem como objetivos fundamentais a otimização de custos, a melhoria na qualidade dos bens produzidos, o aumento da disponibilidade das máquinas e, conseqüentemente, o aumento da produção, a redução dos efeitos nocivos para o meio ambiente, o aumento da vida útil dos equipamentos e o aumento da segurança.

No entanto, os objetivos da manutenção variam consoante o equipamento e a função que deve desempenhar e por tal, as atividades podem ser distinguidas pela sua função primária e secundária.

As funções primárias são realizadas pelo serviço de conservação e abrangem tarefas como a participação na concepção, construção, instalação de novos equipamentos, inspeção, limpeza e lubrificação para além da preparação dos planos da manutenção, análise de custos e registo de histórico dos equipamentos, infraestruturas, terrenos.

As funções secundárias são a gestão de armazenamento de peças, a proteção e segurança das instalações, a eliminação das fontes de poluição, a higiene e segurança no trabalho, entre outras. Estas surgem por razões de conveniência e de cedência de tarefas de menor relevância, mas é importante não atenuar a importância das funções primárias em detrimento destas.

### 3.3. Plano de manutenção

*“Conjunto estruturado de tarefas que compreendem as atividades, os procedimentos, os recursos e a duração necessários para executar a manutenção.” [5]*

No âmbito da manutenção preventiva seguem-se programas de rotina para perceber o estado dos equipamentos com o intuito de melhorar a qualidade e o controlo das práticas da manutenção. A necessidade de programar e organizar, com antecedência, a manutenção a aplicar a cada equipamento leva à realização de planos de manutenção constituídos por um conjunto de tarefas fixas. Estas ações descritas no plano devem respeitar uma certa periodicidade dependendo da disponibilidade e da criticidade no desempenho das suas funções. Assim sendo, cabe à equipa de manutenção o conhecimento exaustivo da máquina, de forma a elaborar o plano mais adequado possível que garanta a eficácia das tarefas executadas.

Os planos de manutenção podem ainda conter informações que melhor o complementem, tais como as características da máquina, o seu local de instalação, a equipa responsável pelas funções, os recursos humanos necessários, etc.

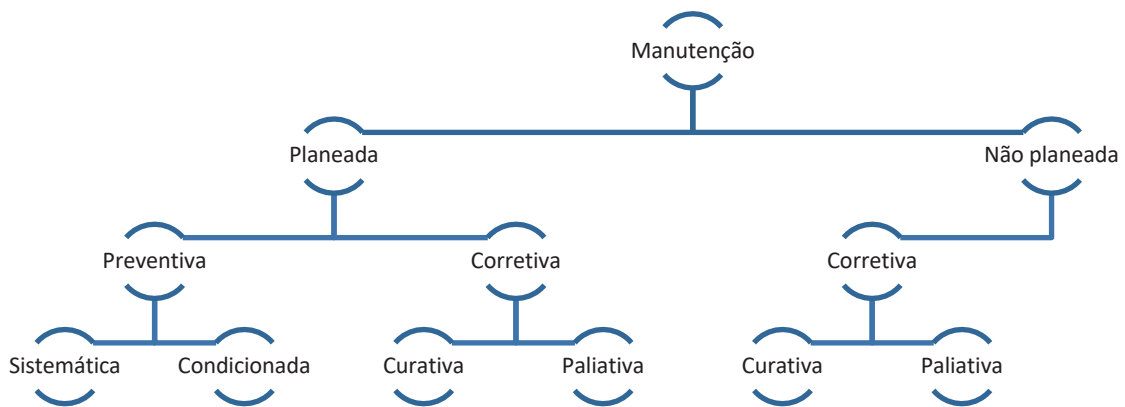
Não existe um modelo exato no que diz respeito à elaboração de um plano de manutenção, mas este deve conter as informações necessárias e expostas de forma clara, para que não levante dúvidas à equipa responsável pela sua execução.

### 3.4. Tipos da manutenção

Durante a evolução dos processos produtivos e da tecnologia surgiram variantes na manutenção. Estas podem agrupar-se em diferentes categorias conforme as suas características, embora uma determinada organização não se possa cingir exclusivamente a uma delas e por tal, deve procurar uma participação conjunta das mesmas com o objetivo de alcançar o equilíbrio.

Primeiramente, as variantes da manutenção podem dividir-se em planeada, ou seja, permite o planeamento das ações de intervenção para o momento oportuno e em não planeada, caso os defeitos ocorram de forma imprevista. De seguida destacam-se essencialmente dois tipos: a manutenção preventiva e manutenção corretiva.

Tão importante como conhecer a árvore estrutural, que podemos visualizar no Organograma 1, das diferentes vertentes da manutenção, é também saber em que cada uma delas consiste e quando aplicadas. Os seguintes pontos sintetizam cada um destes tipos.



*Organograma 1. Classificação dos tipos de manutenção.*

#### Manutenção Corretiva

*“É a manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria, e destinada a repor o bem num estado que possa realizar uma função requerida.” [5]*

A manutenção corretiva é definida como sendo a manutenção realizada após deteção de uma avaria ou de um estado de degradação elevado, e destinada a repor determinado equipamento numa condição em que possa executar em pleno as funções requeridas com um rendimento conveniente.

Como é possível observar no Organograma 1, a manutenção corretiva pode ser dividida em duas classes: planeada ou não planeada. A manutenção não planeada está associada, normalmente, a um defeito aleatório quase sempre inesperado. Esta é sempre mais dispendiosa e causa perdas de

produção significativamente mais elevadas, estando normalmente associada a avarias mais graves. A manutenção planeada é programada para ocorrer antes da falha total do equipamento.

### 3.4.2. Manutenção Corretiva Paliativa

A manutenção paliativa está normalmente associada à reparação após a falha e visa colocar a máquina ou equipamento em condições de utilização, restabelecendo uma condição provisória de funcionamento, de forma a evitar custos acrescidos enquanto se programa a manutenção curativa futura, de forma a repor definitivamente a condição técnica do mesmo.

### 3.4.3. Manutenção Corretiva Curativa

A manutenção curativa consiste num conjunto de práticas com capacidade de restaurar definitivamente o equipamento, aplicadas posteriormente à avaria, normalmente não planeada, ou resultantes do planeamento efetuado após o restauro provisório do mesmo, mediante a execução da manutenção paliativa. Habitualmente, este é o tipo de manutenção mais dispendioso, uma vez de exige a maior demanda de gastos e a paragem do equipamento.

### 3.4.4. Manutenção Preventiva

*“Manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou degradação do funcionamento de um bem.” [5]*

A manutenção preventiva é um tipo de manutenção planeada, efetuada com a intenção de evitar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de avarias e da degradação do sistema de uma determinada máquina que não se encontra com defeito. Segue, normalmente, um plano de manutenção periódico com ações de manutenção prescritas, fundamentadas segundo uma análise financeira e de fiabilidade, com o intuito de avaliar o benefício e a rentabilidade da sua aplicação.

Embora o principal objetivo seja prevenir, cabe também à manutenção preventiva o planeamento das intervenções necessárias. Assim sendo, deve sempre existir uma complementaridade com a manutenção curativa, no sentido de garantir o custo mínimo.

### 3.4.5. Manutenção Preventiva Sistemática

*“Manutenção preventiva efetuada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem.” [5]*

A manutenção sistemática consiste num conjunto de inspeções e ensaios realizados em equipamentos que não apresentam qualquer falha, com a intenção de reduzir a probabilidade de

falha ou avaria. Obedece a um plano periódico preestabelecido segundo intervalos constantes, ou regido pelas horas de funcionamento, quantidade de ciclos, unidades produzidas, etc.

### 3.4.6. Manutenção Preventiva Condicionada

*“Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes.” [5]*

A manutenção condicionada, muitas vezes apelidada como manutenção preditiva, é um tipo de manutenção adjacente ao progresso dos parâmetros medidos e avaliados, segundo análises ponderadas e previamente programadas. Esta é, portanto, um tipo de ação preventiva sustentada pelo conhecimento do estado de cada um dos componentes vitais das máquinas e equipamentos, servindo como um indicador para o seu estado de degradação e consequente necessidade de intervenção baseado no cruzamento da informação recolhida.

Entre as diversas análises e medições incidentes na manutenção condicionada, destacam-se algumas como por exemplo a termografia, a análise de vibrações, a medição ruído, etc.

Hoje em dia já é prática comum a contratação de empresas externas com serviços especializados nesta área, algo recorrente no CPS em algumas atividades.

### 3.4.7. Manutenção Oportunista, Especial ou Extraordinária

A chamada manutenção oportunista, especial ou extraordinária é normalmente associada à manutenção preventiva quando por diversos motivos não se encaixam em nenhuma das anteriores. No CPS, estas intervenções podem ser executadas mediante, por exemplo, a recomendação do fabricante. A oportunidade de intervir num equipamento que supostamente deveria estar em funcionamento é gerada por uma paragem da linha de produção que fez com que este ficasse disponível para tal.

## 3.5. A disponibilidade na rede elétrica

As vantagens económicas alcançadas por uma correta Gestão da Manutenção são um argumento válido para um interesse crescente no seu desempenho pois o objetivo principal de uma empresa é gerar lucros. Uma máquina com um mau desempenho devido à ineficácia da manutenção e os tempos mortos conduzem à diminuição no lucro, perda de produção e perdas de oportunidades no mercado.

As vantagens da manutenção podem ser encontradas quando a consequência da sua correta atuação, resulta na observação de falhas que não aconteceram, mas que teriam ocorrido se não tivessem sido tomadas as medidas preventivas. A manutenção é concebida como um investimento, já que os custos suplementares serão recuperados várias vezes com o aumento da disponibilidade do equipamento.

É necessário avaliar quais os equipamentos mais críticos e preocupantes a nível da manutenção. A manutenção preventiva não pode ser decidida meramente ao acaso, terá de ser planificada com base em provas de necessidade, tendo em conta os custos e o conhecimento dos seus efeitos. A dificuldade consiste em repartir de forma eficaz as várias ações de manutenção preventivas ou condicionadas em função do nível das corretivas.

A Gestão da Manutenção praticada na fábrica do CPS tem otimizado ao longo dos anos o seu planeamento, o que tem sido determinante para assegurar a continuidade da produção, a garantia de qualidade do produto e satisfação do mercado em que se insere.

### 3.6. Conclusão

A importância da manutenção como prática contínua na indústria é compreendida pela revisão bibliográfica presente ao longo deste capítulo.

É possível então concluir que, nos dias de hoje uma correta gestão de ativos passa por identificar, analisar e intervir num equipamento, a tempo. Encontrar o equilíbrio entre o desempenho do equipamento e a rentabilização dos custos associados é possível, mediante a escolha correta do tipo de ações a aplicar.

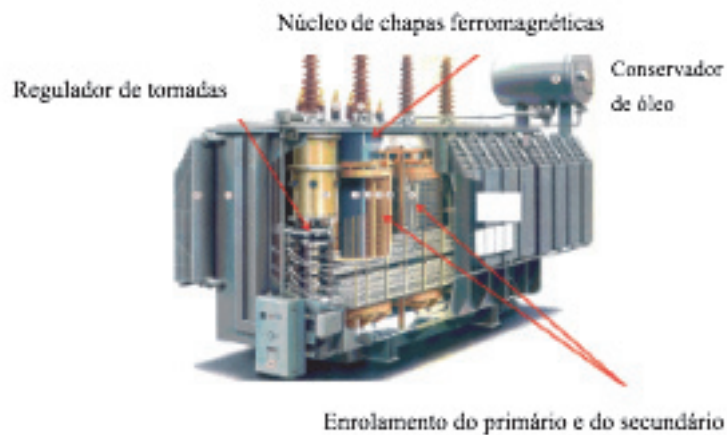
## 4. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

---

### 4.1. Introdução

Os transformadores constituem um dos componentes vitais dos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. Reclamam sobre estes equipamentos grandes preocupações relativamente à sua manutenção e, conseqüentemente, ao desenvolvimento de métodos capazes de fornecer um diagnóstico completo e fidedigno do seu estado de funcionamento. Efetuar uma manutenção preventiva rigorosa e devidamente planeada é imperativo para conseguir o máximo de fiabilidade e o aumento do tempo de vida útil dos equipamentos. [6]

Antes de implementar qualquer estratégia de manutenção é importante conhecer quais as avarias mais comuns, as suas causas e os mecanismos de deterioração dos principais componentes dos transformadores de potência (Figura 3). O desconhecimento desta informação pode resultar na aplicação de técnicas de diagnóstico que não beneficiam de forma significativa a fiabilidade do transformador ou o prolongamento da sua vida útil.



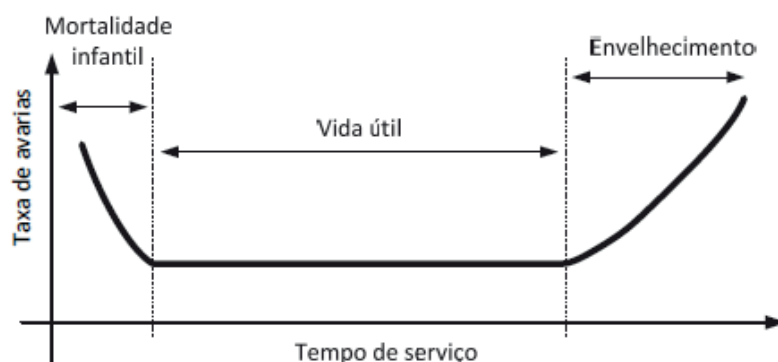
*Figura 3. Principais componentes de um transformador a óleo. [15]*

Estudos estatísticos realizados, em 1978, relativamente às avarias em transformadores, dos quais se destacam os trabalhos da responsabilidade da CIGRE e do IEEE, permitem a comparação de resultados. [7] [8]

Este capítulo apresenta uma caracterização das avarias mais comuns nos transformadores de potência e, de seguida, será feita uma revisão bibliográfica acerca dos principais métodos de diagnóstico para previsão de avarias em transformadores de potência.

## 4.2. Avarias em transformadores de potência

A evolução ao longo do tempo da taxa de avarias nos transformadores é vulgarmente representada com a curva de vida, normalmente designada por curva da banheira, como se observa na Figura 4. Esta curva representa três períodos diferentes no ciclo de vida do transformador. O primeiro período, designado “Infância”, a taxa de avarias é decrescente e deve-se, principalmente às deficiências no projeto, fabrico, montagem e instalações incorretas. Durante a “Vida Útil” a taxa de avarias é praticamente constante e as avarias ocorrem devido a causas externas ao equipamento, erros de manutenção e operação e o seu número não tende a variar com o passar do tempo. É durante este período que se devem enquadrar as técnicas de manutenção periódicas. No “Envelhecimento” a taxa de avarias é crescente, devido ao desgaste e fadiga dos componentes. Existe particular interesse em conhecer o início deste período, pois a estratégia de manutenção terá de ser adequada à condição atual (envelhecida) do transformador, sendo os intervalos de intervenção diferentes daqueles definidos para o período antecedente (taxa de avarias constante) [7].



*Figura 4. Curva da banheira*

Uma das causas de avarias mais comuns resulta da deficiente manutenção realizada aos equipamentos, ou porque são realizadas fora do período normal estipulado para o efeito, ou porque não se realizaram ações de manutenção adequadas ao transformador. É também muito importante o conhecimento específico de cada componente por parte dos operadores que efetuam trabalhos de manutenção, para que as operações de manutenção se realizem da melhor forma.

A implementação de planos de manutenção preventiva é essencial para a redução da possibilidade de ocorrência de avarias. Adicionalmente, o correto funcionamento dos sistemas de proteção é também essencial para que as avarias sejam detetadas o mais rapidamente possível, de forma a impedir a sua progressão e que alcancem proporções catastróficas.

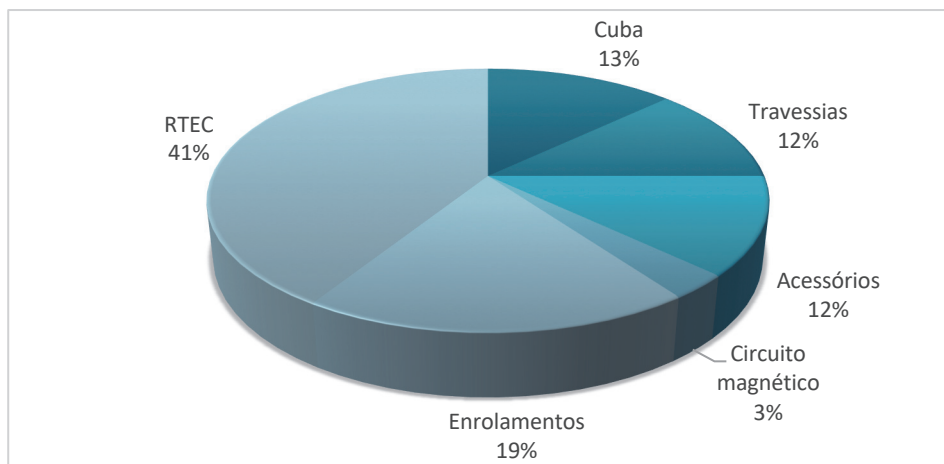


### 4.3. Estudos estatísticos de fiabilidade [10]

A identificação das principais causas de avaria possibilita a implementação de estratégias corretivas em unidades similares e desta forma prevenir a ocorrência de avarias do mesmo tipo, no futuro.

Devido à diversidade dos estudos relativos às avarias em transformadores de potência, à forma como as questões são colocadas nos inquéritos, à utilização de diferentes definições de avaria e à existência de dúvidas na interpretação dos dados a análise sobre a fiabilidade dos transformadores, conclui-se que a taxa de avarias dos transformadores varia, hoje em dia, entre 1% e 2% e 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. O custo médio de uma avaria, associado a interrupção de fornecimento de energia, pode chegar aos milhões de euros e, os tempos médios de reparação duram cerca de 15 a 70 dias, aproximadamente. [11]

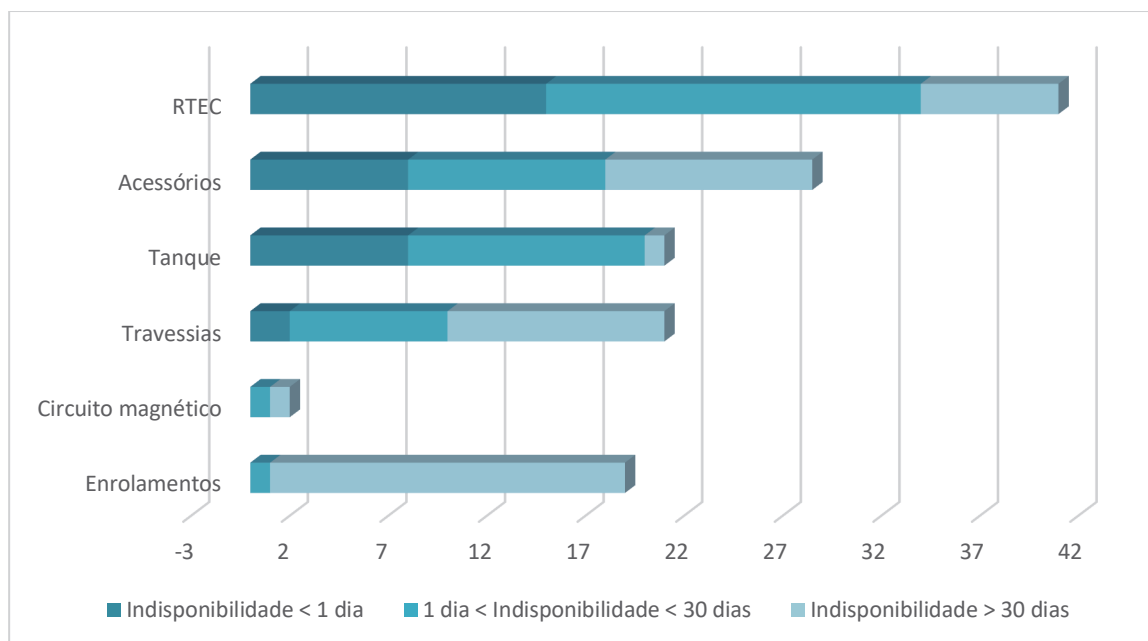
As avarias relativas aos reguladores de tensão em carga e aos enrolamentos, conforme ilustrado na Figura 5, são predominantes e representam, segundo os trabalhos da CIGRE e do IEEE, aproximadamente 41% e 19%, respetivamente, do número total registado. Estes estudos realizados em 1978, embora desatualizados, são os únicos, que até aos dias de hoje, têm uma dimensão relevante e permitem obter informação sobre uma população distinta. [7, 8]



*Figura 5. Distribuição de falhas típicas para transformadores de subestações.*

Refira-se, ainda, que as avarias relativas aos enrolamentos são aquelas a que se encontram associados os maiores períodos de indisponibilidade dos transformadores, como se observa na Figura 6.

A melhoria substancial da sua fiabilidade implica ainda um controlo de qualidade eficaz de forma a atenuar os defeitos de fabrico e também a implementação de estratégias de manutenção adequadas.



**Figura 6. Indisponibilidade do transformador associado a cada tipo de avaria.**

Com propósito de fornecerem um diagnóstico completo e fiável a respeito da ocorrência de avarias em transformadores trifásicos, têm sido desenvolvidos alguns métodos. Estes têm sido largamente utilizados e baseiam-se na análise dos gases dissolvidos no óleo, na deteção elétrica e/ou acústica de descargas parciais, e ainda na análise termográfica. Outros há, tais como os baseados na análise das vibrações, ou ainda do fluxo magnético de fugas, que são igualmente referidos na extensa bibliografia publicada neste domínio. De índole diferente dos métodos anteriormente referidos, distinguem-se também as estratégias de diagnóstico, não aplicáveis em serviço, baseadas na análise da resposta a impulsos de tensão (particularmente através da análise da função de transferência) ou ainda na análise da corrente de excitação. [10]

A análise dos dados estatísticos disponíveis permite concluir que a população de transformadores se encontra globalmente envelhecida e com uma taxa de avarias que apresenta uma tendência crescente. Da análise destes estudos conclui-se ainda que predominam as avarias relativas aos enrolamentos, comutador de tensão e travessias. São os defeitos de isolamento nos enrolamentos que provocam os maiores períodos de indisponibilidade e os que provocam mais frequentemente a perda total do transformador, resultando assim em prejuízos mais avultados.

A melhoria substancial da fiabilidade dos transformadores implica o desenvolvimento de novos métodos de diagnóstico capazes de proporcionarem a implementação de estratégias de manutenção adequadas e de detetarem os sintomas da avaria ainda numa fase incipiente.

## 4.4. Métodos de diagnóstico de avarias em transformadores

O estado de funcionamento do transformador pode ser diagnosticado por diferentes métodos. Alguns destes métodos incluem técnicas com créditos firmados e utilização generalizada durante as últimas décadas, podendo ser classificados como tradicionais, outros são de aplicação recente ou encontram-se ainda em fase de investigação e desenvolvimento. Apresenta-se de seguida uma breve síntese sobre os principais métodos de diagnóstico referidos na extensa bibliografia publicada neste domínio.

### 4.4.1. Métodos de diagnóstico ao óleo mineral isolante

#### 4.4.1.1. Análise do óleo

A análise do óleo permite verificar, através de ensaios elétricos, físicos e químicos, a ocorrência de as alterações das suas propriedades elétricas e do seu grau de contaminação. Para esta análise são realizados vários testes: rigidez dielétrica, índice de acidez, fator de potência, humidade relativa, tensão interfacial, cor, lamas e sedimentos, teor de partículas, entre outros.

O tempo de vida do transformador é afetado pelo estado do óleo isolante.

#### 4.4.1.2. Análise de gases dissolvidos no óleo

Este tipo de diagnóstico revelou-se como o método preferencial para diagnosticar avarias evolutivas e consiste na análise dos gases dissolvidos no óleo isolante de transformadores imersos em óleo. A ocorrência de esforços térmicos e elétricos ao longo da vida do transformador conduz à deterioração do material isolante que, por sua vez, vão dar origem à ocorrência de descargas parciais, sobreaquecimento ou arcos elétricos. Como resultado, vários tipos de gases são gerados e dissolvidos no óleo de isolamento do transformador, dependendo a sua composição e proporção da severidade, localização e energia dissipada pela avaria. As concentrações totais de gases no óleo, a sua proporção relativa e as velocidades de incremento da concentração de cada gás são usadas para estimar o estado do transformador.

De forma a relacionar estes parâmetros com determinados tipos de avarias, vários critérios de interpretação dos resultados da análise cromatográfica dos gases têm sido desenvolvidos ao longo dos anos. A presença em solução no óleo de determinados gases chave, em concentrações acima de valores considerados normais<sup>2</sup>, designadamente hidrogénio, hidrocarbonetos e óxidos de carbono, constitui um destes critérios, que associa a concentração destes gases a diversos tipos de avarias. Caso um ou mais dos referidos gases surjam em concentrações superiores ao seu respetivo valor

---

<sup>2</sup> Valor normal para um determinado gás, é o valor da concentração desse gás no óleo até ao qual a experiência mostra que é muito baixa a ocorrência de defeitos internos no transformador.

normal, são calculadas as razões entre as concentrações de determinados gases, as quais variam consoante o critério de interpretação escolhido.

A análise dos gases dissolvidos no óleo é feita recolhendo uma amostra e enviando-a para exame num laboratório especializado. É prática comum utilizar uma periodicidade anual na recolha da amostra, exceto em casos onde se suspeite já de problemas no transformador. O tempo de evolução de muitas avarias em transformadores pode ser bastante mais curto que este período de amostragem, não permitindo assim detetar o defeito ainda numa fase incipiente e minimizar os danos de um eventual incidente de dimensões catastróficas. [10, 11]

#### 4.4.1.3. Análise dos compostos furânicos

A análise dos compostos furânicos permite avaliar a deterioração do papel e conseqüentemente monitorar o estado de conservação dos enrolamentos do transformador. A causa normalmente associada aos defeitos considerados graves com origem no papel isolante, é a sua degradação química.

Este método trata-se de uma ferramenta bastante útil pois não é possível coletar uma amostra de papel isolante com o transformador em serviço. Os compostos furânicos dissolvidos no óleo, principalmente o 2-furfuraldeído (2FAL), que se forma através das reações de degradação da celulose, é o composto mais usado como indicador do estado de degradação do papel.

Este é o método mais utilizado para a determinação do nível de degradação do papel isolante, tendo como vantagem, a não perturbação do funcionamento normal do transformador, podendo ser mantido ao serviço, durante a recolha do óleo para análise. Como a deterioração tende a aparecer de forma diferenciada entre as bobinas e ao longo da mesma bobina, este método deve ser usado a título de referência. [10]

### 4.4.2. Método de diagnóstico ao papel isolante

#### 4.4.2.1. Grau de polimerização

Os materiais isolantes sólidos são produzidos a partir de celulose, cujos parâmetros de avaliação se baseiam no grau de polimerização. Para quantificar a degradação do papel isolante, o valor do grau de polimerização da celulose, é um método convencional e, consiste na medição do comprimento médio dos polímeros das moléculas de celulose. Quanto mais deteriorado estiver o papel isolante, menor será o grau de polimerização. Conseqüentemente, as cadeias celulósicas estarão quebradas e o papel, mais quebradiço, terá menor capacidade de suportar esforços mecânicos, principalmente quando o transformador for submetido a um curto-circuito.

Para efetuar a análise, é necessário obter uma amostra de papel isolante do transformador coletadas no ponto mais quente das bobinas, o que implica a colocação fora de serviço da unidade e a atuação

de técnicos especializados. Adicionalmente, nada garante que as amostras recolhidas sejam representativas de todo o enrolamento. [11]

#### 4.4.3. Temperatura

Tradicionalmente, com base nos valores medidos da temperatura do óleo nas partes superior e inferior da cuba determina-se a temperatura dos enrolamentos. Os resultados mais promissores, no desenvolvimento de sensores para monitorizar a temperatura nos enrolamentos do transformador, recaem sobre soluções assentes em fibras óticas. Estes dispositivos mostraram resultados positivos em serviço. No entanto, alguns problemas estão ainda por resolver, pois, uma vez que os sensores terão de estar expostos a condições de alta tensão, para preservar a integridade do sistema de isolamento requerem elevada precaução. Atualmente um dos problemas reside no facto de estes sensores apenas poderem ser instalados nos enrolamentos quando o transformador é fabricado ou está em reparação.

Hoje em dia recorre-se a câmaras de análise termográfica por infravermelhos para a deteção indireta da temperatura em toda a estrutura do transformador.

Este procedimento de rotina faz parte dos planos de manutenção mais básicos dos transformadores de potência. [10, 11]

#### 4.4.4. Vibrações

Com o propósito de se obter um método fiável de diagnóstico da integridade mecânica dos enrolamentos, seguiu-se para a análise das vibrações produzidas quando o transformador se encontra em serviço. Em condições normais de funcionamento, as principais fontes de vibração provêm do núcleo e dos enrolamentos, que, através do óleo de arrefecimento e da estrutura sólida são transmitidas para a cuba.

Os sinais obtidos a partir dos sensores de vibrações, adequadamente posicionados nos lados e topo da cuba do transformador são registados num dispositivo adequado. No caso de existir um defeito como um curto-circuito, a integridade mecânica do transformador pode ser alterada. Certas alterações, tais como, a falta de pressão de fixação dos enrolamentos, conduzem a uma degradação do isolamento e desta forma, a resposta vibratória será alterada.

A variedade das fontes causadoras de vibrações (excitação primária, fluxos de dispersão, interações mecânicas, comutação de cargas, entre outras) podem tornar a medição e a análise das vibrações uma tarefa complexa. [10, 11]

## 4.4.5. Métodos de diagnóstico de parâmetros elétricos

### 4.4.5.1. Resistência de isolamento e índice de polarização

A medição da resistência de isolamento é utilizada para determinar as condições de isolamento entre enrolamentos e as partes aterradas, indicando o possível contato entre partes inicialmente isoladas. Esta corrente depende da temperatura, da humidade e do nível de impurezas presentes nos materiais de isolamento. Este teste deverá ser realizado antes e após uma reparação ou durante uma ação de manutenção ao transformador, devendo os resultados obtidos serem guardados para comparação de futuras medições.

O índice de polarização é definido como a razão entre as resistências de isolamento medidas após 10 minutos e 1 minuto de tensão aplicada, respetivamente. Quando o isolamento se encontra em boas condições a resistência de isolamento tem inicialmente um valor reduzido e depois eleva-se à medida que a componente capacitiva da corrente de fugas diminui. Assim, um índice de polarização com um valor reduzido indicia problemas no sistema de isolamento. [9]

### 4.4.5.2. Fator de dissipação do dielétrico ou **tangente** ( $\delta$ )

O fator de dissipação do dielétrico é definido como a razão entre a componente resistiva e a componente capacitiva da corrente de fugas, também conhecido por  $\tan(\delta)$ , onde  $\delta$  representa o ângulo de perdas. Um valor reduzido de ensaio da  $\tan(\delta)$  constitui um indicador de valores reduzidos de perdas dielétricas, ou seja, que o isolamento se encontra em boas condições. Quando a um isolante é aplicada uma tensão alternada a corrente de fugas resultante possui duas componentes, resistiva e capacitiva. No caso de um isolante perfeito a corrente seria puramente capacitiva estando em avanço de  $90^\circ$  em relação à tensão, mas na prática este ângulo será menor que  $90^\circ$ , devido às perdas normais do material isolante pois a componente resistiva da corrente de fugas aumenta com a deterioração do dielétrico.

Para transformadores de potência de boa qualidade, novos com isolamento de óleo e papel os valores do fator de dissipação são, geralmente, inferiores a 0,5%. Este resultado é publicado por outros elementos bibliográficos, tais como, os descritos na Tabela 1.

*Tabela 1. Valores típicos de fator de dissipação dielétrica [Fonte: Cimpor]*

Transformador	Condições De Isolamento		
	Bom	Aceitável	Deve ser investigado
<i>Novo</i>	FD < 0.5%	-	-
<i>Antigo ao serviço</i>	FD < 0.5%	0.5% < FD < 1% FD	FD > 1%

*Todos os valores medidos a 20 °C*

A análise dos resultados faz-se habitualmente em função da evolução do registo histórico destas medições, para que a interpretação dos dados não suscite dúvidas. A realização dos ensaios requer a colocação fora de serviço e isolamento do transformador. [9], [10]

#### 4.4.5.3. Resistência dos enrolamentos

O valor da resistência elétrica indica a condição dos enrolamentos e do comutador de tensão. Este tipo de ensaio requer a utilização de instrumentos capazes de medir precisamente valores de resistência. Uma vez que a resistência varia com a temperatura é necessário medir e registar simultaneamente estes dois parâmetros, de forma a converter o valor de resistência medido para uma temperatura padrão e assim possibilitar a comparação entre vários ensaios, realizados em condições possivelmente diferentes. Uma variação superior ou igual a 2% nos resultados de medição indicia um problema no enrolamento. O carácter intrusivo e falta de sensibilidade são as grandes desvantagens deste método. [9]

#### 4.4.5.4. Razão de transformação

A medição da relação entre as espiras identifica eventuais espiras em curto-circuito ou rutura de condutores dos enrolamentos do transformador, bem como a abertura do circuito em algum terminal ou conexão na parte ativa. 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.

O ensaio deve ser realizado em todas as fases e entre todas as tomadas do regulador de tensão. [11, 12]

#### 4.4.5.5. Indutância de fugas

A medição da indutância de fugas é um método para detetar alterações na geometria dos enrolamentos, porém, este é afetado pela influência da reactância de magnetização, do nível de tensão a que é efetuado o teste, do tipo de ligações, do tipo de núcleo do transformador e da precisão do equipamento de medida.

Um curto-circuito provoca um aumento do fluxo de fugas entre os enrolamentos e, conseqüentemente, uma maior reactância de fugas pois o diâmetro do enrolamento interior tem a tendência de diminuir, e o do exterior de aumentar.

Este método de diagnóstico é realizado aplicando uma tensão de teste nos enrolamentos de alta tensão e com o enrolamento de baixa tensão em curto circuitado, isto, para minimizar o efeito da reactância de magnetização. [10, 11]

#### 4.4.5.6. Corrente de excitação

Medindo a corrente de excitação, através da realização de um ensaio em vazio monofásico. Este ensaio indica a presença de avarias no circuito magnético e nos enrolamentos de transformadores monofásicos ou trifásicos. Os resultados são analisados comparando as correntes entre as três fases do transformador trifásico, ou, no caso de transformadores monofásicos, comparando a corrente com uma medição de referência, ou na ausência desse valor, com o valor homólogo de um transformador idêntico. No entanto, além do carácter invasivo deste método, surgem alguns problemas relacionados com a posição do regulador de tensão em carga, pois este afeta a amplitude da corrente de excitação. [9, 10, 11]

#### 4.4.5.7. Descargas parciais

A medição do nível de descargas parciais num determinado equipamento, para uma dada tensão, onde existem diversos tipos de isolamentos (sólido, líquido e gasoso) é um método não destrutivo. A produção de descargas parciais aumenta à medida que o sistema de isolamento do transformador se degrada, sendo, portanto, a sua intensidade e frequência bons indicadores do estado dos materiais isolantes. Atualmente, os métodos aplicados para a deteção de descargas parciais baseiam-se em técnicas acústicas, elétricas ou a combinação de ambas. As descargas parciais também podem ser detetadas indiretamente utilizando técnicas de análise realizadas ao óleo, medindo as concentrações dos subprodutos gerados pela sua ocorrência.

Existem atualmente no mercado alguns equipamentos de monitorização contínua de descargas parciais, que normalmente utilizam a combinação das técnicas acústica e elétrica. [10, 11]

#### 4.4.5.8. Tensão de restabelecimento e correntes de polarização

O método da tensão de restabelecimento é utilizado para detetar a concentração de água e o nível de degradação do sistema de isolamento. Este ensaio consiste no carregamento de cargas elétricas a estrutura dielétrica do isolante através da aplicação de um impulso de tensão, sendo de seguida descarregada, efetuando curto-circuito através de uma impedância externa. O sinal da tensão resultante, que se estabelece quando a impedância de descarga é removida, permite caracterizar o estado do sistema de isolamento.

Estes métodos apresentam como principal desvantagem as dificuldades de interpretação dos resultados e a necessidade de colocar o transformador fora de serviço durante um intervalo de tempo bastante longo. [11]

#### 4.4.5.9. Análise de resposta em frequência

Os enrolamentos dos transformadores têm uma assinatura única expressa por uma função de transferência. A análise da resposta em frequência permite detetar deformações nos enrolamentos, comparando a função de transferência medida com uma referência previamente obtida. As



medições efetuadas aos transformadores em bom estado fornecem um valor de referência porque é com ela que serão comparadas futuras medições de resposta de frequência. Esta resposta em frequência é obtida impondo, na entrada do transformador, um impulso de tensão e medindo na saída o espectro de frequência e a sua resposta, obtidos através da aplicação da Transformada de *Fourier*.

No entanto, esta técnica apresenta como principais desvantagens a existência de testes de referência para comparação dos resultados e a necessidade de colocar o transformador fora de serviço. A análise dos dados pode ser uma tarefa complexa, mas é uma medida atualmente simples de realizar [10, 11]

#### 4.4.5.10. Vetor de *Park* da corrente elétrica do primário e do secundário

O método de diagnóstico baseado na análise da representação do Vetor de *Park* das correntes de alimentação do transformador consiste na monitorização computacional da representação das correntes (trifásicas) do primário e do secundário do transformador devido à presença de enrolamentos e de correntes a circular entre eles. A aquisição dos dados é feita através de pinças amperimétricas e de uma unidade de aquisição de dados, como um osciloscópio.

Este método constitui assim uma ferramenta de diagnóstico de avarias nos enrolamentos dos transformadores de potência particularmente atrativa devido não só a facilidade de interpretação dos resultados, mas também ao seu carácter não invasivo, possibilitando a sua implementação sem colocar o transformador fora de serviço. [6, 10, 11, 13, 14]

#### 4.4.6. Diagnóstico de avarias nas travessias e no comutador de tensão em carga

As avarias nas travessias devem-se maioritariamente ao facto de estas estarem parcialmente fora da cuba, pois sofrem uma maior deterioração e estão mais vulneráveis a acidentes externos. A análise dos gases dissolvidos no óleo, temperatura, fator de potência, grau de polimerização, entre outros são também métodos de diagnóstico adaptados para a monitorização do estado das travessias dado que as avarias são maioritariamente devido à entrada de água no transformador.

Os comutadores de tensão em carga estão assim sujeitos a um maior desgaste pois a sua função requer movimento mecânico. Devido à importância destes, a análise da temperatura, da corrente de alimentação do motor que aciona o comutador, de gases dissolvidos no óleo e vibrações são métodos de diagnóstico usados na prevenção de avarias destes acessórios. [11]

#### 4.4.7. Sistemas de monitorização contínua

Idealmente os sistemas de monitorização contínua devem ser capazes de detetar os sintomas de deterioração da condição do transformador, graduais ou súbitos, efetuar a análise de tendências e

emitir alarmes que permitam tomar medidas apropriadas para evitar falhas graves. Atualmente, é possível encontrar no mercado sistemas que monitorizam grandezas como: gases dissolvidos no óleo, humidade, temperatura, correntes e tensões elétricas, posição do comutador de tensão, potência consumida pelo motor que aciona o comutador, estado (ligado/desligado) dos sistemas de ventilação e bombagem, entre outros.

Fatores que impedem a aplicação generalizada dos sistemas de monitorização contínua devido a problemas de incompatibilidade entre transformadores de fabricantes e o preço elevado destes equipamentos faz com que as empresas proprietárias dos transformadores só os utilizem nas unidades de maior importância estratégica na rede.

Apesar do funcionamento destes equipamentos ser bastante satisfatório existem ainda alguns tipos de avarias que não são detetados por estes sistemas de monitorização contínua. Existe, portanto, um vasto campo de trabalho a ser explorado, no sentido de melhorar a fiabilidade e sensibilidade destes equipamentos. [11]

## 4.5. Conclusão

Este capítulo teve como principal objetivo enunciar quais os tipos de avarias mais frequentes em transformadores de potência e os métodos de diagnóstico que podem prevenir este tipo de avarias ainda numa fase incipiente.

Assim, é através destes e de outros procedimentos que se assegura o bom funcionamento tanto dos transformadores como do sistema em geral. Embora cada uma das tarefas analisadas apresente custos associados, estes são mínimos quando comparados com aqueles que poderiam advir de uma possível avaria do transformador, sendo, portanto, essencial manter uma política sistemática e rigorosa de manutenção na unidade fabril.

## 5. CASO DE ESTUDO

---

### 5.1. Introdução

A percepção de que a manutenção é uma prática vantajosa, tanto na gestão dos recursos como nas condições de trabalho, tem levado à sua evolução no seio das empresas e das indústrias durante os últimos anos.

Através do Serviço de Conservação foi implementado, na Cimpor, estratégias de manutenção nas diversas unidades de produção. Estas, assumem uma importância significativa no dia-a-dia da unidade fabril, tal como acontece em outras grandes indústrias, com equipas focadas em planeá-la e executá-la da melhor forma possível, garantindo assim o bom funcionamento de todo o sistema.

Embora o termo conservação ainda possa ser normalmente diferenciado de manutenção, a Cimpor, e conseqüentemente o CPS, não faz qualquer distinção entre estes. Assim, ainda que o termo conservação diga respeito às ações reservadas a manter os equipamentos nas suas condições ideais, as equipas responsáveis pela manutenção no CPS, para além de todas as práticas inerentes à manutenção, atuam também nesse sentido.

A grande preocupação relativamente à manutenção dos transformadores, como um dos principais componentes dos sistemas de produção e distribuição de energia elétrica, conduz ao desenvolvimento de métodos capazes de fornecerem um diagnóstico completo e fiável do seu estado de funcionamento.

### 5.2. Rede Elétrica no CPS

No CPS, a energia elétrica é recebida à tensão nominal de 60kV entre fases sob a forma de corrente trifásica alternada, com a capacidade instalada de 84 MVA para 4 transformadores, dois transformadores de 12MVA em paralelo, um transformador de 30MVA e um transformador de reserva também de 30 MVA. Os 4 transformadores podem ser observados na Figura 7.



Figura 7. Subestação Cimpor Souselas [Fonte: Cimpor]

Com o objetivo de conseguir uma boa gestão de energia e de manutenção na unidade fabril são utilizados softwares de apoio ao utilizador. Na análise da energia eléctrica é utilizado o sistema *ION Enterprise*, que analisa e não só, a qualidade de energia eléctrica nos principais postos de transformação fabris.

Através da análise do diagrama que se segue (Figura 8) é possível verificar que qualquer um destes transformadores está sobredimensionado e por tal a ocorrência de sobrecargas não será uma preocupação.

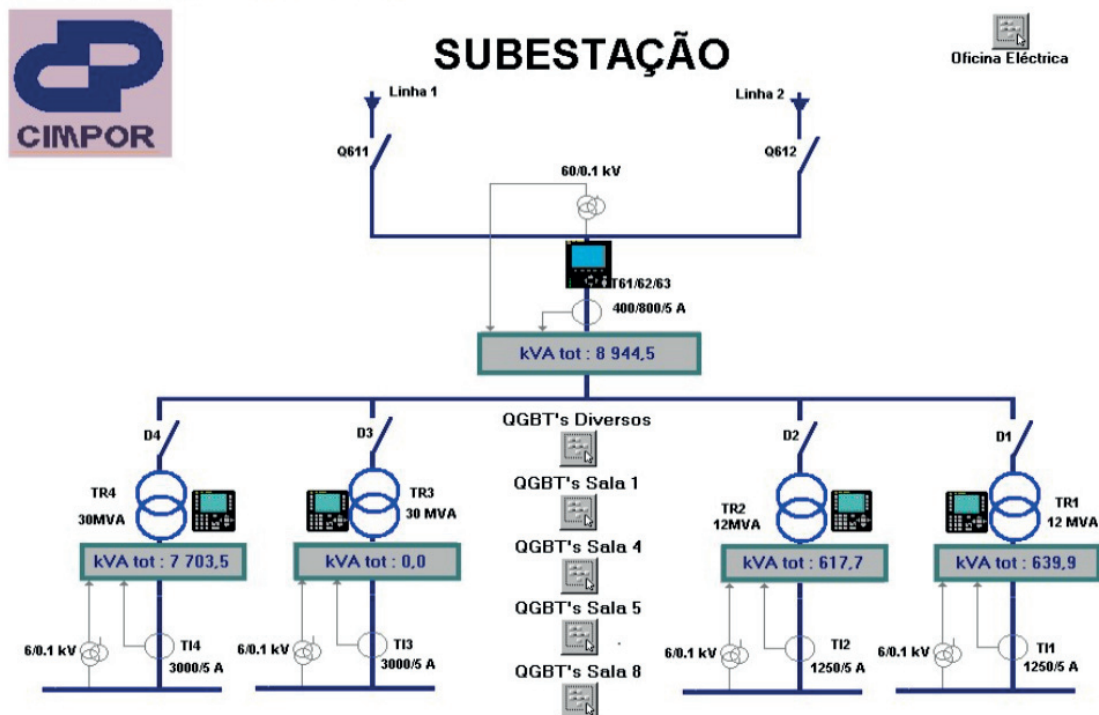


Figura 8. Diagrama Unifilar da Subestação do CPS

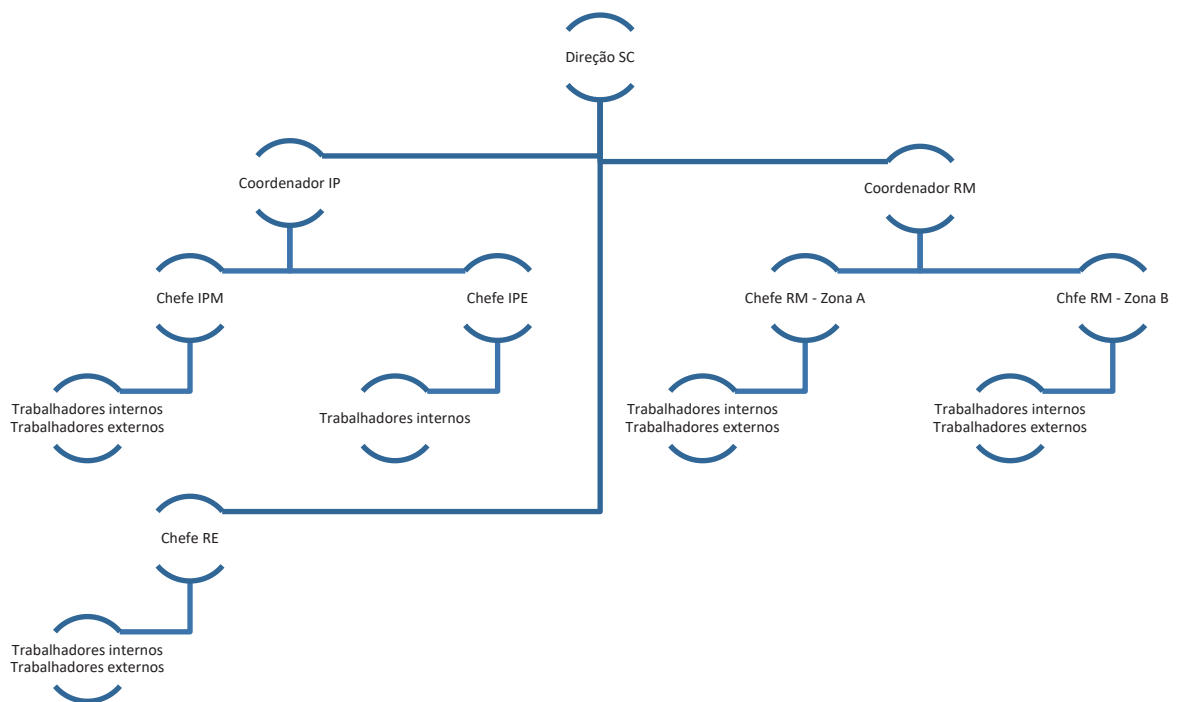
A distribuição da energia é realizada a 6kV para as diversas salas elétricas, onde a tensão é reduzida para 400V com o objetivo de acionar a maioria das máquinas elétricas, mas também para motores de média tensão.

## 5.3. Manutenção no CPS

### 5.3.1. Organização do serviço de conservação

A imensa diversidade e quantidade de equipamentos instalados torna o planeamento da manutenção no CPS um trabalho exigente e ao mesmo tempo complexo por forma a garantir o bom funcionamento de todo o sistema produtivo.

O Serviço de Conservação é composto pelo Gabinete Técnico, área que engloba todas as tarefas de preparação e inspeção, e pela área operacional onde estão inseridas as oficinas, elétrica e mecânica. Assim, pode afirmar-se que enquanto o Gabinete Técnico planeia, as oficinas executam. O Serviço de Conservação detém uma equipa responsável pela análise da fiabilidade dos equipamentos e das diversas secções da fábrica e abrange áreas necessárias ao planeamento e execução das tarefas de manutenção na unidade fabril. Para melhor compreensão da organização do Serviço de Conservação é apresentado o Organograma 2.



*Organograma 2. Organização da direção do Serviço de Conservação*

### 5.3.2. Planejamento, Preparação e Execução

De forma a ser o mais eficiente nas tarefas executadas pela oficina, o planejamento e a preparação da manutenção são meticulosamente realizados pelo Serviço de Conservação. A fim de dar a conhecer a forma como é realizada a Gestão da Manutenção no CPS e para melhor compreender o seu funcionamento, descrevem-se de seguida algumas práticas e métodos de manutenção.

O Gabinete Técnico realiza o plano de manutenção para cada equipamento, seja ele elétrico ou mecânico, no qual cada tarefa deve respeitar uma determinada periodicidade com a indicação se o equipamento se deve encontrar parado ou em funcionamento para a sua realização. Estes planos são normalmente elaborados tendo em conta as indicações do fabricante, o estado do equipamento, e a experiência acumulada pelo técnico ao longo do tempo.

Nas oficinas, é realizado semanalmente um levantamento das tarefas a desenvolver, através dos planos de manutenção, que coincidem com os equipamentos parados naquela mesma altura. Estas tarefas são então distribuídas e executadas pelas equipas da respetiva oficina. De forma a evitar paragens desnecessárias na linha, as rotinas de manutenção preventiva são programadas em sintonia com o estado de produção. É possível ajustar a realização de uma determinada ação para uma data em que se saiba previamente que o equipamento em questão irá estar apto para a intervenção.

No CPS são também realizadas duas paragens gerais em cada uma das linhas de produção (paragens não coincidentes), com duração de aproximadamente 3 a 4 semanas, de forma a exercer todas as intervenções necessárias nos equipamentos que de outra forma não seria possível, como, por exemplo, ao forno. Esta é uma altura especialmente produtiva para o Serviço de Conservação, pois tendo a linha totalmente disponível, muitos acabam por ser os equipamentos intervencionados ao longo destas semanas.

A contratação de serviços de manutenção pode ser entendida como a transferência de atividades relacionadas com o programa de manutenção de uma empresa, para uma entidade exterior, total ou parcial. As vantagens desta escolha assentam na redução dos custos fixos associados e na carga de trabalho adequada aos recursos humanos internos. No entanto, o conhecimento específico ou vasta experiência numa determinada área ou equipamento, a necessidade de licenças especiais para a realização de trabalhos e a necessidade de equipamento especializado e muitas vezes dispendioso são também determinantes para a realização destas tarefas por empresas externas. Este último ponto incide sobretudo na realização das tarefas adjacentes à manutenção preditiva onde a empresa recorre aos serviços de uma empresa especializada na prática da manutenção condicionada, contando permanentemente com alguns funcionários nas suas instalações, encarregues de realizar tarefas preditivas aos diversos equipamentos, como por exemplo: inspeção e medição de análises de vibrações, inspeções termográficas, controlos não destrutivos, verificação de conformidades, entre outras. [4]

## 5.4. Manutenção de Transformadores no CPS

No decorrer do estágio realizado na Cimpor, com a finalidade de planejar e preparar a manutenção nos transformadores que iria decorrer durante a grande paragem, foram realizadas diversas tarefas. Realizou-se uma revisão dos planos de manutenção dos transformadores para que de alguma forma estes pudessem ser melhorados, pois algumas das tarefas apenas podem ser realizadas quando o transformador se encontra fora de serviço. Torna-se importante adequar os planos de manutenção a esta realidade, agendando todas as tarefas que envolvem o transformador fora de serviço para esta data. Aproveita-se a paragem da linha de produção para realizar a intervenção, de forma a minimizar os custos de não-produção do equipamento. Deve existir, portanto, um critério não só na escolha das tarefas da manutenção, como também no seu agendamento, nas suas periodicidades, e no estado de funcionamento da máquina.

A Tabela 2 evidencia parte da informação dos planos de manutenção e indica as tarefas referentes à manutenção preventiva e preditiva dos transformadores realizadas no Centro de Produção de Souselas, a sua periodicidade e a realização por empresas externas ou internas.

**Tabela 2. Aquisição de dados referentes aos planos de manutenção dos transformadores no CPS**

<i>Tarefa a realizar</i>	<i>Realizado por empresa externa</i>	<i>Periodicidade</i>	<i>Estado da instalação</i>
<i>Testar isolamento bobinagem do primário e do secundário</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Realizar a medição da tangente de delta</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Medir índice de polarização e absorção</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Controlar o nível e a temperatura do óleo</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Analisar a qualidade do óleo isolante</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Realizar termografia</i>	Não	6 Meses	Em funcionamento
<i>Controlar a cor da sílica-gel</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Controlar o nível do óleo do conservador e verificar a existência de fugas</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Verificar a existência de descarregadores de sobretensão</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Controlar o funcionamento e conteúdo de gases do relé de Bulchholz</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Verificar o número de manobras do comutador de tomadas de carga</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Verificar o funcionamento do ventilador e do sensor de temperatura e testar</i>	Não	12 Meses	Em funcionamento
<i>Medir a resistência de ligação à terra</i>	Não	12 Meses	Grande paragem

<i>Verificar as ligações e as proteções</i>	Não	12 Meses	Grande paragem
<i>Limpar filtros e controlar pressurização da sala</i>	Não	6 Meses	Grande paragem
<i>Limpar os isoladores</i>	Não	24 Meses	Grande paragem
<i>Limpar os radiadores do transformador e a sala</i>	Não	12 Meses	Grande paragem

Na análise dos planos de manutenção observou-se que as tarefas referentes à manutenção dos transformadores decorrem, maioritariamente, com uma periodicidade anual. Para as tarefas que exigem o transformador fora de serviço estas tarefas decorrem durante as grandes paragens.

Para além das tarefas referidas na Tabela 2 realizadas pelas equipas das respetivas oficinas são também contratadas empresas externas para a aplicação de métodos de diagnóstico na previsão de avarias.

Aquando do acompanhamento da manutenção realizada aos transformadores durante a grande paragem concluiu-se que, para as empresas externas este tempo é reduzido para uma ou duas semanas pois é necessário realizar a manutenção também por parte das oficinas. Sabendo que nesse intervalo de tempo não seria possível aplicar alguns dos métodos de diagnóstico referidos anteriormente, como o método de diagnóstico de grau de polimerização, no CPS, são realizadas análises aos gases dissolvidos no óleo, e também ensaios físico-químicos tais como: índice de acidez, tensão interfacial, tensão disrupta, fator de dissipação dielétrico, teor e saturação de água, cor, PCBs e aspeto.

Como pode observar-se na Tabela 2, apenas a termografia, a verificação do funcionamento de sensor de temperatura e a verificação da ventilação (inspeção mecânica) podem ser realizadas com o transformador em funcionamento. As tarefas de manutenção realizadas ao transformador, tal como a aplicação dos métodos de diagnóstico, realizados no CPS, referidos anteriormente, só podem ser aplicadas durante a grande paragem e por tal, com uma periodicidade anual levando a que este esteja suscetível à ocorrência de avarias não detetáveis numa fase ainda incipiente.

Após uma análise histórica, constatou-se que, em 2009, no TP1 da subestação ocorreu uma avaria que mereceu especial atenção. Tratando-se de um transformador com 37 anos à data do incidente, ainda que tendo sido sempre sujeito às ações de manutenção preventiva recomendadas, fez disparar a proteção de intensidade de corrente máxima e o transformador de reserva TP4 foi colocado em serviço.



O transformador TP1 tem as seguintes características:

<i>Fabricante</i>	EFACEC
<i>Tipo</i>	Core
<i>Nº Série</i>	13042-C
<i>Ano de Fabrico</i>	1973
<i>Potência Nominal</i>	12 MVA
<i>Tensão Nominal</i>	60/6KV
<i>Nº de Fases</i>	3
<i>Frequência</i>	50 Hz
<i>Tipo de refrigeração</i>	ONAF
<i>Regulação</i>	Regulador em carga na AT (21 posições), para $\pm 10 \times 1,0$ kV

A avaria foi reportada, e após análise verificou-se a existência de um curto-circuito entre espiras na BT da fase W do transformador.

Como pode verificar-se na Figura 10, do lado esquerdo, com as vibrações, a anilha metálica selecionada a laranja acabou por ferir e romper o cartão isolante estabelecendo o contacto direto entre o anel de aperto metálico e a travessa. Este contacto originou a uma corrente de circulação induzida nesta espira, pelo fluxo de fugas, o que levou à fusão de um parafuso que estabelece a ligação à massa deste anel metálico. Nesta figura, do lado direito, é possível observar as diferenças entre o perno fundido, selecionado a vermelho, e o perno em condições normais, selecionado a verde.



**Figura 9. Transformador em avaria: Do lado esquerdo, anel metálico de aperto da fase U levantado e do lado direito perno da fase W fundido devido aos esforços de curto circuito criados pelo defeito.**

Esta avaria leva a crer que a manutenção realizada aos transformadores no CPS devido a sua periodicidade anual pode não fazer face a necessidade do diagnóstico nestes transformadores, devido também à sua idade.

A partir da análise de relatórios de ensaios físico-químicos, realizados anualmente por laboratórios especializados na análise de óleos minerais isolantes, utilizados em transformadores de potência, como os que podem ser vistos na Figura 10, conclui-se que parte dos transformadores no CPS apresentam possíveis avarias na parte ativa do transformador.

## RELATÓRIO DE ENSAIOS/ANÁLISES

## Subestação TP3 (19295 C TRN)

ID do Equip.	19295 C	Fabricante	EFACEC	Cliente	CIMPOR SOUSELAS
Tipo de Equip.	TRN	Nº de Série	19295 C	Localização	Subestação
Tipo de Fluido	ÓLEO	Ano de fabrico	1980	Designação	TP3
Qtd. de Fluido	13800 Litros	Modelo/Tipo	Colunas	Descrição	POTÊNCIA
Diagnóstico	OILTRN	T. Primária kV	60	Preservação	CONSERVADOR
		P.Nominal KVA	30	Arrefecimento	ONAF

Análise de Gases	2015-10-13	ppm/dia	2013-06-20	Limites
Nº da Amostra	2		1	
Temp.definida p'interp.Água °C			20	
Hidrogenio (H2)	45	0.04	12	< 75
Metano (CH4)	105	0.06 Anormal	53	< 60
Etano (C2H6)	170	0.19 Muito Elevado	9	< 60
Etileno (C2H4)	7	0.01	2	< 75
Acetileno (C2H2)	<1	0.00	<1	< 75
Monóxido de Carbono (CO)	204	0.12	102	< 500
dioxido de carbono (CO2)	5177	5.99	113	< 7000
Oxigenio (O2)	9533		7425	
Nitrogenio (N2)	58285		38262	
TGCD (ppm)	531	0.42	179	< 845
Equivalente TGC (%)	0.40		0.25	
Gás Total (%)	7.350		4.700	
CO2/CO	25.38		1.11	
O2/N2	0.16		0.19	
Condição do Equip.	4		1	

Resultado	TÉRMICO	Cuba/válvula	VÁL. INFERIOR	Lab. de Ensaio	GREENLAB
Intervalo (dias)	60	Amostra por:	GREENLAB	Data do Ensaio	2015-11-12
Norma da Análise	IEC 60599_PWR_TF_C/R	Motivo	ROTINA	Nº de Ref. do Lab.	LOI 15 10 31

Figura 10. Relatório exemplificativo de análise ao óleo nos transformadores do CPS [Fonte: Cimpor]

Da análise dos relatórios de ensaio dos gases dissolvidos no óleo e da qualidade do óleo é possível diagnosticar a presença de avarias no transformador. Como podemos observar na Figura 10, parte de um relatório do transformador de potência 3 da subestação, temos níveis muito elevados de metano e etano e a presença destes gases em quantidades elevadas indicam óleo sobreaquecido. [14]

Adquirida esta informação, e sabendo que o óleo sobreaquecido pode ser indicador de contactos elétricos, é necessário realizar, antes da ocorrência de uma falha severa no transformador, um novo diagnóstico.

O acompanhamento da manutenção realizada aos transformadores durante a paragem permitiu uma melhor compreensão desta, das condições requeridas e da exigência dos testes de diagnóstico realizados no CPS. A constatação de que o tempo de evolução da avaria pode ser inferior ao período de amostragem levou à necessidade de implementar novas formas de diagnóstico nos transformadores pois, no caso onde foi detetada uma possível avaria, esta deve ser monitorizada com uma regularidade maior do que a que é realizada no CPS.

Uma indústria deste tipo e com os custos associados à aquisição destas máquinas, é primordial o alicerce numa boa manutenção preventiva e para isso o CPS tem vindo a aprimorar a tipologia deste tipo de manutenção ao longo dos anos.

## 5.5. Propostas à alteração dos planos de manutenção

Com o objetivo de comparar os métodos de diagnóstico para transformadores de potência, e verificar as vantagens e desvantagens de cada um deles, do ponto de vista da sua utilização e dos componentes do transformador para os quais estes métodos são aplicáveis, surge a seguinte tabela:

**Tabela 3. Comparação de métodos de diagnóstico**

<i>Elementos do TRF</i>	<i>Métodos de diagnóstico</i>				
	<i>Conservador de óleo</i>	<i>Circuito magnético</i>	<i>Travessias CTEC</i>	<i>Terminais</i>	<i>Enrolamentos</i>
<i>Análise ao óleo</i>		Transformador em serviço	Transformador em serviço	Transformador em serviço	Transformador em serviço
<i>Análise de gases no óleo</i>			Transformador em serviço		Transformador em serviço
<i>Compostos furânicos</i>					Transformador em serviço
<i>Resistência de isolamento</i>					Transformador fora de serviço
<i>Temperatura</i>	Transformador em carga	Transformador em carga	Transformador em carga	Transformador em carga	Transformador em carga
<i>Indutância de fugas</i>					Transformador fora de serviço
<i>Tan (<math>\delta</math>)</i>					Transformador fora de serviço
<i>Resistência dos enrolamentos</i>			Transformador fora de serviço		Transformador fora de serviço
<i>Razão de transformação</i>					Transformador fora de serviço
<i>Corrente de excitação</i>		Transformador fora de serviço	Transformador fora de serviço		Transformador fora de serviço
<i>Descargas parciais</i>					Transformador em carga
<i>Tensão de restabelecimento</i>	Transformador fora de serviço				
<i>Grau de polimerização</i>			Transformador fora de serviço		Transformador fora de serviço
<i>Resposta em frequência</i>					Transformador fora de serviço
<i>Vibrações</i>			Transformador em carga		Transformador em carga
<i>Análise do Vetor de Park das correntes</i>					Transformador em carga

Analisando a Tabela 3, verifica-se que com a exceção dos métodos de diagnóstico realizados ao óleo isolante, da análise das descargas parciais pela através da análise do óleo, da temperatura, das vibrações e da análise do Vetor de *Park* das correntes do primário e do secundário do transformador para a detecção de avarias em transformadores de potência só podem ser aplicados com o transformador fora de serviço. Das metodologias de diagnóstico apresentadas anteriormente e com a análise da manutenção efetuada, verificou-se que, dos métodos de diagnóstico estudados para a detecção de avarias em transformadores de potência a grande maioria são utilizados no CPS.

Da análise aos métodos realizados na fábrica foi possível concluir que, para além da termografia, todos estes métodos apenas podem ser aplicados com o transformador fora de serviço. Desta análise e sabendo que o transformador apenas deve estar fora de serviço durante uma das grandes paragens anuais percebe-se a necessidade de aplicar e um novo método de diagnóstico que permita o diagnóstico com o transformador em serviço.

Como vimos anteriormente, se através da análise de gases e físico-química for detetada alguma anomalia, esta deve ser monitorizada realizando um novo diagnóstico alguns meses depois.

Sabendo que estes transformadores alimentam as linhas de produção da fábrica e que a sua inoperabilidade acarreta grandes custos, esta alteração aos planos de manutenção vem com o intuito de melhorar a qualidade da manutenção realizada aos transformadores.

Como proposta para colmatar a periodicidade com que a manutenção nos transformadores é executada no CPS, da análise dos métodos de diagnóstico possíveis de realizar com o transformador em serviço, com vista a melhorar o serviço de manutenção sem aumentar as falhas de produção na unidade industrial, pode concluir-se que através da análise do Vetor de *Park* das correntes do primário e do secundário é possível detetar uma avaria no transformador sem que esteja fora de serviço e por tal em qualquer altura do ano. A análise de vibrações também podia ser um método de diagnóstico realizado aos transformadores em serviço, mas torna-se complicado devido às fontes de vibrações (interação de campos magnéticos, interações mecânicas, comutações de carga, etc.).

A metodologia proposta, Análise do Vetor de *Park* das correntes do primário e do secundário, para além de diagnosticar a ocorrência de um defeito, propõe-se a atribuir indicações do tipo de defeito que poderá estar a acontecer ou que estará na iminência de acontecer.

Este método é uma mais valia para a Cimpor pois permite, de uma forma não invasiva realizar um diagnóstico da condição dos transformadores apenas através de uma análise da forma das correntes de alimentação do transformador, permitindo não só verificar a severidade da avaria, mas também a fase em que esta está a correr. A representação gráfica de uma avaria num transformador de potência é mais elíptica quanto maior for a severidade do defeito.

Para a aplicação deste método de diagnóstico é necessário perceber quais as condições de instalação nos transformadores e também o conhecimento dos instrumentos de medida utilizados.

O estudo dos transformadores da subestação levou à conclusão de que, tanto os transformadores 1 e 2 de 12MVA (Figura 11) como os transformadores 3 e 4 de 30 MVA (Figura 12) são iguais e, os instrumentos utilizados em cada um deles também.



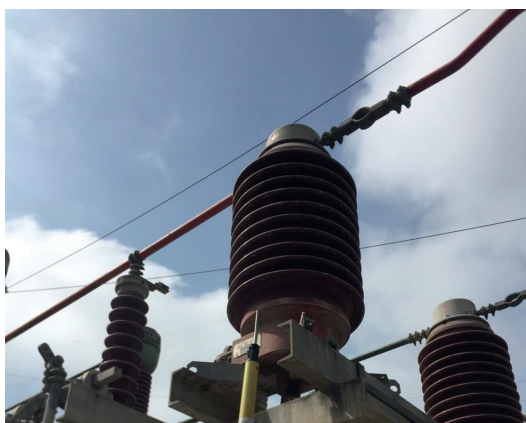
*Figura 11. Transformador de potência 2 (12MVA) da subestação do CPS.*



*Figura 12. Transformador de potência 3 (30MVA) da subestação do CPS.*

Sendo assim, o estudo do TP2 e do TP3 permite obter a informação necessária à aplicação deste método na subestação do CPS.

A análise do Vetor de *Park* mede as correntes do primário e do secundário do transformador. No lado do primário, lado da alta tensão (60kV), é utilizado para a medição da intensidade da corrente um transformador de intensidade (TI) de 150/5/5A para o TP1 e para o TP2 como podemos ver na e, para o TP3 e TP4 um TI de 300/5/5A como se observa na Figura 13 e na Figura 14.



*Figura 13. Transformador de corrente no lado da alta tensão do TP3.*



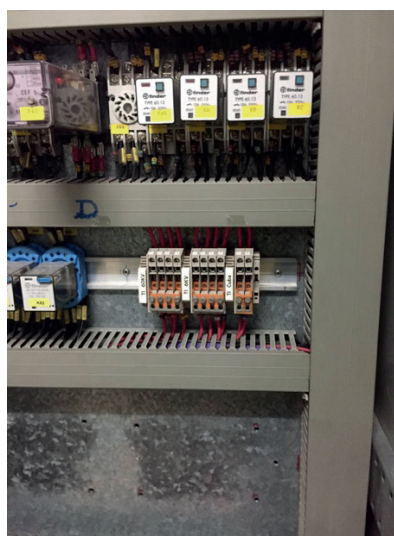
*Figura 14. Chapa de características do transformador de corrente do TP3 com uma razão de transformação de 300/5A.*

No lado da baixa tensão, 6kV, é utilizado um TI de 1250/5/5A para o TP1 e TP2 e um TI de 3000/5/5A para o TP3 e para o TP4 (Figura 15). Os TI do lado de baixa tensão encontram-se nas celas de chegada dos quadros elétricos da subestação.



*Figura 15. Transformador de corrente no lado da alta tensão do TP3.*

Para efetuar as medidas necessárias para a aplicação do método é necessário ter acesso aos cabos tanto da alta como da baixa tensão. No CPS é possível aceder a estes cabos no quadro no quadro de medidas (Figura 16) onde se obtém as informações para o software de gestão de energia.



*Figura 16. Cabos para medição das correntes do lado da alta tensão(60kV) e da baixa tensão(6kV).*

Do ponto de vista prático já temos as informações necessárias para a aplicação deste método de diagnóstico mas, para uma melhor compreensão das leituras que se vão efetuar os transformadores desenvolveu-se em ambiente *Simulink* um esquema exemplificativo de diagnóstico de uma avaria através da análise do Vetor de *Park* das correntes de alimentação, como se observa na Figura 17. Esta simulação conduz a uma melhor compreensão de como esses resultados podem ser observados.

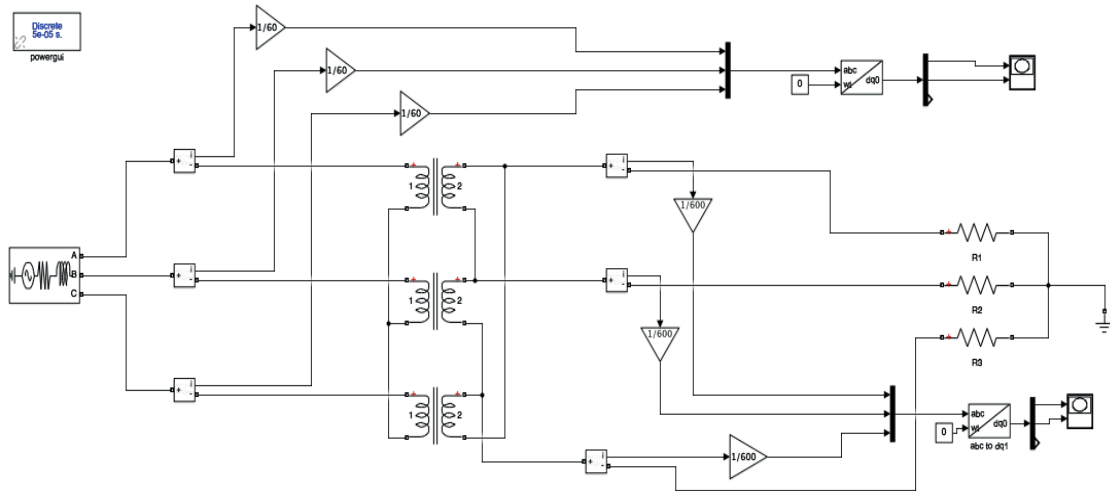


Figura 17. Representação do bloco que determina as componentes transversal e longitudinal da corrente de alimentação.

Para a realização deste teste foi utilizada uma fonte trifásica equilibrada de 60kV. Esta fonte usa-se de forma análoga à tensão da rede e, alimenta um transformador de 30 MVA. Para esta simulação utilizam-se também sensores de corrente com um ganho de 1/60 no caso do TI de 300/5 A e de 1/600 para a situação do TI de 3000/5 que pode ser observado na Figura 18 e na Figura 19, respetivamente.

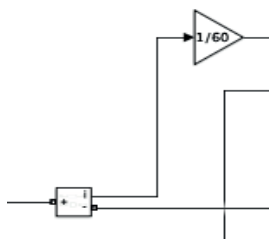


Figura 18. Esquema em ambiente de simulação de TI de 300/5A.

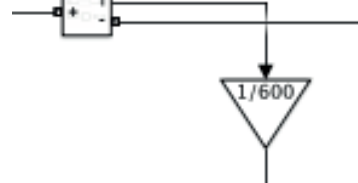


Figura 19. Esquema em ambiente de simulação de TI de 3000/5A.

A análise do Vetor de *Park* das correntes permite diagnosticar a ocorrência de uma avaria, através da representação em eixos XY das correntes de alimentação do transformador. Essa representação pode induzir o utilizador em erro pois na presença de cargas desequilibradas a representação gráfica altera-se da mesma forma. Esta avaria, apesar de ter a mesma representação gráfica tem uma origem diferente de uma avaria no transformador. No caso de a avaria ocorrer na carga, vamos ter uma

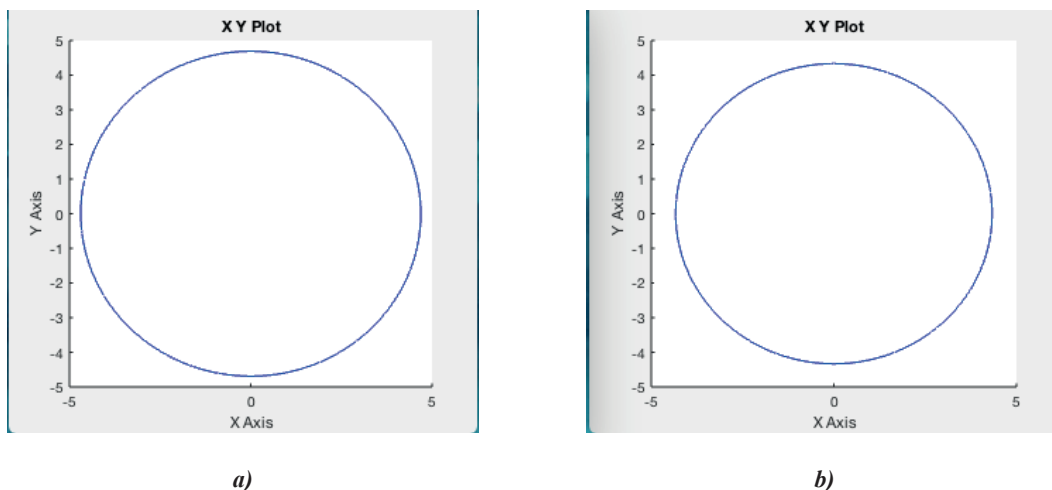
corrente diferente porque temos uma resistência na carga diferente e, no caso da avaria ocorrer no transformador e esta vai estar presente na tensão e isso é que levará às alterações na corrente.

Na ausência de uma avaria, obtém-se uma representação circular através da transformada de *Park* das correntes abc. Na Figura 20 a), pode observar-se a situação em que o transformador não tem qualquer avaria medido no primário do transformador e na Figura 20 b) no secundário do transformador.

Estas correntes ortogonais segundo os eixos d e q são obtidas pelas equações:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{cos}(\theta) & \text{cos}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{cos}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Comparativamente ao transformador, nesta situação, não existiria qualquer avaria nos enrolamentos pois, a ocorrência de um curto circuito entre espiras conduz a uma variação da tensão de saída do transformador.

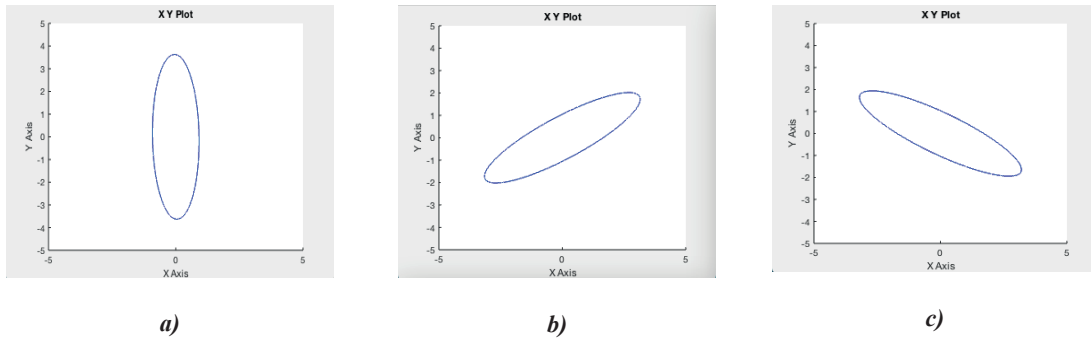


**Figura 20. Vetor de Park das correntes elétricas de alimentação com o transformador em condições normais a) medido no primário e b) medido no secundário.**

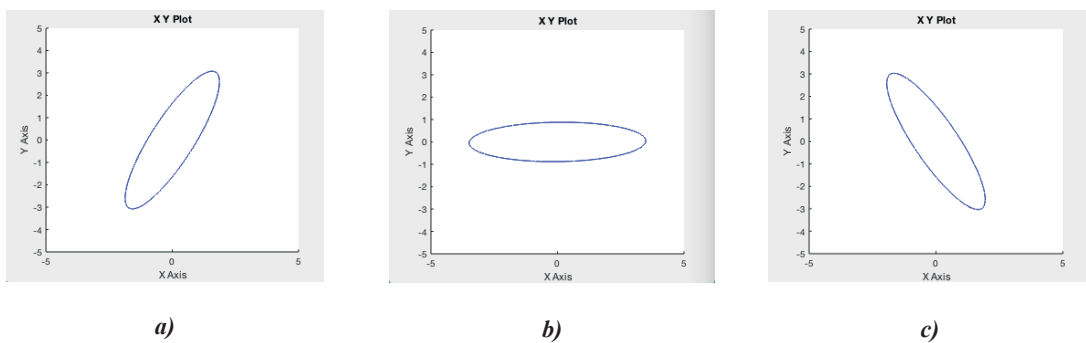
Posteriormente, foi simulado um curto circuito entre espiras em cada uma das fases do primário do transformador, aplicando-se uma resistência interna diferente num dos enrolamentos do transformador. Na Figura 21 observa-se, tal como era de prever, uma figura elíptica onde a sua elipticidade aumenta quanto maior for esse desequilíbrio.

Na Figura 21 a), b) e c) pode visualizar-se, através alteração da resistência interna da fase a, b e c, a figura que representa a avaria quando esta ocorre na fase R, S e T do transformador medida no primário, respetivamente. Posteriormente a mesma avaria, mas medida no secundário, representada na Figura 22 a), b), c).





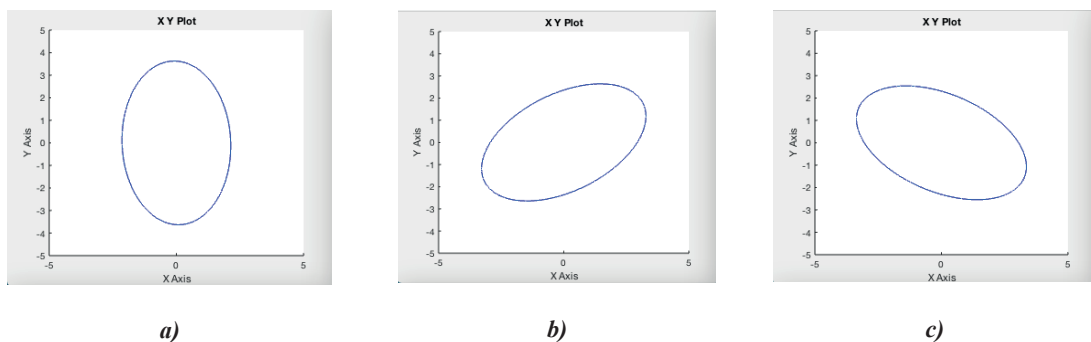
**Figura 21.** Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para o mesma severidade de avaria no enrolamento do primário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no primário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.



**Figura 22.** Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para a mesma severidade de avaria no enrolamento do primário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no secundário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.

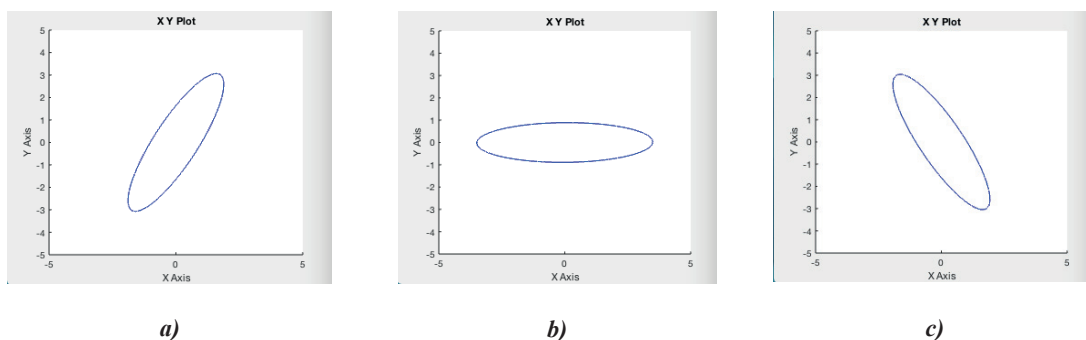
As representações gráficas das Figuras 21 e 22 variam de um ângulo de  $30^\circ$  devido ao facto de um transformador ter uma ligação do tipo  $Y\Delta$ .

Caso o defeito ocorra no secundário do transformador, as representações gráficas que se obtém são as que podemos observar na Figura 23 a), b) e c) com as correntes medidas no lado da alta tensão (primário) do transformador.



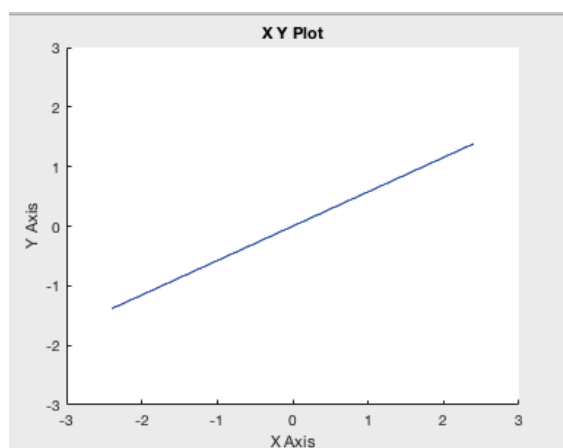
**Figura 23.** Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para a mesma severidade de avaria no enrolamento do secundário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no primário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.

Para a mesma severidade da avaria, se as correntes forem medidas no lado da baixa tensão (secundário) do transformador, a representação que se obtém no caso da avaria ocorrer na fase a do transformador pode observar-se na Figura 24 a), se a avaria ocorrer na fase b, pode observar-se a representação gráfica da Figura 24 b). Se a mesma avaria ocorrer na fase c, observa-se a Figura 24 c).



**Figura 24. Representação do Vetor de Park da corrente elétrica de alimentação, para a mesma severidade de avaria no enrolamento do secundário do transformador, mas localizada em fases distintas, medidas no secundário do transformador: a) fase a; b) fase b; c) fase c.**

Numa situação onde o curto-circuito entre espiras levou à perda total de uma das fases do transformador obteríamos uma semi-reta, onde a sua posição angular iria variar consoante a fase em defeito. Essa avaria faria com que a fase ficasse em circuito aberto. Na Figura 25 observa-se a situação onde temos a perda total da fase S do transformador, representada pela fase b na fonte trifásica em *Simulink*.



**Figura 25. Representação da transformada de Park das correntes de alimentação na situação em que a fase b tem uma falha total.**

Esta simulação foi realizada com o objetivo de melhor compreender e demonstrar as informações obtidas por estudos realizados anteriormente.

Para este método de diagnóstico integrar a manutenção do Serviço de Conservação do CPS terá de constar dos planos de manutenção dos transformadores de potência como tarefa a realizar periodicamente por uma empresa externa à fábrica. O diagnóstico deverá ser realizado, com uma

periodicidade anual, desfasado da manutenção já realizada neste momento pelo serviço de Conservação, ou, sempre que seja detetada uma possível avaria pela análise do óleo.

Com a adequação dos planos de manutenção para a aplicação deste método de diagnóstico o CPS obterá um sistema elétrico mais fiável que é um dos principais objetivos neste tipo de indústria.

## 5.6. Conclusão

No presente capítulo foi analisada de forma breve a rede elétrica do Centro de Produção de Souselas e a manutenção que se realiza no mesmo. Esta análise serve como parte introdutória para uma análise mais pormenorizada no que diz respeito à manutenção que é realizada aos transformadores de potência na fábrica.

O objetivo principal neste capítulo é a proposta de alteração aos planos de manutenção dos transformadores com o intuito de melhorar a fiabilidade dos equipamentos da rede elétrica do CPS. Após uma análise comparativa dos métodos de diagnóstico para a deteção de avarias nos transformadores de potência já utilizados pelo serviço de conservação e da bibliografia já existente, chegou-se à conclusão de que seria uma mais valia para o CPS a adição do método de diagnóstico baseado na análise do Vetor de *Park* das correntes do primário e do secundário aos planos de manutenção. Esta alteração será uma mais valia visto que a periodicidade com que é realizado o diagnóstico aos transformadores, devido ao facto de os mesmos terem de estar fora de serviço, pode não ser suficiente para detetar a avaria.



## 6. CONCLUSÃO

---

### 6.1. Conclusões gerais

A realização desta dissertação permitiu clarificar que o conceito de manutenção preventiva é de todo aplicável a este tipo de máquinas pois, devido aos seus preços avultados, às dificuldades de transporte e à falta de reservas na maior parte das instalações, implicam uma constante monitorização e pensada gestão da sua vida útil.

Ao longo do segundo capítulo foi apresentado, de forma sucinta, a história da indústria cimenteira, bem como as suas características produtivas e o âmbito em que esta se insere em Portugal. Foi atribuído um especial destaque ao grupo Cimpor, mais propriamente ao CPS, uma vez que o estágio curricular referente ao presente relatório se realizou no seio desta empresa.

Assim sendo, torna-se importante referir estes detalhes como forma de ambientar e servir como base para o desenvolvimento do trabalho proposto, que vai desde o conhecimento da estrutura de manutenção do CPS e da influência dos seus métodos, passando pelo funcionamento e otimização dos planos de manutenção dos transformadores de potência.

O terceiro capítulo teve como intuito dar a conhecer a importância da Manutenção, que se encontra em constante transformação devido a evolução da tecnologia e dos processos industriais, como prática contínua no seio das indústrias e analisou-se as vertentes que divergem da Manutenção de forma a abordar alguns dos pontos mais convenientes da sua gestão, e da forma como esta é exercida.

No quarto capítulo apresentou-se uma breve revisão das causas mais prováveis de avarias e dos métodos de monitorização e diagnóstico de transformadores de potência, verificou-se a existência de uma variedade de métodos que permitem aceder ao estado dos vários componentes. Assim conclui-se que é possível aliando à análise dos gases dissolvidos no óleo os restantes métodos determinar na maioria dos casos o local onde ocorrem condições anormais de funcionamento.

A análise dos gases dissolvidos no óleo e a medição da  $\tan \delta$  continuam a ser os métodos mais usados para diagnosticar avarias em transformadores. Existe uma crescente utilização de outras técnicas, mas o custo, a dificuldade na interpretação dos dados e a fiabilidade limitam o seu uso generalizado.

A aplicação e ambiente industrial de novos métodos de diagnóstico é de primordial importância, tendo particular interesse aqueles que permitam efetuar, com custos reduzidos, a monitorização contínua do estado do transformador.

Verificou-se a forma como a manutenção é realizada no CPS, que mantêm o bom funcionamento dos equipamentos e do processo produtivo da unidade fabril através da interação entre as diversas equipas.

Uma política de manutenção preventiva, de forma a controlar, identificar, analisar, e a intervir, com tempo, num equipamento suscetível a falhas é a correta gestão de ativos que, com a escolha correta do tipo de ações, possibilita o equilíbrio entre o desempenho dos equipamentos e a rentabilização dos custos associados a esta ação.

De forma a ir ao encontro dos objetivos inicialmente propostos, foi necessário um estudo aprofundado das inúmeras temáticas abordadas ao longo do estágio, dando ênfase à arte da Manutenção e às diversas metodologias de diagnóstico de avarias em transformadores de potência, para que tanto o trabalho desenvolvido como o presente relatório apresentassem uma base teórica consistente.

No que diz respeito aos novos planos de manutenção, acredita-se que estes serão uma mais-valia para o CPS, pois permitem uma avaliação mais detalhada do estado do transformador. O ajuste da periodicidade das tarefas, a preparação e a execução da intervenção exigida, garantem um melhor controlo sobre a supervisão e sobre o planeamento da manutenção a executar.

Conclui-se assim esta dissertação, com a esperança de que a implementação do trabalho desenvolvido possa contribuir positivamente para as práticas de manutenção do CPS, maximizando o sucesso do seu desempenho, reduzindo o risco de acidentes e de avarias do sistema, e otimizando os custos associados às mesmas.

## 6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

No que diz respeito à metodologia proposta, acredita-se que, como esta ainda se encontra em fase de investigação, a melhoria e aperfeiçoamento da metodologia poderá contribuir para uma melhor averiguação da condição dos transformadores sujeitos à sua aplicação.

Desde já sugere-se que, primeiramente, os transformadores de potência da subestação sejam sujeitos ao diagnóstico através da análise do Vetor de *Park* das correntes do primário e do secundário do transformador pois são os que revelam um contributo maior para o funcionamento da unidade fabril. Posteriormente, esta metodologia deveria abranger todos os transformadores a óleo existentes no CPS, pois será um contributo valioso para uma melhor determinação do estado dos transformadores e das medidas a tomar consoante o seu diagnóstico.

Como uma mais valia para a Cimpor - Cimentos de Portugal, assume-se que este método de diagnóstico será alargado a todos os transformadores de potência do grupo Cimpor para uma manutenção mais eficiente dos mesmos.

### 6.3. Observação Final

Em virtude dos fatos mencionados, conclui-se que o projeto realizado foi extremamente importante na minha formação, dada a aquisição de diversas competências, não só sobre os temas expostos, mas também pela relação interpessoal com os diversos profissionais do CPS, e pelo acompanhamento das diversas atividades de engenharia de uma das empresas de referência em Portugal como a Cimpor, revelando-se uma mais-valia para futuras realizações.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Cimpor, “Cimpor Cimentos de Portugal,” Grupo Cimpor, 2018. [Online]. Available: <http://www.cimpor-portugal.pt>.
- [2] M. Ferreira e F. Serra, CIMPOR - Cimentos de PORTugal Crescer no mundo através de aquisições.. até quando?, [http://globadvantage.ipleiria.pt/files/2012/08/caso-de-estudo-2\\_cimpor.pdf](http://globadvantage.ipleiria.pt/files/2012/08/caso-de-estudo-2_cimpor.pdf), 2012.
- [3] Cimpor, *Noções básicas dos processos de produção - Serviço de Formação*, Lisboa, 2000.
- [4] Cimpor, *Introdução à manutenção*, Lisboa, 2008.
- [5] N. E. 1. EUROPEAN STANDARD, “Versão Portuguesa - Terminologia da manutenção,” 2007.
- [6] A. J. M. Cardoso, L. M. R. Oliveira, N. S. Gameiro e P. M. M. G. Veloso, “Diagnóstico de avarias em transformadores trifásicos,” *Anais da Engenharia e Tecnologia Eletrotécnica*, vol. Nº. 6, pp. 9-12, 1998.
- [7] CIGRE/SC 12/WG 05, “An international survey on failures in large power transformers in service,” *Electra*, vol. 88, pp. 21-48, 1983.
- [8] “IEEE recommended practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems,” *IEEE Standard 493-2007*, 2007.
- [9] M. V. A. J. Wang, “Review of condition assessment of power transformers in service,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 1, nº 6, pp. 12-25, 2002.
- [10] A. Cardoso e L. Oliveira, “Condition Monitoring and Diagnosis of Power Transformers,” *International Journal of COMADEM*, vol. 2, nº 3, pp. 5-11, 1999.
- [11] L. Oliveira, “Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Proteção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.
- [12] M. F. C. Siva, *Diagnóstico de avarias em transformadores de potência*, Vila Nova de Famalicão: Universidade Lusíada, 2016.
- [13] A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz e L. M. R. Oliveira, “Transformers On-load Exciting Current Park’s Vector Approach as a Tool for Winding Faults Diagnostics,” *Conference Record of the 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2002)*, CD-ROM, August 2002.

- [14] A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz e L. M. R. Oliveira, “Power transformers winding fault diagnosis by the on-load exciting current Extended Park’s Vector Approach,” *Electric Power Systems Research*, Vols. %1 de %281, No. 6, pp. 1206-1214, June, 2011.
- [15] R. Bechara, “Dissertação de Mestrado Análise de Falhas de Transformadores de Potência,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [16] “Voltimum,” [Online]. Available: <https://www.voltimum.pt/artigos/artigos-tecnicos/transformadores-nocoes-de>.