

Previsão de avarias em Transformadores de Potência através da análise de ensaios físico-químicos

Rafael António Freixo Pereira

**Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia
Sob orientação do Professor Doutor José António Beleza Carvalho**

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200 - 072 Porto, Portugal

Novembro de 2013

O trabalho aqui apresentado foi realizado por Rafael António Freixo Pereira, aluno do 2º ano do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, no âmbito da disciplina Dissertação - DSEE, sob a orientação do Professor Doutor José António Beleza Carvalho.

"Nunca andes pelo caminho traçado, pois ele conduz somente aonde outros já foram."
Bell, Alexander

Agradecimentos

Gostava de apresentar o meu mais sincero "obrigado" ao Professor Doutor José António Beleza Carvalho por todo o suporte dado, pelas suas sábias palavras, tanto de motivação, como de orientação, bem como todo o tempo despendido.

Um agradecimento muito especial à empresa para a qual me orgulho de trabalhar: a EFACEC - uma marca de Portugal no mundo- especialmente ao meu chefe Eng. Francisco Aniceto, não só pela cooperação e tolerância durante a realização deste trabalho como, também, por todo o conhecimento transmitido durante estes anos de cooperação. Uma palavra amável e gentil, também, para a Dr. Maria Cristina Ferreira que sempre foi extremamente prestável e generosa na sua disponibilidade para me auxiliar.

Aos meus pais, eles que são as pessoas mais importantes para mim, agradeço pela educação que me deram, por me terem inculcido o espírito de perseverança e determinação. Sem esquecer a muito difícil tarefa de me sustentar durante todos estes anos, principalmente durante todo o meu percurso académico.

O meu muito obrigado à minha namorada por toda a paciência e tolerância demonstrada, sem isso, este trabalho não seria possível. Por detrás de um grande homem está sempre uma grande mulher.

Obrigado a todos os meus colegas e amigos por todo o auxílio dado durante todos os nossos anos de convivência: João Ramalho, Jorge Pereira, Rui Moreira, Moisés Silva, Luís Madureira, Márcio Oliveira, Carlos Martins, João Soares e especialmente ao Tiago Sousa que por tanto me ter pressionado para eu fazer esta dissertação que, finalmente, consegui.

Resumo

Os Transformadores de potência são máquinas de elevada importância ao nível dos Sistemas Elétricos de Energia (SEE) uma vez que são estas máquinas que possibilitam a interligação dos diferentes níveis de tensão da rede e a transmissão de energia elétrica em Corrente Alternada (CA).

Geralmente, estas máquinas são de grandes dimensões e de elevado nível de complexidade construtiva. Caracterizam-se por possuírem períodos de vida útil bastante elevados (vinte a trinta anos) e preços elevados, o que conduz a um nível de exigência de fiabilidade muito elevada, uma vez que não é viável a existência de muitos equipamentos de reserva nos SEE.

Com o objetivo de tentar maximizar o período de vida útil dos transformadores de potência e a sua fiabilidade, tenta-se, cada vez mais, implementar conceitos de manutenção preventiva a este tipo de máquinas. No entanto, a gestão da sua vida útil é extremamente complexa na medida em que, estas máquinas tem vários componentes cruciais e suscetíveis de originar falhas e, quase todos eles, encontram-se no interior de uma cuba.

Desta forma, não é possível obter uma imagem do seu estado, em tempo real, sem colocar o transformador fora de serviço, algo que acarreta custos elevados. Por este motivo, desenvolveu-se uma técnica que permite obter uma indicação do estado do transformador, em tempo real, sem o retirar de serviço, colhendo amostras do óleo isolante e procedendo à sua análise físico-química e Análise Gases Dissolvidos (DGA).

As análises aos óleos isolantes têm vindo a adquirir uma preponderância muito elevada no diagnóstico de falhas e na análise do estado de conservação destes equipamentos tendo-se desenvolvido regras para interpretação dos parâmetros dos óleos com carácter normativo.

Considerando o conhecimento relativo à interpretação dos ensaios físico-químicos e DGA ao óleo, é possível desenvolver ferramentas capazes de otimizar essas mesmas interpretações e aplicar esse conhecimento no sentido de prever a sua evolução, assim como o surgimento de possíveis falhas em transformadores, para assim otimizar os processos de manutenção. Neste campo as Redes Neurais Artificiais (RNAs) têm um papel fundamental.

Palavras Chave: Transformador de Potência; Manutenção Preventiva; Previsão de Avarias; Análise de Gases Dissolvidos; Rede Neuronal Artificial; Norma;

Abstract

Power transformers are machines of the extreme importance in power systems, as these are the machines that allow the different levels of tension networks to connect to each other. Generally, they have very large dimensions and are extremely complex. These machines are characterised by having great lifetime periods (twenty to thirty years) and great costs, which leads to a high level of reliability, being that it is not viable to have a lot of these equipment as spares in a power system.

With the goal of trying to maximise the Power Transformers lifetime period and reliability, there's been an effort to implement concepts like preventive maintenance to these kinds of machines. However, managing its lifetime is extremely complex. Such machines have a lot of crucial components that are prone to failure, and almost all of them are located inside a stainless steel vat. Due to their location, it is not possible to have the perception of the machine's working status in real time without putting it offline, something that entails very high costs.

Therefore, a new way of knowing a Power Transformer real working state in real time, without having to put it offline, has been developed. This is achieved by taking samples of the isolating oil and by carrying out some physical-chemical and Dissolved Gases Analysis (DGA) on it.

Isolating oil analysis has been acquiring high importance in the diagnosis of failures and in the analysis of the conservation state of these equipment, having, inclusively, been developed rules for the interpretation of the parameters of the oils with normative character.

Taking the knowledge from the interpretation of the results of the physical-chemical and DGA analysis done to the oil, it is possible to develop tools capable of optimising those interpretations and apply that knowledge to predict its evolution, as well as the arising of possible failures in power transformers, thus helping in the optimisation of the maintenance processes. In this field the Artificial Neural Networks (ANN) have a crucial role.

Keywords: Power Transformer; Preventive Maintenance; Breakdowns Forecast; Dissolved Gas Analysis; Artificial Neuronal Network; Standard;

Abreviaturas e Siglas

Notação	Descrição
AT	- Alta Tensão
BT	- Baixa Tensão
CA	- Corrente Alternada
DGA	- Análise de Gases Dissolvidos
IA	- Inteligência Artificial
MAT	- Muito Alta Tensão
MSE	- Mean Squared Error
RNA	- Rede Neuronal Artificial
RNT	- Rede Nacional de transporte
SEE	- Sistema Elétrico de Energia
SSE	- Sum Squared Error
TP	- Transformador de Potência
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
CM	- Circuito Magnético
OLTC	- On Load Tap Changer
TDCG	- Total de Gases Combustíveis Dissolvidos no Óleo
REN	- Redes Energéticas Nacionais
EDP	- Eletricidade de Portugal
IEC	- International Electrotechnical Commission
PCB	- Bifenil Policarbonato

Índice:

Agradecimentos	VII
Resumo	IX
Abstract.....	XI
Abreviaturas e Siglas.....	XIII
Índice de Figuras	XIX
Índice de Tabelas	XXI
1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Motivações.....	4
1.3. Objetivos do Trabalho.....	5
1.4. Organização da Dissertação	5
2. Manutenção Transformadores de Potência	9
2.1. Introdução.....	9
2.2. Transformadores de Potência.....	9
2.2.1. Aspetos Construtivos dos Transformadores de Potência	10
2.2.2. Parte Ativa.....	14
2.2.2.1. Constituição do circuito magnético	14
2.2.2.2. Constituição dos enrolamentos	15
2.2.2.3. Materiais isolantes sólidos.....	16
2.2.2.4. Comportamento dos enrolamentos	17
2.2.3. Cuba	18
2.2.4. Óleo Isolante	19
2.2.4.1. Tipos de óleo mineral isolante.....	19
2.2.4.2. Propriedades do óleo	20

2.3. Manutenção.....	21
2.3.1. Manutenção corretiva	22
2.3.1.1. Manutenção preditiva	22
2.3.1.2. Manutenção preventiva.....	23
2.4. Ensaio ao Óleo Isolante	24
2.4.1. Análise dos Parâmetros Físico-químicos no Óleo	24
2.4.2. Análise de Gases Dissolvidos no Óleo	29
2.4.2.1. Norma internacional IEC60599.....	30
2.4.2.2. Guia IEEE para a Interpretação dos gases gerados em transformadores imersos em óleo	33
2.5. Conclusão.....	34
3. Técnicas para Detecção de Avarias Baseadas em inteligência Artificial	37
3.1. Introdução.....	37
3.2. Sistemas Periciais.....	37
3.3. Lógica Difusa	38
3.4. Redes Neurais	39
3.5. Sistemas Híbridos.....	42
3.6. Conclusão.....	42
4. Metodologia Proposta para Previsão de Avarias	45
4.1. Introdução.....	45
4.2. Metodologia de Trabalho	45
4.2.1. Recolha de Dados	46
4.2.2. Seleção de Dados.....	48
4.2.3. Construção da Base de Dados	50
4.2.4. Implementação da Rede Neuronal Proposta	53
4.2.4.1. Método de treino da Rede Neuronal	54

4.2.5. Classificação das Avarias Previstas pela Rede Neuronal	58
4.3. Conclusão	59
5. Caso de Estudo e Análise de Resultados.....	63
5.1. Introdução	63
5.2. Dados de Entrada	63
5.3. Resultados do Treino	64
5.4. Comparação com o Caso Real.....	68
5.5. Análise de Resultados	73
6. Conclusão	79
6.1. Conclusões e Principais Contribuições.....	79
6.2. Trabalho Futuro.....	82
Referências	85
Anexos.....	91
Anexo A	91
Anexo B	110
Anexo C	127

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 – TRANSFORMADOR <i>SHELL</i> : REPRESENTAÇÃO EM CORTE DA PARTE ATIVA [2].....	10
FIGURA 2.2 – TRANSFORMADOR <i>SHELL</i> DESCUBADO E ENROLAMENTO TIPO DISCO (GALETTE).....	11
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO MAGNÉTICO CM E ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADOR <i>CORE</i> : DE 3 NÚCLEOS E CM DE 5 NÚCLEOS [2].	11
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO DA PARTE ATIVA DE TRANSFORMADOR TIPO <i>CORE</i>	12
FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO DE UM FEIXE DE BARRAS DE COBRE DE UM ENROLAMENTO.	16
EQUAÇÃO 2.6 – RÁCIO DA CONCENTRAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO USANDO C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , CH ₄ , H ₂ E C ₂ H ₆	31
EQUAÇÃO 2.7 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE POSSÍVEIS DEFEITOS DETETADOS POR DGA.....	32
FIGURA 2.8 – RÁCIO DA CONCENTRAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO USANDO C ₂ H ₂ , H ₂ , O ₂ , N ₂ , CO ₂ E CO.....	32
FIGURA 3.1 – ESTRUTURA TÍPICA DE UMA RNA MULTICAMADA.	40
FIGURA 4.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA PREVISÃO DE AVARIAS.	46
FIGURA 4.2 – RELATÓRIOS DE TESTES AO ÓLEO.	47
FIGURA 4.3 – BASE DE DADOS COM DADOS DE ENTRADA.	51
FIGURA 4.4 – BASE DE DADOS COM OS OBJETIVOS.....	53
FIGURA 4.5 – ESTRUTURA DE UMA REDE NEURONAL ARTIFICIAL.	54
FIGURA 4.6 – FERRAMENTA DE TREINO DE RNA DO MATLAB.....	56
FIGURA 4.7 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO DE TREINO.....	57
FIGURA 5.1 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TIPOS DE RNA, PELO MÉTODO MSE.	65
FIGURA 5.2 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TIPOS DE RNA, PELO MÉTODO SSE.....	65
FIGURA 5.3 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA RNA COM DIFERENTE NÚMERO DE NEURÓNIOS NA CAMADA OCULTA COM O MÉTODO MSE.....	67

FIGURA 5.4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA RNA COM DIFERENTE NÚMERO DE NEURÓNIOS NA CAMADA OCULTA COM O MÉTODO SSE.	67
FIGURA 5.5 – VISTA GERAL DAS LIGAÇÕES ENTRE AS TRAVESSIAS E O ENROLAMENTO SECUNDÁRIO COMPLETAMENTE CARBONIZADAS.	70
FIGURA 5.6 – VISTA EM PORMENOR DAS LIGAÇÕES ENTRE AS TRAVESSIAS E O ENROLAMENTO SECUNDÁRIO COMPLETAMENTE CARBONIZADAS.	71
FIGURA 5.7 – VISTA EM PORMENOR DA REPARAÇÃO EFETUADA NAS CONEXÕES AFETADAS PELO DEFEITO. ...	72
FIGURA 5.8 – VISTA GERAL DA REPARAÇÃO EFETUADA NO TRANSFORMADOR EM ESTUDO.	72

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 – CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DO ÓLEO ISOLANTE DE EQUIPAMENTOS EM SERVIÇO [17].	28
TABELA 2.2 – PARÂMETROS INDICADORES DE DEFEITO.	31
TABELA 3.1 – MÉTODOS BASE PARA A DETEÇÃO DE AVARIAS COM IA.	38
TABELA 4.1 – FATORES DE SELEÇÃO DE TRANSFORMADORES.	48
TABELA 4.2 – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E DGAs RELEVANTES PARA O CASO DE ESTUDO.	49
TABELA 5.1 – ERRO MÉDIO DO TREINO COM DIFERENTES RNA UTILIZANDO OS MÉTODOS MSE E SSE.	64
TABELA 5.2 – ERRO MÉDIO DO TREINO COM DIFERENTE NÚMERO DE NEURÓNIOS NA CAMADA OCULTA UTILIZANDO OS MÉTODOS MSE E SSE.	66
TABELA 5.3 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES REAIS E VALORES PREVISTOS PELA RNA.	69
TABELA 5.4 – TIPO DE DEFEITO DETETADO EM FUNÇÃO DA NORMA PARA ÓLEO DE TRANSFORMADORES EM SERVIÇO.	69
TABELA 5.5 – TIPO DE DEFEITO DETETADO EM FUNÇÃO DA NORMA PARA ÓLEO DE TRANSFORMADORES EM SERVIÇO.	73
TABELA 5.6 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES REAIS E PREVISTOS COM ERROS RELATIVOS E DESVIO PADRÃO.	74

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com o constante aumento das redes elétricas a nível mundial e o respetivo aumento da competitividade entre os *players* dos Sistemas Elétricos de Energia (SEEs), a exploração dos mesmos têm de ser cada vez mais eficiente e fiável.

Com o objetivo de reduzir custos de manutenção e, até mesmo, de substituição de equipamentos, mantendo sempre os padrões de qualidade e fiabilidade elevados, torna-se cada vez mais imprescindível o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem os gestores das redes a prever ações de manutenção na altura correta e âmbito apropriado.

Sendo os transformadores de potência os equipamentos mais dispendiosos existentes nos SEEs, é de particular interesse a monitorização constante do seu estado de conservação, sem ter de tirar o transformador de serviço uma vez que, em muitas instalações, não existem reservas para estes equipamentos.

Atualmente, existem no mercado muitos sistemas de monitorização que permitem acompanhar, em tempo real, as condições em que se encontram os transformadores.

Se com os resultados dessa monitorização for possível prever a evolução das condições do equipamento, estaria encontrada uma ferramenta ideal para, com maior antecedência e assertividade, se poder planear ações de manutenção preventiva, corretiva e até mesmo reparações.

1.2. Motivações

Ao longo do ciclo de vida de um transformador de potência é necessário tomar decisões de forma sustentada e assertiva dando resposta a questões como:

- Qual a estratégia de manutenção preventiva e corretiva ideal a adotar e quais os processos mais adequados?
- Em que unidades são prioritárias a realização de intervenções, e a complexidade das mesmas?
- Como determinar o momento ótimo para reparação ou substituição de transformadores (fim de vida útil)?

As respostas a estas questões-chave exigem informação precisa sobre o estado dos transformadores e seus componentes, sobre as condições de exploração e sobre o seu histórico.

Dado que a população de transformadores em serviço é extensa e dinâmica, é necessário definir prioridades de intervenção através da hierarquização dos equipamentos por nível de risco, combinando a avaliação técnica com a importância relativa.

Assim, prever com alguma antecedência a degradação de componentes dos transformadores e prever o seu estado de conservação adquire especial relevância, principalmente se tivermos em consideração que se trata de uma ferramenta que será utilizada por uma unidade de *Servicing* de uma empresa, como por exemplo a EFACEC.

É importante referir que a unidade de *Servicing* da EFACEC é a maior empresa prestadora de serviços no mercado de transformadores em Portugal. Esta mesma empresa, tem contratos de manutenção plurianuais e, como tal, tem o dever de alertar os seus clientes para possíveis avarias que possam surgir nos seus equipamentos.

Economicamente, se for possível evitar a substituição dos equipamentos, em detrimento de trabalhos de manutenção preventiva e curativa, o cliente fica beneficiado e a unidade também. No entanto, para que tal aconteça, é necessário que esta unidade de negócio possua, à sua disposição, técnicas e ferramentas informáticas capazes de analisar situações de risco.

1.3. Objetivos do Trabalho

Ao longo desta dissertação será analisado em detalhe o conceito: “Transformadores de Potência”, tanto a nível teórico como prático. Serão, também, abordados os principais aspetos construtivos de transformadores e analisados os seus componentes assim como todas as variáveis que influenciam a sua vida útil, o que conduzirá a uma explicação básica sobre conceitos como: manutenção preventiva e as suas mais-valias, e a empregabilidade deste conceito neste tipo de máquinas.

Após uma abordagem teórica na qual são apresentados os conceitos fundamentais sobre transformadores, esta dissertação abordará o segundo grande objetivo: o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de prever avarias em transformadores através de análises ao óleo isolante.

Com a finalidade de atingir esse mesmo objetivo, é inicialmente necessário apresentar uma explicação minuciosa da norma internacional para óleo mineral de transformadores em serviço. Desta forma, fornecer o conhecimento teórico essencial para a elaboração de uma aplicação capaz de prever, com antecedência, a ocorrência de avarias em transformadores de potência.

1.4. Organização da Dissertação

De forma a obter uma maior e melhor organização, esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O primeiro é uma introdução à dissertação, na qual são expostas as motivações para a sua realização, assim como, uma breve contextualização da problemática e respetiva explanação da sua importância. É ainda neste capítulo que são apresentados os principais objetivos definidos para esta dissertação.

O segundo capítulo, manutenção de transformadores de potência, é extremamente importante na medida em que, são desenvolvidos os conceitos fundamentais para esta dissertação, tais como: manutenção preventiva, aspetos construtivos de transformadores de potência, em que são indicados e explicados todos os constituintes de um transformador, principais características dos óleos isolantes utilizados em transformadores de potência, bem como a interpretação que

pode ser realizada sobre os seus parâmetros através da norma internacional de óleos para transformadores em serviço.

No terceiro capítulo é apresentada uma abordagem teórica sobre as principais técnicas de inteligência artificial existentes, sendo analisada a sua empregabilidade na previsão de avarias em transformadores.

Os capítulos quarto e quinto são os capítulos práticos desta dissertação, uma vez que, é nestes que são postos em prática e testados todos os conceitos teóricos abordados nos capítulos anteriores.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia proposta para a resolução do problema, são desenvolvidos os diferentes processos e é apresentada a interpretação que é possível efetuar com os dados obtidos pela metodologia proposta.

O quinto capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos com a metodologia proposta no capítulo anterior. Primeiramente através do cálculo de erros e, posteriormente, através da comparação entre os valores obtidos pela metodologia proposta e os de um caso real, com as consequências que daí resultaram.

Por último, apresenta-se as principais conclusões obtidas com a realização desta dissertação e desenvolvimentos na metodologia proposta que possam vir a ser efetuados. Também são sugeridos alguns trabalhos que futuramente poderão ser realizados no âmbito do tema tratado nesta dissertação.

Capítulo 2

Manutenção de Transformadores de Potência

2. Manutenção Transformadores de Potência

2.1. Introdução

Num SEE, existem milhares de transformadores de potência: produção, transmissão e distribuição. Frequentemente, os transformadores estão em operação em instalações nas quais não existem reservas, o que leva a que a sua fiabilidade seja extremamente importante para os tempos de indisponibilidade das instalações serem mínimos e, desta forma, maximizar a energia vendida aumentando, assim, a eficácia e a eficiência global dos SEE.

Para se conseguir obter o máximo de fiabilidade na exploração do SEE e aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos, é necessário efetuar uma manutenção preventiva que seja rigorosa e devidamente planeada, o que permite que, ao longo dos anos, se tenham desenvolvido metodologias de apoio à decisão para a otimização das atividades de manutenção.

2.2. Transformadores de Potência

A maioria dos transformadores de potência produzidos à escala mundial e sobre os quais se enquadra o presente trabalho são do tipo imerso em óleo, apresentando valores de tensão estipulada (nominal) para o seu enrolamento de Alta Tensão (AT) de 400, 220, 150, 63kV (níveis MAT e AT) e valores de potência estipulada (aparente trifásica) de 15 a 450MVA.

Dentro da categoria de transformadores de potência podemos considerar duas categorias principais, que serão abordadas neste capítulo: transformadores tipo *shell* e tipo *core*.

Inseridos nestas categorias, encontram-se os autotransformadores, nos quais pelo menos dois enrolamentos possuem uma parte comum [1].

Os autotransformadores são sempre aplicados na interligação dos diferentes níveis de tensão da Rede Nacional de Transporte (RNT). Os restantes são transformadores de enrolamentos separados, utilizados para interligação da RNT com a rede de distribuição de alta tensão ou na interligação entre Centrais produtoras de energia e a RNT.

Esta solução visa assegurar a possibilidade de separação homopolar entre as redes do utilizador e a RNT e entre a RNT e o produtor. Em ambas as variantes poderão ser máquinas trifásicas ou bancos de transformadores monofásicos.

2.2.1. Aspetos Construtivos dos Transformadores de Potência

Os transformadores de potência podem ser classificados em duas categorias de acordo com as suas características construtivas, ou seja, de acordo com a configuração do circuito magnético e disposição dos enrolamentos: transformadores tipo *shell* (ou “couraçado”) e tipo *core* (ou “de colunas”). As suas principais diferenças relacionam-se com a geometria do circuito magnético e com a posição, alinhamento e tipo de enrolamentos utilizados.

O circuito magnético dos transformadores *shell* tem a configuração ilustrada na Figura 2.1., onde se podem observar duas representações em corte da parte ativa deste tipo de transformadores.

Neste tipo de construção, a compactação das chapas magnéticas é assegurada pela própria cuba do transformador, cuja tampa tem uma forma de campânula que envolve a parte superior dos enrolamentos e compacta o núcleo contra a base.

Os enrolamentos tem uma disposição alternada, sendo constituídos por bobinas em forma de disco, também chamadas “galettes” (camadas do enrolamento de forma achatada que são dispostas ao longo da fase de acordo com uma disposição alternada).

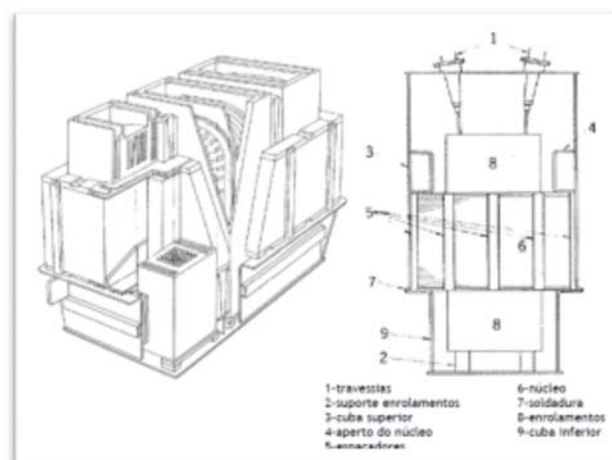


Figura 2.1 – Transformador *shell*: representação em corte da parte ativa [2].

No transformador do tipo *shell* só é possível realizar uma descobagem, para inspeção ou reparação, através da desmontagem da tampa tipo campânula, como se observa na Figura 2.2. O formado das “*galettes*” pode ser observado na Figura 2.2, onde consta uma “*galette*” de um transformador desmontado, com as marcas dos calços responsáveis pela criação dos caminhos de circulação de óleo isolante para refrigeração das bobinas.



Figura 2.2 – Transformador *shell* descobado e enrolamento tipo disco (*galette*).

Nos transformadores tipo *core*, o circuito magnético têm, normalmente, as configurações ilustradas na Figura 2.3, para núcleo de 3 ou 5 núcleos (maquinas trifásicas). Os enrolamentos do transformador *core* são concêntricos, de forma cilíndrica.

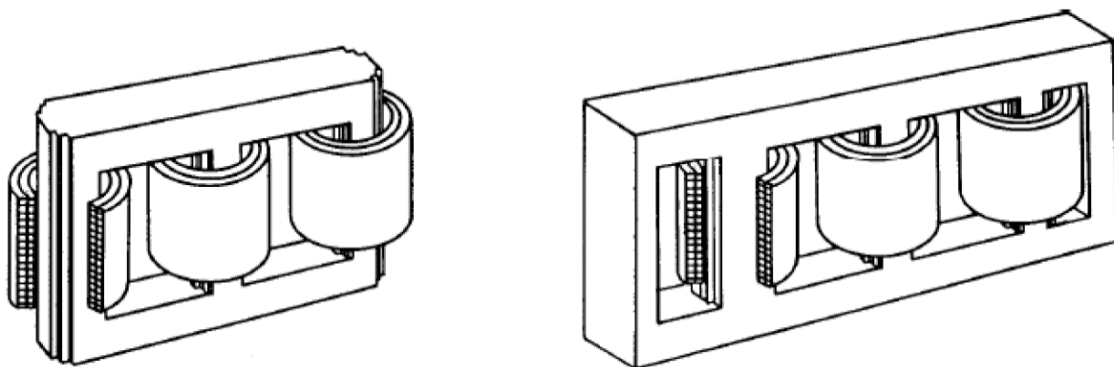


Figura 2.3 – Representação do Circuito Magnético CM e enrolamentos de transformador *core*: de 3 núcleos e CM de 5 núcleos [2].

Na Figura 2.4 pode observar-se a parte ativa de um transformador tipo *core*, trifásico, com CM de 3 núcleos, antes da colocação na cuba, em fábrica. Pode observar-se as ligações das tomadas do enrolamento AT ao regulador em carga (situado do lado direito).



Figura 2.4 – Representação da parte ativa de transformador tipo *core*.

Para toda a gama de transformadores utilizados existem, disponíveis no mercado, as soluções *shell* e *core*. As vantagens de uma configuração, relativamente à outra, podem acentuar-se ou esbater-se consoante os requisitos funcionais, tais como potência máxima, nível de tensão, impedâncias e perdas.

O fabrico de transformadores de potência tipo *core* tende a ser mais económico. No entanto, para níveis de tensão e potência superiores, existem algumas vantagens em utilizar transformadores do tipo *shell* que se podem sobrepor ao fator “preço”, destacando-se as seguintes:

- Menores distâncias entre cuba e núcleo forçando uma circulação do óleo mais intensa e direcionada, favorecendo o arrefecimento;
- Melhor resistência dos enrolamentos a ondas de choque;
- Compactação dos materiais, o que permite a redução da massa de óleo isolante necessária por MVA;

- Maior facilidade de descubagem, bastando remover a tampa do tipo campânula para expor a parte ativa;
- A disposição das bobines oferece maior resistência aos esforços eletrodinâmicos provocados por correntes de curto-circuito.

Torna-se relevante referir que este último aspeto é fundamental no que diz respeito à vida útil de um transformador. Na verdade, com o envelhecimento, verifica-se uma degradação das propriedades mecânicas do isolamento sólido da máquina (papel), o que pode originar uma falha dieléctrica, quando sujeito a esforços eletrodinâmicos e o conseqüente fim de vida útil. A configuração *shell* pode funcionar como um escudo protetor que, para uma equivalente degradação dos isolantes, poderá permitir resistir a estes esforços sem se verificar a rotura do isolamento

Outro aspeto importante está relacionado com a poupança de óleo isolante, permitindo reduzir os custos e consumo de tempo associados à manutenção do seu bom estado, através de tratamento ou substituição.

O carácter compacto do transformador *shell* tem como inconveniente tornar impraticável uma inspeção visual interna aos enrolamentos existindo. No entanto, outras zonas podem ser inspeccionadas através de portas de visita, tais como, seletor de tomadas, pontas de ligação dos enrolamentos, parte superior das fases e cauda das travessias.

Os transformadores de potência são, normalmente, constituídos por 2 enrolamentos principais: o de AT e o de Média Tensão (MT). Estes possuem, ainda, um enrolamento de compensação designado por enrolamento de Baixa Tensão (BT) ou terciário que pode, ou não, estar acessível exteriormente.

A ligação trifásica dos enrolamentos AT e MT pode ser realizada em estrela ou em triângulo. O enrolamento BT é ligado em triângulo, funcionando como enrolamento de compensação.

No caso de transformadores de enrolamentos separados, os enrolamentos AT e MT estão separados fisicamente e possuem neutros independentes. O enrolamento da AT pode encontrar-se dividido em várias tomadas para que seja possível a regulação de tensão em carga.

No caso de autotransformadores, o enrolamento AT é comum ao enrolamento MT (enrolamento comum), ao qual se interliga um enrolamento série. Os enrolamentos AT e MT têm, portanto, o neutro comum e uma parte do enrolamento comum, do lado do neutro. Tal como nos transformadores de enrolamentos separados, a parte da AT pode estar dividida em várias tomadas, onde é possível a regulação de tensão em carga.

Desde 2002, a EFACEC passou a desenvolver uma variante de transformadores e autotransformadores de potência designada “fases dissociadas” que permitem ultrapassar as dificuldades de transporte por aspetos dimensionais e de peso.

As fases deste tipo de transformador são independentes, permitindo o transporte individual. As ligações elétricas entre fases e neutro e regulador em carga realizam-se no interior da cuba, que contem zonas de passagem para o efeito. Em caso de falha interna na parte ativa (circuito magnético ou enrolamentos) de uma das fases, é possível recorrer à sua reparação ou substituição individual.

Esta solução veio suportar o constante aumento da potência dos transformadores (reduzindo as dificuldades de transporte) uma vez que se tratam de transformadores mais compactos e que, ao mesmo tempo, mantêm as características de uma máquina trifásica equivalente.

2.2.2. Parte Ativa

A expressão “parte ativa” é utilizada para designar a parte do transformador responsável pelo funcionamento eletromagnético, ou seja, o circuito magnético (núcleo do transformador), onde circulam os fluxos magnéticos, e os respetivos enrolamentos, onde se desenvolvem as tensões e correntes de funcionamento.

2.2.2.1. Constituição do circuito magnético

Para a construção do circuito magnético, em grandes transformadores de potência, são utilizados materiais que garantam a limitação do valor das perdas no ferro e da corrente de excitação, garantindo a conservação integral das qualidades magnéticas ao longo do tempo.

Devem, por isso, possuir uma permeabilidade magnética muito elevada para permitir atingir a indução de trabalho com a corrente de excitação mais baixa possível e uma indução de saturação suficientemente alta que permita fluxos elevados sem agravar a secção e volume de ferro.

Em transformadores mais recentes, o material utilizado para o efeito é chapa de aço laminada a frio (espessura da ordem de 0,2 a 0,3 mm) carbono-siliciosa, de cristais orientados, com aproximadamente 0,005% de carbono e 3 a 4 % de silício.

O silício permite melhorar a resistividade do ferro, diminuir as perdas e manter as características magnéticas ao longo do tempo. A sua percentagem deve ser limitada porque, para valores superiores, vai piorar a ductilidade do metal e diminuir a indução de saturação.

Esta chapa caracteriza-se por um baixo índice de perdas histeréticas e pela anisotropia das características magnéticas nas chapas de cristais orientados muito vincada. Para limitação das perdas por correntes de Foucault, as chapas possuem isolamento entre si, à base de silicatos complexos, mecanicamente resistentes e que podem suportar temperaturas elevadas [3].

2.2.2.2. Constituição dos enrolamentos

As perdas de um transformador em carga dependem da resistência dos enrolamentos. Por este motivo, devem ser utilizados materiais de elevada condutividade, sendo globalmente utilizado o cobre no fabrico dos enrolamentos dado que alia adequadas propriedades mecânicas a uma maior condutividade dos metais disponíveis no mercado a preços aceitáveis, resultando numa redução do espaço e minimização das perdas em carga do transformador.

Para transformadores de potência utiliza-se, tipicamente, cobre eletrolítico recozido de alta condutividade com 99,9% de pureza ou ligas de cobre (com cerca de 99,9% Cu na sua composição) [3], sob a forma de barras isoladas tipicamente com papel *kraft*.

A utilização das barras em transformadores *core* ou *shell* é feita, normalmente, em feixes (várias barras em paralelo, transpostas ao longo do enrolamento, como é possível observar na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Representação de um Feixe de barras de cobre de um enrolamento.

2.2.2.3. Materiais isolantes sólidos

O sistema de isolamento dos transformadores de potência resulta de uma combinação de materiais celulósicos impregnados com óleo mineral. Os isolantes sólidos de materiais celulósicos utilizados normalmente são:

- Papel *kraft*, usado no isolamento entre espiras.
- Cartões prensados de alta densidade, a base de papel *kraft*, usados para espaçadores de enrolamentos (criação de canais de refrigeração para circulação de óleo) e suportes mecânicos (calços).

Os cartões prensados de média-alta densidade à base de papel *kraft*, são usados como isolamento entre enrolamentos e entre os enrolamentos e a terra (barreiras). Poderão, também, ser aplicados elementos pré-formados, desenhados de acordo com as condições de campo elétrico projetadas para o transformador.

O papel *kraft* do tipo crepado permite uma maior flexibilidade e elasticidade e a sua utilização é adequada para o isolamento de formas irregulares e superfícies onde um adequado isolamento

não pode ser obtido com papéis planos. Um exemplo típico para a sua aplicação é o enfitamento das pontas de ligação aos enrolamentos e condutores.

Os materiais à base de papel *kraft* permitem uma elevada impregnação com óleo isolante mineral, o que resulta em excelentes características dielétricas. Em termos mecânicos, permitem uma boa estabilidade geométrica no óleo, sendo materiais de fácil manuseamento para as diversas operações do processo de fabrico [4].

A degradação do papel isolante, por processos térmicos e físico-químicos, provoca um envelhecimento irreversível do transformador, uma vez que não é viável a sua substituição.

Essa degradação traduz-se na perda de resistência mecânica do papel, podendo originar a sua rotura quando os enrolamentos são submetidos a esforços eletrodinâmicos associados a curto-circuitos ou correntes transitórias, com a conseqüente possível perda de isolamento e falha dielétrica.

A resistência mecânica do papel é, habitualmente, avaliada em termos de tensão de rotura, considerando-se uma redução de 50% desta propriedade como critério para declaração de fim de vida útil [5]. Este critério depende das opções do utilizador, podendo ser ajustado de acordo com outros fatores como aspetos construtivos, folgas de projeto, probabilidade e intensidade de esforços eletrodinâmicos, filosofia de gestão de risco.

2.2.2.4. Comportamento dos enrolamentos

Os enrolamentos do transformador são sujeitos a solicitações térmicas, mecânicas, dielétricas e químicas, cujos efeitos provocam o envelhecimento dos materiais podendo originar efeitos mecânicos (como deformação, desgaste, prisão ou destruição de elementos), efeitos químicos (como contaminação ou corrosão dos materiais) e efeitos elétricos (como curto-circuitos ou interrupção de circuitos).

As falhas catastróficas podem ser evitadas através da monitorização e deteção precoce de defeitos, suportada pelas ações de manutenção preventiva, pela monitorização “online” do funcionamento e pelas proteções próprias do transformador.

O comportamento adequado dos enrolamentos depende da preservação da integridade do isolamento e dos condutores, do estado das ligações elétricas e da consistência mecânica das bobinas e da sua geometria.

2.2.3. Cuba

A cuba do transformador assegura o suporte e proteção mecânica dos diversos componentes do transformador.

As cubas de transformadores de potência são normalmente fabricadas em chapa de aço, de construção soldada, obedecendo a um projeto cuidado que prevê a distribuição interior de massas e os reforços necessários em cada ponto crítico.

Algumas características a assegurar no fabrico da cuba e seus componentes são a estanquicidade, resistência a corrosão, resistência estrutural e resistência ao vácuo. Estas características são fundamentais para garantir um bom desempenho na sua vida útil e minimizar as necessidades de manutenção.

A falta de estanquicidade e conseqüente fuga de óleo isolante representa um problema técnico e ambiental. A sua resolução no local de instalação pode ser difícil de executar com total sucesso, obrigando por vezes ao manuseamento de grandes quantidades de óleo isolante. Para além das fugas de óleo, a falta de estanquicidade pode originar o ingresso de humidade da atmosfera para o interior do transformador.

A colocação do transformador sob vácuo é necessária após realização de operações de montagem ou manutenção que envolvam o esvaziamento total ou parcial do óleo isolante, em que os enrolamentos são expostos ao ar, de modo a minimizar a possibilidade de penetração de humidade no interior do transformador. Durante o processo de enchimento, também é necessário recorrer ao processo de vácuo para prevenir a formação de bolhas de ar no interior dos enrolamentos.

2.2.4. Óleo Isolante

Para a generalidade dos transformadores, o óleo mineral é o meio mais eficiente para refrigerar a parte ativa do transformador. O óleo do transformador é também um componente fundamental no sistema de isolamento do transformador, aumentando a eficiência do isolamento sólido do transformador através da penetração e preenchimento dos espaços entre camadas laminadas e impregnação dos materiais isolantes celulósicos após secagem e vácuo.

A facilidade de amostragem e análise do óleo isolante atribui-lhe a funcionalidade adicional de meio de diagnóstico do estado do transformador, uma vez que, estando em contacto com os principais componentes ativos do transformador de potência, nele se irão refletir os fenómenos térmicos e elétricos associados a alterações de comportamento.

2.2.4.1. Tipos de óleo mineral isolante

Os óleos minerais isolantes são produtos obtidos pela refinação do petróleo, que permite atingir as propriedades desejadas para a sua particular aplicação. Os óleos isolantes são, habitualmente, classificados como parafínicos ou nafténicos, de acordo com o tipo de crude utilizado na refinação.

De acordo com a publicação *“Power Transformer Insulation Ageing”* [6], os óleos nafténicos apresentam melhores propriedades a baixa temperatura e capacidade de dissolver subprodutos resultantes da oxidação, podendo diminuir a precipitação de sedimentos e lamas nos enrolamentos e bloqueios dos canais de circulação.

Os óleos podem ainda ser classificados quanto ao grau de refinação (standard, elevado, super). As propriedades dos óleos isolantes novos devem obedecer, no mínimo, às prescrições da norma CEI 60296, que constitui um referencial nos países europeus.

A resistência do óleo à oxidação é um fator crucial na sua vida útil, dependendo da presença de antioxidantes. Estes podem ser componentes naturais no óleo (óleos não inibidos) ou aditivos sintéticos utilizados para reforçar o desempenho do óleo isolante (óleos inibidos). Existem também óleos cuja classe admite “vestígios” de inibidor até uma concentração máxima de 0,08%

(trace inhibited). Em óleos inibidos a concentração de inibidor é, também, limitada, não devendo ultrapassar os 0,4%, conforme especificado pela mencionada norma CEI 60296.

Os processos de refinação permitem remover contaminantes do óleo como: enxofre, nitrogénio, metais pesados e compostos aromáticos [7]. No entanto, alguns destes compostos de enxofre atuam como inibidores naturais antioxidantes, pelo que nos processos de refinação de óleos não inibidos, nem todos os compostos de enxofre devem ser removidos [8]. Os óleos com défice destes produtos, nomeadamente aqueles sujeitos a um grau de refinação superior, podem ser compensados com a adição de inibidores de oxidação.

2.2.4.2. Propriedades do óleo

A partir do momento da sua aplicação no enchimento dum equipamento, o óleo passa a ser considerado “usado”, sendo avaliado de acordo com a norma internacional CEI 60422 [9]. Para o cumprimento da sua função dielétrica e de refrigeração, os óleos devem possuir e manter ao longo do tempo as seguintes características:

- Elevada rigidez dielétrica para suportar as solicitações a que será submetido em serviço;
- Viscosidade suficientemente baixa de modo a não afetar a capacidade de circulação e transferência de calor;
- Propriedades, a baixa temperatura, adequadas as temperaturas mínimas expectáveis no local de utilização;
- Resistência a oxidação de modo a maximizar o tempo de vida útil;
- Não possuir efeito corrosivo para os materiais com que estará em contacto. Em exploração, o óleo isolante poderá sofrer contaminação e envelhecimento por degradação das propriedades físico-químicas pelo efeito da temperatura, ar, humidade e partículas contaminantes.

Os principais contaminantes do óleo são a humidade (através do ingresso a partir da atmosfera ou pela formação de moléculas de água por degradação da celulose e do óleo) e partículas. A

avaliação da qualidade do óleo deve ser realizada periodicamente, através de um conjunto de ensaios físico-químicos e dielétricos, que permitem monitorizar o seu comportamento ao longo do tempo [10].

2.3. Manutenção

Manutenção é um processo que visa aumentar o tempo de utilização e o rendimento de um equipamento, resultando maior tempo de funcionamento em condições seguras e redução de custos com períodos de inoperacionalidade.

Manutenção é o conjunto de atividades e recursos aplicados aos equipamentos, visando garantir a continuidade de operação dentro dos parâmetros de disponibilidade, qualidade, prazo, custos e vida útil adequados.

São ações necessárias para que um equipamento seja conservado, adequado, restaurado e substituído de modo a poder permanecer de acordo com as condições específicas estabelecidas pelos fabricantes.

Todos os equipamentos, necessitam de ações de manutenção, para garantir a sua operacionalidade, funcionalidade e principalmente a sua fiabilidade. Esta garantia não é só de integridade mas também de segurança, pois a não realização da manutenção coloca em risco a integridade física das pessoas envolvidas.

As principais consequências de uma má política de manutenção são.

- Aumento do número de manutenções corretivas;
- Aumento do custo com *stock* de peças de substituição e com a própria manutenção;
- Troca desnecessária de componentes ou avaria dos mesmos.
- Inspeções desnecessárias em equipamentos em bom estado
- Maior tempo de paragem do equipamento para manutenção;

Assim, existem basicamente três tipos de manutenção:

2.3.1. Manutenção corretiva

Trata-se de uma manutenção não planeada de um equipamento e que tem como objetivo a localização, correção, restauração, recuperação, reparação de anomalias, defeitos e/ou avarias, que tenham danificado irremediavelmente o equipamento ou diminuído a capacidade do equipamento de exercer as funções para as quais foi projetado.

Este procedimento tem como alvo principal a correção imediata de um defeito, para assim retomar o mais rápido possível as atividades produtivas do equipamento para o qual foi desenvolvido.

Para este tipo de manutenção o principal objetivo é que o tempo de reparação seja o mais rápido possível e a correção deste seja feita da melhor forma, para assim evitar uma nova avaria.

Este tipo de manutenção, normalmente implica em custos altos, pois uma avaria inesperada pode acarretar perdas de produção e redução da qualidade do produto. As paragens são na maioria das vezes mais demoradas e a insegurança exige *stocks* mais elevados de peças de reposição, com acréscimos nos custos de manutenção.

2.3.1.1. Manutenção preditiva

É o acompanhamento periódico dos equipamentos, baseado na análise de dados recolhidos através da monitorização ou inspeções em campo, que indicam as condições reais de funcionamento dos equipamentos com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação.

Trata-se de um processo que prevê o tempo de vida útil dos componentes dos equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado.

A análise da tendência de falha consiste em prever com antecedência a avaria ou a quebra, através de equipamentos que exercem vigilância constante prevendo a necessidade da reparação. Através destes objetivos, pode-se concluir que a finalidade maior e mais importante deste tipo de manutenção é a redução de custos de manutenção e aumento da produtividade.

As vantagens da manutenção preditiva são:

- Aumento da vida útil do equipamento;
- Controlo dos materiais e melhor gestão;
- Diminuição dos custos nas reparações;
- Melhoria da produtividade das empresas;
- Limitação da quantidade de peças de substituição;
- Melhoria da segurança;

2.3.1.2. Manutenção preventiva

Manutenção preventiva é uma manutenção planeada que tem como objetivo reparar, lubrificar, ajustar, recondicionar os equipamentos. É baseada em histórico de falhas em funcionamento, ou histórico das revisões periódicas realizadas.

O objetivo principal é reduzir, evitar as avarias ou o decréscimo do seu desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo.

Utilizam-se processos estatísticos que determinam a vida média útil de componentes e obedece a um padrão previamente esquematizado, que estabelece paragens periódicas com a finalidade de permitir a troca de peças gastas por novas, assegurando assim o perfeito funcionamento do equipamento por um período pré-determinado.

Geralmente a periodicidade das ações de manutenção está estabelecida em manuais técnicos, onde os fabricantes recomendam cada uma das manutenções e o seu âmbito.

Ainda relativamente à manutenção preventiva, desde há muitas décadas, que se têm desenvolvido vários modelos matemáticos de apoio a decisão, desde modelos que não contemplam uma abordagem multicritério (Barlow & Hunter, 1960; Glasser, 1969; Dekker & Scarf, 1998; Percy & Kobbacy, 2000) [34,36] até modelos que têm uma abordagem multicritério, com menor desenvolvimento, como é o caso de AMD (Kralja & Petrovicb, 1995; Chareonsuk et al., 1997; Gopaldaswamy et al., 1993).

O facto de existirem menos abordagens multicritério deve-se ao facto de, durante a produção de equipamentos e estimação de vida útil, não ser necessária uma abordagem multicritério [37]. Por sua vez, no contexto de exploração de equipamentos em condições muito variáveis e diferentes de local para local, a abordagem multicritério muitas vezes é essencial [38].

2.4. Ensaaios ao Óleo Isolante

O facto de ser possível recolher uma amostra de óleo com a máquina em serviço, permite que com a máquina se possa ter uma imagem da evolução dos parâmetros do equipamento em qualquer momento. Desta forma, é possível maximizar a confiabilidade do SEE e melhorar o planeamento de manutenção antes de uma pequena falha (falha incipiente) que, geralmente, evolui para um estado mais grave, podendo mesmo atingir o estado de não-reparável.

A análise dos parâmetros Físico-químicos permite-nos compreender a evolução das características do óleo e, conseqüentemente, da parte ativa e isolantes sólidos dos transformadores. Por outro lado, a análise de gases dissolvidos permite detetar defeitos que estejam a ocorrer no transformador.

2.4.1. Análise dos Parâmetros Físico-químicos no Óleo

Os ensaios físico-químicos devem ser realizados com uma periodicidade de 1 a 4 anos tal como os DGA, de acordo com os critérios do utilizador, tendo em conta o nível de tensão, estado, idade e importância do equipamento [30]. Este grupo de ensaios inclui a avaliação dos seguintes parâmetros:

1. Cor e aspeto (teste de acordo com ISO 2049)

Esta avaliação é baseada na comparação da amostra com padrões de cor, segundo a escala ISO 2049 (0 a 8). Um óleo claro e límpido, sem contaminação visível, é considerado bom. Um óleo escuro e/ou de aspeto turvo é considerado em mau estado, necessitando aprofundar o seu nível de degradação.

2. Tensão disruptiva (teste de acordo com CEI 60156)

Avalia a capacidade dielétrica do óleo pelo registo do valor de tensão que provoca o contornamento entre dois elétrodos imersos no óleo com distâncias e geometria normalizadas. O valor a considerar corresponde à média de 6 medições realizadas na mesma amostra.

3. Teor de água (teste de acordo com CEI 60814)

Determina o conteúdo absoluto de humidade presente no óleo, expresso em mg/kg. O teor de água no óleo representa apenas uma pequena parte da humidade presente no transformador, estando a maior quantidade presente nos papéis e cartões isolantes.

Sendo atingidos os valores-limite recomendados na norma, será aconselhável realizar um estudo mais profundo da humidade nos isolantes do transformador e do risco que representa para a exploração do mesmo.

4. Índice de acidez (teste de acordo com CEI 62021-1)

A formação de ácidos resulta de processos de oxidação dos materiais isolantes e é um sintoma significativo de envelhecimento do óleo, com efeitos na aceleração do envelhecimento dos isolantes sólidos. O índice de acidez é expresso em termos de quantidade de hidróxido de potássio (mg de KOH), necessário para a neutralização de 1 g de óleo (mg KOH/g óleo).

5. Fator de dissipação dielétrica ($\text{tg } \delta$) a 90 °C (teste de acordo com CEI 60247)

Este ensaio avalia o comportamento dielétrico do óleo, sendo bastante sensível à presença de contaminantes. Quando o óleo apresenta valores elevados para este parâmetro, os valores da $\text{tg } \delta$ e da resistência de isolamento dos enrolamentos poderão estar afetados, podendo ser

verificados com ensaios elétricos. Em alternativa (ou complemento do ensaio de $\text{tg}\delta$), pode ser realizada a medição da resistividade do óleo.

6. Tensão Interfacial - IFT (teste de acordo com ASTM D971-99a)

Ensaio que permite detetar a presença de produtos contaminantes polares e produtos resultantes da degradação dos isolantes. Esta propriedade tem como característica uma rápida evolução numa fase inicial de degradação, estabilizando num patamar em que esta ainda é moderada. Corresponde à força necessária para puxar um pequeno anel ao longo do interface óleo-água, expressa em mN/m .

A norma recomenda este ensaio como complementar, devendo o seu resultado, em caso de obtenção de valores próximos dos limites aceitáveis, ser interpretado em conjunto com outros parâmetros, tais como a presença de sedimentos, lamas e índice de acidez. Para um valor de IFT superior a 28 mN/m , o óleo é considerado bom; entre $22 - 28 \text{ mN/m}$, será razoável e abaixo de 22 mN/m , o óleo estará em mau estado, recomendando-se um aprofundar da avaliação.

7. Partículas (teste de acordo com CEI 60970)

A presença de partículas em suspensão pode traduzir-se numa importante redução da rigidez dielétrica do óleo, em função da concentração, tipo e forma de partículas. Em caso de valores de contaminação elevados, os valores devem ser confrontados com resultados da rigidez dielétrica do óleo antes de se adotarem medidas corretivas.

Em transformadores de potência, a sua determinação antes da entrada em serviço é recomendável, para constituir valores de referência na análise posterior da evolução das propriedades do óleo.

8. Deteção de enxofre corrosivo (teste de acordo com DIN 51353 / CEI 62535)

Nos últimos anos, têm sido referenciados certos óleos como potencialmente corrosivos, contribuindo para a formação de sulfureto de cobre nos enrolamentos. Este fenómeno tem sido apontado como causa de falhas graves em transformadores de potência ocorridas a nível mundial nos últimos anos [8].

Este assunto tem sido alvo de diversos estudos e de debate internacional, tendo sido desenvolvidos recentemente novos procedimentos de ensaios com vista a determinar a corrosividade do óleo, como alternativa aos procedimentos indicados na norma CEI 60422 (método DIN 51353), que resultaram na publicação da norma CEI 62535, com um novo método de ensaio de enxofre corrosivo. Complementarmente, têm sido propostos ensaios adicionais para deteção de aditivos, não declarados pelos fabricantes do óleo, identificados como agentes que potenciam a corrosividade do óleo, tais como o “dibenzyl disulfide” (DBDS), entre outros [10].

9. Deteção de cloro e PCBs (teste de acordo com CEI 61619)

O bifenil policlorado, em geral conhecido por PCB, é um composto químico que pode dar origem a diversos derivados (os PCBs) de elevada toxicidade e persistência ambiental, considerados perigosos para o meio ambiente e para a saúde humana.

Durante vários anos, os PCBs tiveram larga aplicação em fluidos dielétricos utilizados em transformadores e outros equipamentos elétricos. O seu uso em novos equipamentos foi banido, por acordo internacional, em 1986 [17]. No entanto, o uso de instalações comuns de manuseamento de óleo fez com que a sua presença se alastrasse a óleos isolantes minerais, por contaminação.

Sempre que ocorre a manipulação de óleo através de instalações, equipamentos ou depósitos não controlados, poderá haver risco de contaminação, devendo por isso ser realizada a deteção de PCBs.

Em caso de deteção, o equipamento em causa deverá ser alvo de descontaminação. Por exemplo, a REN atingiu a meta de descontaminação e eliminação global de PCBs nas suas instalações no ano de 2007, através da aplicação de processos de desalogenação dos PCBs contidos no óleo de dois transformadores de potência desclassificados.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo de toda a informação transmitida anteriormente.

Tabela 2.1 – Critérios para avaliação do estado do óleo isolante de equipamentos em serviço [17].

Propriedade	Categoria Transf.	Avaliação		
		Bom	Razoável	Mau
Cor e aparência	Todas	Claro e límpido	-	Escuro e/ou turvo
Tensão Disruptiva (kV)	O, A	> 60	50-60	<50
	B	> 50	40-50	<40
Teor de água (mgH ₂ O/kg) - corrigido	O, A	<5	5 – 15	> 15
	B		5 – 10	> 10
Índice de acidez (mgKOH/g óleo)	O, A	<0,10	0,10 - 0,20	> 0,20
	B		0,10 - 0,15	> 0,15
Factor de dissipação dielétrica (tg d) a 90°C	O, A	<0,10	0,10 - 0,50	> 0,50
	B		0,10 - 0,20	> 0,20
Teor de inibidor antioxidante (onde aplicável)	Todas	a) <60 % do valor original e índice de acidez ≤ 0,06 mgKOH/g óleo e IFT ≥ 30 mN/m => repor inibidor b) <40 % do valor original e índice de acidez > 0,06 mgKOH/g óleo e IFT < 30 mN/m => regenerar óleo e reinibir ou substituição		
*Categorias de transformadores de potência, conforme CEI 60422: O = UN ≥ 400kV; A = 170 kV < UN < 400 kV; B = 72,5 kV < UN ≤ 170 kV				

2.4.2. Análise de Gases Dissolvidos no Óleo

Os gases dissolvidos em óleo de transformadores de potência são conhecidos por conter informações sobre o estado da máquina. As *Utilities* e fabricantes têm vindo a utilizar esta ferramenta desde a Primeira Guerra Mundial, para diagnosticar transformadores de potência usando uma técnica chamada de Análise de Gases Dissolvidos (DGA) [19].

Devido a esta capacidade de monitorização, este método tem contribuído para expandir o tempo de vida dos transformadores de potência, DGA tem sido reconhecido como uma ferramenta poderosa que, sendo hoje um padrão para o setor elétrico em todo o mundo.

A composição química típica do óleo é uma mistura de moléculas de hidrocarbonetos. Estando ligados juntamente com carbono-carbono e carbono-hidrogénio, estas ligações podem ser quebradas por condições térmicas ou falhas elétricas.

Quando isto ocorre, alguns iões ficam livres e recombina-se com outras moléculas, aumentando novos elementos químicos. Portanto, com a utilização da máquina e a natural degradação dos materiais e componentes, o óleo absorve os gases libertados permitindo, assim, a inspeção da condição transformador. [20]

Diferentes fenómenos elétricos geram diferentes compostos químicos. Ou seja, as falhas de baixa energia rompem as ligações C-H, uma vez que estas ligações são menos fortes. Por sua vez, as falhas de alta energia rompem as ligações C-C. Isto significa que, as diferentes concentrações de gases presentes no óleo fornecem informações sobre o tipo de falha e sua gravidade.

Existe uma série de métodos DGA que utilizam um conjunto de ferramentas matemáticas, bem como, diferentes indicadores para a determinação de falhas incipientes. Assim, podem ser utilizados os seguintes métodos:

- A concentração de um único gás e volume total de gases presentes no óleo;
- O método Gás Chave em que cada falha está relacionada com a concentração de um determinado gás;

- Aplicação de proporções de gases para diagnosticar falhas incipientes em transformadores.

Atualmente este último método é o mais utilizado para a deteção de falhas em transformadores, dividindo-se em duas técnicas diferentes: o método relação Doernenburg e o método da razão de Rogers. Os dois seguem o mesmo princípio geral diferindo, apenas, nas proporções utilizadas e no número de falhas detetadas [21, 22].

Alguns métodos, como a norma internacional IEC60599, estabelecem limites à concentração de um determinado gás para, assim, poder classificar diferentes falhas.

Para estabelecer uma fronteira entre valores seguros e incertos, tem-se vindo a desenvolver um conjunto de abordagens [23, 24]. Os resultados obtidos por estes sistemas são promissores. No entanto, o processo de ajuste das regras de diagnóstico pode ser difícil de manusear.

Devido à superior capacidade de aprendizagem e o poder de manipular dados com erro, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) têm sido amplamente utilizadas em DGA. Estes sistemas têm capacidade de contínua aprendizagem com a introdução de novas amostras. No entanto, o treino da RNA é muitas vezes um processo lento porque é sensível a ótimos **mínimos locais, os métodos presença e a *backpropagation* têm muitas dificuldades em lidar com esse fenómeno.** [25]

2.4.2.1. Norma internacional IEC60599

A norma internacional IEC60599 - Óleo mineral impregnado em equipamentos elétricos em serviço - Guia para a interpretação da análise de gases livres e dissolvidos [20, 26], é uma referência para todos os métodos DGA. A última versão deste documento foi lançada em 1999 e distingue seis diferentes falhas:

- Descargas parciais (DP);
- Descargas de baixa energia (D1);
- Descargas de alta energia (D2);

- Falhas térmicas, $T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$ (T1);
- Falhas térmicas, $300 \text{ }^\circ\text{C} < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$ (T2);
- Falhas térmicas, $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$ (T3).

E define-os como:

- Descargas Parciais - descarga elétrica, onde apenas uma pequena parte do isolamento é superada com pequenas perfurações;
- Descarga - descarga elétrica com ponte total isolamento através de carbonização (baixo consumo de energia descarga) e fusão de metal (descarga de alta energia);
- Falha térmica - temperatura excessiva no isolamento. Esta falha pode transformar o isolamento ($T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$), carbonizá-lo ($300 \text{ }^\circ\text{C} < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$), derreter o metal e carbonizar o óleo ($T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$).

Esta publicação assume que cada falha pode ser diagnosticada através de três índices de gás apresentados na Equação 2.1.

$$\frac{C_2 H_2}{C_2 H_4} \quad \frac{C H_4}{H_2} \quad \frac{C_2 H_4}{C_2 H_6}$$

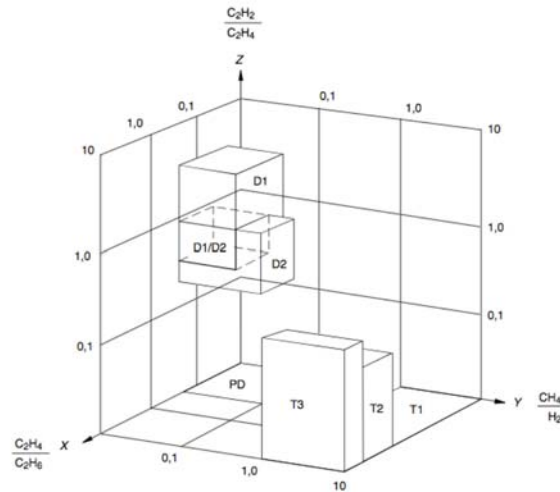
Equação 2.1 – Rácio da concentração de gases dissolvidos no óleo usando C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , H_2 e C_2H_6 .

A Tabela 2.2 mostra os valores limites para os diferentes tipos de defeitos num transformador.

Tabela 2.2 – Parâmetros indicadores de defeito.

Falha	$\frac{C_2 H_2}{C_2 H_4}$	$\frac{C H_4}{H_2}$	$\frac{C_2 H_4}{C_2 H_6}$
DP	-	<0,1	<0,2
D1	>1	0,1 – 0,5	>1
D2	0,6 – 2,5	0,1 - 1	>2
T1	-	-	<1
T2	<1	>1	1 - 4
T3	<0,2	<1	>4

A Equação 2.6 mostra a representação gráfica dos vários defeitos que ocorrem no transformador.



Equação 2.6 – Representação gráfica de possíveis defeitos detetados por DGA.

Esta norma estabelece, também, que a concentração de gás só deve ser calculada se existir uma concentração de gases superior aos valores típicos normais ou se a taxa de aumento de gás for superior ao usual.

Em adição a estes defeitos, são introduzidos mais três índices de gás apresentados na Equação 2.2.

$$\frac{C_2 H_2}{H_2} \quad \frac{O_2}{N_2} \quad \frac{CO_2}{CO}$$

Equação 2.2 – Rácio da concentração de gases dissolvidos no óleo usando C_2H_2 , H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 e CO .

A primeira está relacionada com a possibilidade de contaminação do compartimento do transformador com óleo proveniente do OLTC, o segundo com um aquecimento invulgar e o terceiro com a degradação da celulose.

O diagnóstico de transformadores de potência utilizando este método tem 93,94% de diagnósticos corretos [20].

2.4.2.2. Guia IEEE para a Interpretação dos gases gerados em transformadores imersos em óleo

O Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos (IEEE) publicou um documento diretriz para o diagnóstico de transformadores de potência, o Guia IEEE, para a interpretação dos gases gerados em transformadores imersos em óleo [9] e o seu alcance é muito semelhante à norma IEC.

No entanto, o diagnóstico de acordo com esta publicação, pode ser realizado de diferentes formas: recorrendo à análise individual e Total de Gases Combustíveis Dissolvidos no óleo (TDCG), pelo método do gás chave e pelo método de concentração de gases de Doernenburg e Rogers.

O primeiro método de amostragem define intervalos de tempo, os procedimentos de funcionamento e o aumento do valor de TDCG por dia.

O método gás chave usa a maior concentração de gás no óleo para fazer o diagnóstico ao transformador. Ou seja, se uma amostra contiver uma grande quantidade de CO (monóxido de carbono), este método diagnostica uma falha térmica.

Relativamente aos métodos de Doernenburg e de Rogers é muito semelhante porém, diferem nas proporções utilizadas. Enquanto o método Doernenburg utiliza cinco proporções de gás, o método de Rogers utiliza apenas três, não considerando a concentração de hidrogénio

O método de Rogers é o mais semelhante ao método IEC porque o número de relações (e dois destes são as mesmas) são muito semelhantes, diferindo apenas uma delas. E o número de diagnóstico de falhas também difere, uma vez que, o método IEC reconhece mais uma falha.

2.5. Conclusão

Pode-se então concluir que, os transformadores de potência são equipamentos bastante complexos, com vários constituintes que podem estar na origem de possíveis falhas. No entanto, são equipamentos com uma vida útil bastante longa, que pode ser aumentada com uma manutenção adequada e atempada.

Para se poder realizar ações de manutenção apropriadas e atempadas, é necessário efetuar uma monitorização correta e constante que, no caso dos transformadores de potência, passa pela recolha de amostras de óleo isolante e respetiva análise físico-química e DGA.

Os dados obtidos a partir das constantes análises físico-químicas e DGA's do óleo geram uma boa base de dados que, para além de histórica, pode ser usada para treinar poderosas ferramentas informáticas na definição de datas para ações de manutenção em transformadores de potência.

Capítulo 3

Técnicas para Detecção de Avarias Baseadas em Inteligência Artificial

3. Técnicas para Detecção de Avarias Baseadas em Inteligência Artificial

3.1. Introdução

A maioria das técnicas de Inteligência Artificial (IA) usadas para a previsão de avarias baseia-se nos seguintes métodos: gás chave, de Rogers e de Dornenburg que são facilmente programáveis e apresentam bons resultados no diagnóstico de avarias em transformadores. No entanto, podem ser pouco sensíveis na previsão de possíveis falhas. Atualmente estes métodos são utilizados como guias para as técnicas de inteligência Artificial aplicadas na previsão de falhas em transformadores de potência.

3.2. Sistemas Periciais

Um Sistema Pericial é um método que fornece um diagnóstico de avaria e indicações para a manutenção.

Os métodos de análise de gases dissolvidos no óleo constituem a principal ferramenta de diagnóstico. No entanto, existem outras informações que não estão contidas no óleo isolante e também têm uma elevada importância, tais como: o tipo de transformador, o nível de tensão, a tendência de formação de gases e histórico de manutenção, o índice de carga e as horas de serviço. As condições físico-químicas do óleo podem e devem também ser incorporadas.

Existe um considerável número de sistemas periciais já desenvolvidos e em uso pelas empresas de energia.

Posteriormente, estão descritos três exemplos, dos quais podemos resumir as três últimas funções que deverão ser incluídas num sistema de diagnóstico de avarias para transformadores de potência: primeiro, o “mecanismo central de diagnóstico” que incorpora vários métodos de análise de gases dissolvidos em óleo; depois um “gerente especialista” que considera regras especiais e, por fim, o “consultor da manutenção” que propõe a época da próxima análise e as ações de manutenção que devem ser previstas.

A eficácia de um sistema pericial depende da precisão e da extensão de informação da base de dados que, normalmente, é muito complexa e deve ser construída manualmente. O maior problema com os sistemas periciais é que estes não podem ajustar automaticamente as regras de diagnósticos e, assim, não podem adquirir conhecimento a partir de novas amostras de dados através de um processo de autoaprendizagem. Uma vez construídos são normalmente difíceis de ser atualizados.

Tabela 3.1 mostra diferentes métodos periciais desenvolvidos para auxiliar na deteção de avarias em transformadores.

Tabela 3.1 – Métodos base para a deteção de avarias com IA.

Métodos DGA	Características
Razões de Rogers IEC 599 Gás Chave	Controlo do estado da deterioração e do aquecimento Controlo do teor de água e do aquecimento “Norma” baseada na identificação do nível de gases chave Orientações de manutenção baseadas na TDCG
Razões de Dornenburg Razões de Rogers IEC599	Tendência das razões, limites da norma, gás chave e outros especialistas considerados. Lógica difusa condicionados aos limites da norma, análises de razões limites e de gases chave. Regras Heurísticas de manutenção
Método das razões	Limites da “Norma” Análise de tendências históricas Regras Heurísticas de experiências Banco de dados e acesso avançado a dados remotos Recomendações de manutenção

3.3. Lógica Difusa

A Lógica Difusa baseia-se na teoria dos Conjuntos Fuzzy. Esta é uma generalização da teoria dos Conjuntos Tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeiro ou falso” da Lógica Clássica.

Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na Lógica Difusa, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa permitindo, assim, incluir

a imprecisão (*fuzziness*) nos processos decisórios usando termos linguísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc. o que caracteriza o grau de pertinência da variável (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto).

A força da Lógica Difusa deriva da sua capacidade em gerar conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspeto, os sistemas de lógica Difusa têm capacidade de simular o raciocínio de forma semelhante à dos humanos. O seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção.

Usando a teoria de lógica difusa, pode ser construído um conjunto difuso baseado no diagnóstico de falhas [20]. O foco principal é sintonizar as funções de pertinência baseadas nos métodos e experiências da análise de gases dissolvidos no óleo. Convencionalmente, isto é realizado manualmente [21,22] e, depois, de forma automática utilizando modelos matemáticos sofisticados como computação evolucionária (*evolutionary computing*) e algoritmos genéticos [23,24].

3.4. Redes Neurais

Redes neuronais artificiais são um conceito da computação que visa trabalhar o processamento de dados de maneira semelhante ao cérebro humano. O cérebro é tido como um processador altamente complexo e que realiza processamentos de maneira paralela. Para isso, organiza a sua estrutura, ou seja, os neurónios, para que estes realizem o processamento necessário. Isso é feito com uma velocidade extremamente alta e não existe qualquer computador no mundo capaz de realizar o que o cérebro humano faz.

Nas RNA, pretende-se realizar o processamento de informações tendo como princípio a organização de neurónios do cérebro. Como o cérebro humano é capaz de aprender e tomar decisões baseadas na aprendizagem, as redes neuronais artificiais fazem o mesmo [26]. Assim, uma rede neuronal pode ser interpretada como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento baseado em aprendizagem (experiência) e disponibilizar este conhecimento para a aplicação em questão.

As redes neuronais artificiais são criadas a partir de algoritmos projetados para uma determinada finalidade. É impossível criar um algoritmo sem ter conhecimento de modelos matemáticos que simulem o processo de aprendizagem do cérebro humano [27]. Basicamente, uma rede neuronal assemelha-se ao cérebro em dois pontos: o conhecimento é obtido através de etapas de aprendizagem e pesos sinápticos que são usados para armazenar o conhecimento.

Uma sinapse é o nome dado à conexão existente entre os neurónios. Nas conexões são atribuídos valores, que são chamados de pesos sinápticos. Pode-se então aferir que as RNA têm na sua constituição uma série de neurónios artificiais que estão conectados entre si, formando uma rede de elementos de processamento.

Com uma RNA montada, um conjunto de valores pode ser aplicado num neurónio, neurónio este, que está conectado a outros pela rede. Estes valores (ou dados de entrada) são multiplicados no neurónio pelo valor do peso de sua sinapse e somados. Se esta soma ultrapassar um valor limite estabelecido, um sinal é propagado pela saída (axônio) deste neurónio. Após, essa etapa repete-se com os outros neurónios da rede, o que significa que os neurónios vão estar sujeitos a algum tipo de ativação, dependendo das entradas e dos pesos sinápticos.

Existem várias formas de se desenvolver uma rede neuronal. Devido à sua adaptabilidade, as RNAs devem ser parametrizadas de acordo com o(s) problema(s) a ser(em) resolvido(s) e a sua arquitetura determinará o número de camadas usadas, a quantidade de neurónios em cada camada, o tipo de sinapse utilizado, etc. Tal como pode ser visto na Figura 3.1.

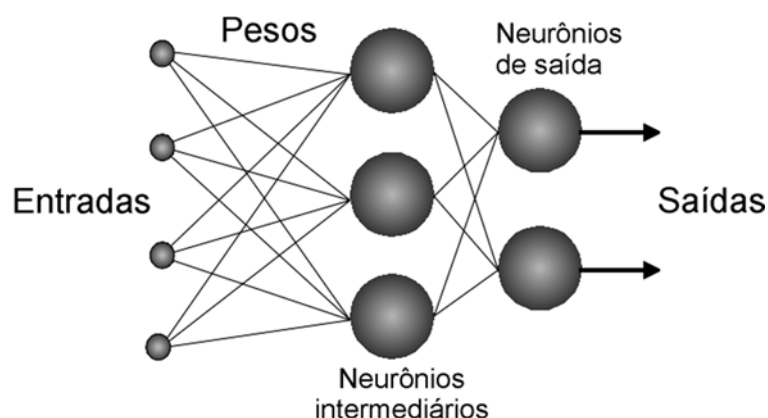


Figura 3.1 – Estrutura típica de uma RNA multicamada.

Dukarm tentou utilizar as Redes Neuronais Artificiais (RNAs) para o diagnóstico de falhas em transformadores no início dos anos 90, sem sucesso, muito provavelmente devido à falta de qualidade dos dados [25].

No final dos anos 90, existiram alguns estudos [28] mas foram atividades separadas que não constituíram uma séria consideração do problema. Em meados dos anos 90, iniciaram-se esforços de pesquisa na Universidade de Tecnologia da Virgínia em que não foram apenas desenvolvidos estudos metodológicos, mas também na pesquisa de dados e testes industriais. Como resultado, foi desenvolvido um sistema de diagnóstico com RNA e um sistema pericial

Uma importante vantagem baseada no diagnóstico de falhas, com utilização de RNAs, é que elas podem aprender diretamente a partir de amostras através do treino e atualizar os seus conhecimentos quando necessário. A alta capacidade de mapeamento não linear dos neurónios garante um desempenho quase sempre superior às soluções dos sistemas de lógica difusa. A complexidade computacional das RNAs não é tão grande, no processo de teste (diagnóstico).

Para uma melhor compreensão do tipo de redes neuronais usadas, os parágrafos seguintes apresentam uma breve descrição deste tipo de redes.

As redes *Feedforward* caracterizam-se por terem uma série de camadas, em que a primeira camada tem uma conexão a partir da entrada da rede e à camada seguinte que, por sua vez, terão ligação às camadas seguintes. Por último, a camada final produz a saída da rede.

As redes *Feedforward* podem ser usadas com diferentes tipos de dados de entrada que conseguem obter bons resultados no mapeamento dos dados de saída. Geralmente, a rede *Feedforward* com uma camada de neurónios oculta é suficiente para a resolução de qualquer problema de mapeamento com entradas e saídas finitas.

Existem, ainda, versões otimizadas da rede *Feedforward* que incluem reconhecimento de redes com ajuste (*Fitnet*) e reconhecimento de padrões (*Patternnet*). Uma variação na rede *Feedforward* representa a cascata da rede para a frente (*Cascadefeedforwardnet*), que se caracteriza por ter ligações adicionais a partir da entrada de todas as camadas e de cada camada para todas as camadas seguintes. Tal como acontece com redes *Feedforward*, uma camada de dois ou mais neurónios pode aprender qualquer relação input-output finita arbitrária.

Por último a rede *Fitnet* caracteriza-se por ser uma rede *Feedforward* parametrizada especificamente para estabelecer a relação pretendida entre os *inputs* e *outputs* da rede.

3.5. Sistemas Híbridos

Na tentativa de obter melhor desempenho dos sistemas de inteligência artificial (IA) usados em diagnósticos, têm-se vindo a desenvolver sistemas híbridos que combinam dois ou mais métodos de IA para a obtenção de diagnósticos complexos para falhas em transformadores de potência [29,30].

É possível encontrar literatura com a combinação de sistemas periciais e lógica difusa, sistemas periciais e redes neuronais, redes neuronais e lógica difusa, algoritmo genético e redes neuronais e outras associações.

Porém, todos utilizam os resultados e dados dos métodos tradicionais e o conhecimento de especialistas como dados de entrada para estes sistemas.

3.6. Conclusão

Para se poder realizar ações de manutenção apropriadas e atempadas é necessário efetuar uma monitorização correta e constante, que no caso dos transformadores de potência, passa pela recolha de amostras de óleo isolante e respetiva análise físico-química e DGA.

Os dados obtidos a partir das constantes análises físico-químicas e DGA's do óleo geram uma boa base de dados que, para além de histórica, pode ser usada para treinar poderosas ferramentas informáticas, como por exemplo as RNA e, assim, serem utilizadas como auxílio na definição de datas para ações de manutenção em transformadores de potência.

Capítulo 4

Metodologia Proposta para Previsão de Avarias

4. Metodologia Proposta para Previsão de Avarias

4.1. Introdução

A crescente necessidade de elevados índices de fiabilidade dos SEEs, aliada à crescente otimização de recursos empreendidos nas ações de manutenção, obriga a uma melhor e mais apurada definição de datas e âmbitos dos trabalhos para as intervenções de manutenção.

Tendo em conta as preocupações referidas no parágrafo anterior, este trabalho apresenta uma metodologia capaz de prever avarias em transformadores de potência com antecedência de um ano e auxiliar no seu diagnóstico.

A metodologia apresentada, para além de prever 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.

Para prever a ocorrência de defeitos, esta metodologia propõe a utilização de RNAs que, tal como foi abordado no capítulo anterior, são universalmente reconhecidas como sendo um método de excelência para a realização de previsões [31]. Assim, a metodologia apresentada destina-se à previsão de avarias em transformadores utilizando RNAs.

4.2. Metodologia de Trabalho

A realização deste trabalho iniciou-se com uma pesquisa exaustiva de ensaios físico-químicos de transformadores existentes em Portugal, desde a indústria aos *players* do mercado elétrico. Para tal, consultaram-se relatórios de ensaios existentes nas bases de dados da EFACEC e LABELLEC.

Após a recolha de mais de 2000 relatórios de ensaios ao óleo, foi necessário processar todos os relatórios, excluindo todos aqueles que estavam incompletos ou que pertenciam a transformadores diferentes daqueles sobre os quais este trabalho incide- transformadores com três enrolamentos, trifásicos com potência superior a 60 MVA e níveis de tensão superiores a 170kV.

Para uma melhor compreensão da metodologia proposta para a previsão de avarias, a Figura 4.1 ilustra o diagrama de blocos com as diferentes etapas necessárias para a implementação da metodologia proposta.

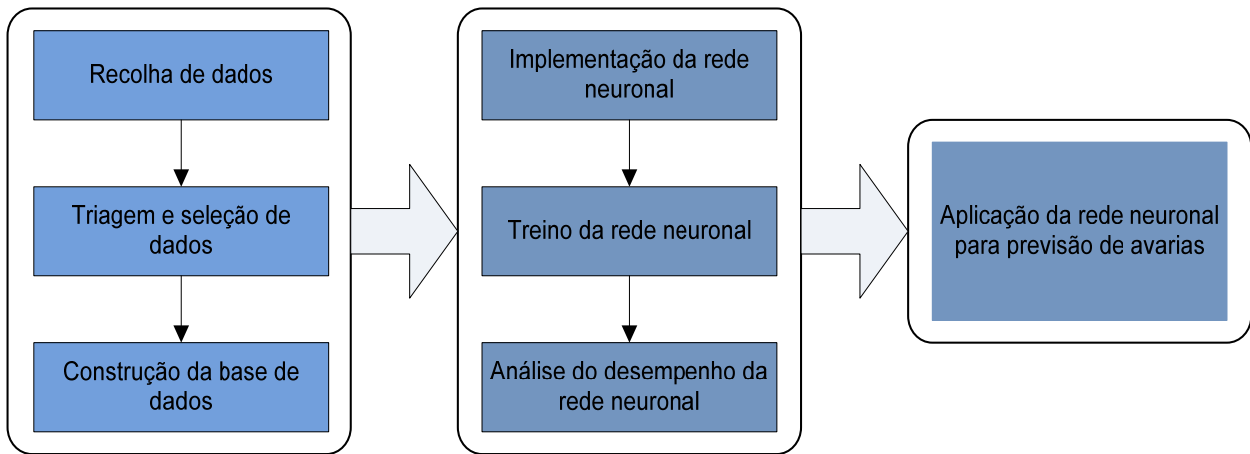


Figura 4.1 – Diagrama de blocos da metodologia proposta para previsão de avarias.

Após a recolha e triagem de dados, elaborou-se uma base de dados, implementou-se e treinou-se a RNA até obter um modelo fiável e com um bom desempenho para a previsão de avarias. Posteriormente a estes processos, analisou-se o seu desempenho e aplicou-se ao caso de estudo apresentado.

4.2.1. Recolha de Dados

Após a definição do problema (previsão de avarias em transformadores de potência) e de se ter concluído que para tal, o melhor seria utilizar RNAs, surgiu a necessidade de procurar dados que pudessem, por um lado, ser úteis na resolução do problema proposto e, por outro, que existissem em elevadas quantidades para poder dar consistência e base científica na resolução do problema proposto.

Os dados utilizados para a construção da base de dados foram obtidos a partir de relatórios de ensaios físico-químicos realizados desde o início da década de 90 por dois laboratórios de referência a nível nacional e internacional na análise de óleos minerais isolantes, utilizados em transformadores de potência.

Esses laboratórios são LABELEC [37], laboratório de energia do grupo EDP e o laboratório da EFACEC [38], maior empresa nacional no sector eletromecânico e referência internacional no fabrico de transformadores de potência.

Todos os dados obtidos para a realização deste trabalho foram obtidos com a respetiva autorização das entidades acima referidas. No entanto, foi imposta a condição de respeitar a confidencialidade de informações.

Todos os dados foram obtidos a partir de relatórios de ensaios como os que podem ser vistos na Figura 4.2, na qual constam informações como o número de série do transformador, o momento da realização do teste, data de realização do teste e os valores dos vários parâmetros em análise.

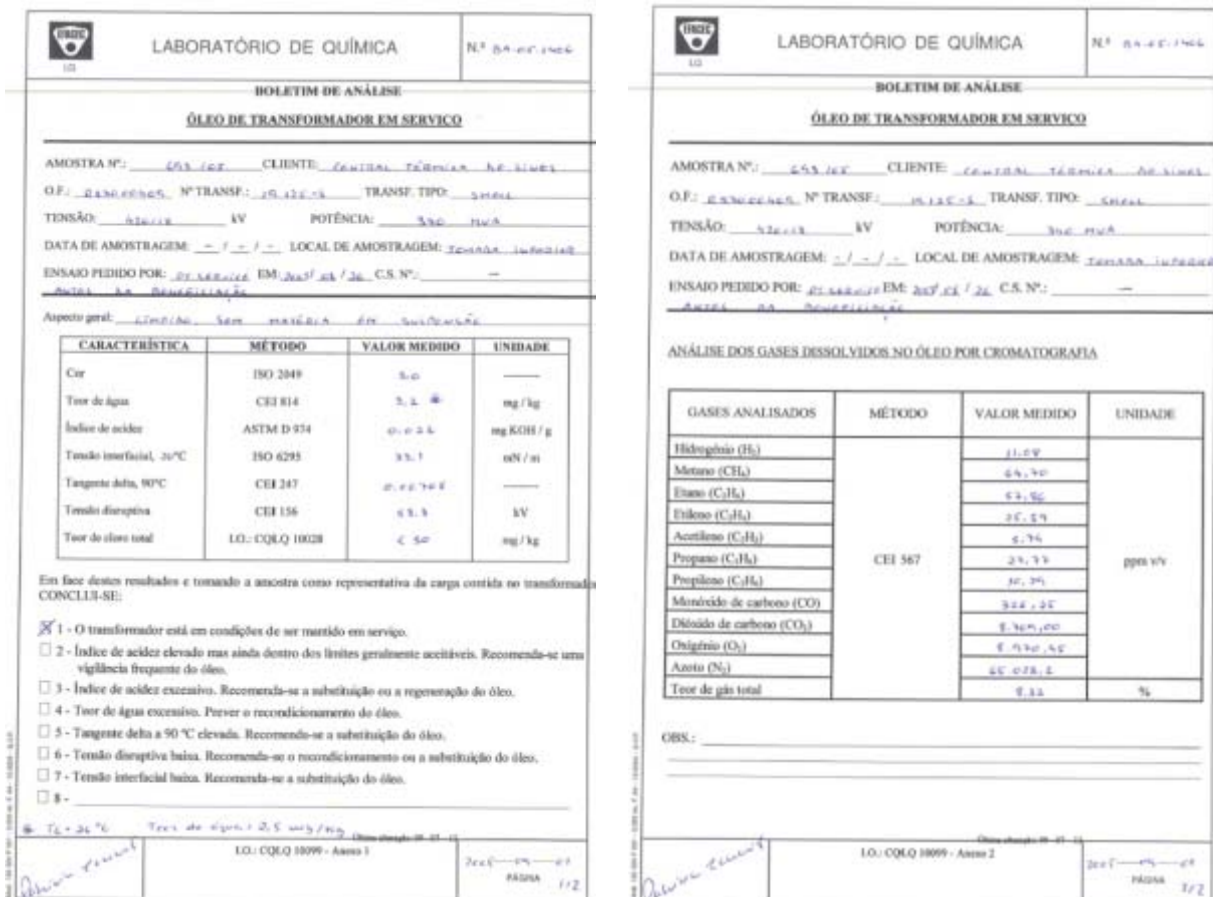


Figura 4.2 – Relatórios de testes ao óleo.

4.2.2. Seleção de Dados

Após a recolha dos relatórios de ensaios físico-químicos, foi necessário efetuar uma triagem dos relatórios que correspondem a transformadores sobre os quais este trabalho incide.

Os critérios de seleção utilizados estão descritos na Tabela 4.1 e foram obtidos de acordo com a norma internacional para óleos de transformadores em serviço [12].

Tabela 4.1 – Fatores de seleção de transformadores.

Características do Transformador	Fatores de Inclusão
Potência	>60 MVA
Nível de Tensão	>170kV
Tipo de óleo isolante	Óleo Isolante Nynas Nitro Taurus [39]
Número de Enrolamentos	3 (Enrolamento primário, secundário e terciário)

Após esta primeira etapa, efetuou-se uma nova triagem na qual foram descartados os transformadores que, devido ao reduzido número de relatórios, não apresentavam uma evolução temporal dos vários parâmetros do óleo e, desta forma, não trariam qualquer mais-valia para o treino da RNA. Ou ainda por não apresentarem todos os parâmetros necessários para o treino da rede.

Todos estes processos de triagem contribuíram, por um lado, para um aumento da qualidade de dados, que melhora o processo de treino da RNA e a otimização de resultados mas, por outro lado, contribuíram para a redução do número de dados da base de dados (a cerca de 100).

Uma vez completos os dois primeiros processos de triagem, iniciou-se a análise dos relatórios e procedeu-se à seleção dos dados que estes continham e que eram importantes para a resolução do problema.

De entre todos os parâmetros existentes nos relatórios de testes ao óleo, os parâmetros físico-químicos selecionados para este trabalho foram: teor de água, índice de acidez, tensão interfacial, tangente de delta a 90°C, tensão disruptiva e teor de inibidor. Por sua vez, os parâmetros DGA selecionados foram: Hidrogénio, Metano, Etano, Etileno e Acetileno - como pode ser visto na Tabela 4.2. Todos estes parâmetros já foram descritos no ponto 2.4.1 e 2.4.2, respetivamente.

Tabela 4.2 – Parâmetros físico-químicos e DGAs relevantes para o caso de estudo.

Dados disponíveis nos relatórios de ensaios ao óleo		Relevantes para o problema	
Físico-químicos	DGA	Físico-químicos	DGA
Cor e aparência	Hidrogénio (H ₂)	---	Hidrogénio (H ₂)
Tensão disruptiva (kV)	Metano (CH ₄)	Tensão disruptiva (kV)	Metano (CH ₄)
Teor de água (mgH ₂ O/kg) - corrigido	Etano (C ₂ H ₆)	Teor de água (mgH ₂ O/kg) - corrigido	Etano (C ₂ H ₆)
Índice de acidez (mgKOH/g óleo)	Etileno (C ₂ H ₄)	Índice de acidez (mgKOH/g óleo)	Etileno (C ₂ H ₄)
Fator de dissipação dielétrica (tg d) a 90°C	Acetileno (C ₂ H ₂)	Fator de dissipação dielétrica (tg d) a 90°C	Acetileno (C ₂ H ₂)
Teor de inibidor antioxidante	Propano (C ₃ H ₈)	Teor de inibidor antioxidante	---
---	Propileno (C ₃ H ₆)	---	---
---	Monóxido de Carbono (CO ₂)	---	---
---	Oxigénio (O ₂)	---	---
---	Azoto (N ₂)	---	---
---	Teor de gás total	---	---

Relativamente aos parâmetros físico-químicos de entre de mais de 9 parâmetros que podem ser avaliados, como é possível verificar no ponto 2.4.1, os testes de rotina apenas avaliam 6. Este facto justifica-se com o elevado custo dos mesmos e com o facto de alguns deles apenas serem necessários no caso de existirem dúvidas em relação ao real estado do óleo.

Para o eliminar, utilizaram-se cinco, descartando a cor, por esta não ser nenhum fator de exclusão do óleo, uma vez que se trata de um parâmetro indicativo, como pode ser consultado na Tabela 2.1.

No caso dos parâmetros obtidos a partir da DGA, (recorde-se: são 11 e utilizaram-se 5), uma vez que são estes parâmetros que através da Equação 2. permitem calcular o tipo de defeito que está a ocorrer no interior do transformador relativamente à parte ativa, como é demonstrado na Tabela 2.2.

4.2.3. Construção da Base de Dados

Concluída a fase de seleção de dados que seriam importantes para a resolução do problema proposto, surgiu a necessidade de estruturar toda a informação reunida e desenvolver uma base de dados.

Devido ao facto de não existirem tantos dados como seria desejável, apenas um pouco mais de cem, utilizou-se a aplicação da *Microsoft*, o *Excel 2013* para a construção da base de dados, por se tratar de um *software* de fácil utilização.

O processo de treino precisa de 2 tipo de dados distintos:

- Dados de entrada: contempla todos os dados de entrada, devendo serem vistos como os *input* da RNA;
- *Target*: contempla todos os resultados (objetivos), devendo serem vistos como *output* da RNA.

A base de dados em *Excel 2013* precisa de considerar este processo para organizar todos os dados recolhidos para o processo de treino da RNA.

No ficheiro de *Excel 2013* desenvolvido, foi criada uma folha para os dados de entrada e outra folha para os *targets* desses dados. A Figura 4.3 e a Figura 4.4 apresentam uma parte dos dados de entrada e *target*, respetivamente, introduzidos no ficheiro em *Excel 2013* desenvolvido como base de dados da RNA.

Para a metodologia proposta, os dados de entrada serão as medições dos parâmetros físico-químicos e DGA para o ano N-1 e os dados *target* serão os mesmos parâmetros para o ano N. Por exemplo, as medições para o ano 2010 serão os dados de entrada, precisando de definir as medições 2011 (as próximas medições noutros anos) como *target*.

Transformador		1028A						
Ano		2003	2003	2004	2005	2008	2010	2010
Id		3	12	33	815	"0116"	1906	1980
N-1	C2H2	0,25	0,2	0,22	0,41	1,44	2,77	3,2
	C2H4	1,03	0,57	0,48	0,61	8,47	8,02	7,8
	CH4	0,3	0,46	0,36	0,57	24,36	51,84	37,94
	H2	4,39	5,76	5,04	2,57	42,18	3,74	2,32
	C2H6	0,09	0,02	0,05	0,13	39,79	44,29	35,92
	Teor água	4,6	4,7	5,4	4,1	2,7	2,2	2,1
	Índice acidez	0,005	0,004	0,005	0,005	0,006	0,009	0,016
	Tensão interfacial	42,5	40,2	42	42	37,5	35,7	37,2
	Tangente delta	0,00057	0,00099	0,00057	0,00166	0,00077	0,00148	0,00185
	Tensão disruptiva	76,6	75,5	79,9	77,4	65,8	76,4	58,3
	teor passivador	200	190	180	100	70	40	200
Momento de amostragem	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	
Idade transformador (anos)		5	5	6	7	10	12	12

Figura 4.3 – Base de dados com dados de entrada.

Como se pode verificar na Figura 4.3, para além dos dados recolhidos através dos relatórios de ensaios (concentração de Hidrogénio, Metano, Etano, Etileno, Acetileno, teor de água, índice de acidez, tensão interfacial, tangente de delta a 90°C, tensão disruptiva e teor de inibidor ou passivador), por questões de organização inseriu-se ainda o número de série da máquina, o ano em que foram colhidas as amostras e realizados os relatórios. Neste caso, para além da data, foi inserido o código do respetivo relatório (id).

Para completar a base de dados, foram introduzidas informações relativas à idade do transformador e ao momento em que foram colhidas as amostras.

Relativamente ao momento da colheita da amostra, especificaram-se dois momentos: transformador em serviço (representado na base de dados por “1000”) e após intervenção (representado na base de dados por “2000”).

A definição dos momentos da colheita da amostra é extremamente importante, na medida em que, sempre que é efetuada uma intervenção ao nível do óleo (desgaseificação, reposição do teor de passivador, filtragem e desumificação) a amostra seguinte está afetada e, como tal, é importante passar essa informação para a RNA.

Sempre que foi efetuada uma operação que alterasse as características da máquina (substituição de bobinagem ou substituição integral do óleo isolante), esses valores foram descartados e removidos da base de dados.

Não foi necessário introduzir informações referentes à potência das máquinas e níveis de tensão porque no ponto 4.2.2 estão especificadas as características dos transformadores sobre os quais este estudo incide e, portanto, não existiu necessidade de elaborar uma nova divisão na base de dados.

Uma vez explicada a estrutura dos dados de entrada da base de dados, importa referir que de toda esta informação, para o treino da RNA, entram apenas 13 parâmetros, como seria de prever, as concentrações de gases, o teor de água, o índice de acidez, a tensão interfacial, a tangente de delta a 90°C, a tensão disruptiva o teor de inibidor ou passivador, o momento da colheita da amostra e a idade da máquina. Todos os outros são apenas para ajudar na estruturação da base de dados e simplificar a sua utilização.

Definida a estrutura da base de dados para os valores de entrada e, tal como foi dito anteriormente, importa definir a estrutura da base de dados para os valores designados como *target*. Esta folha da base de dados apresenta informações semelhantes à anterior mas em menor número. Apenas apresenta as concentrações dos gases e os parâmetros físico-químicos (teor de água, Tangente de delta a 90°C, etc.) num total de onze parâmetros, que serão os dados de saída da RNA.

Tal como na folha que contém os dados de entrada, foram acrescentadas três colunas, meramente por uma questão organizacional, que contém a identificação do transformador, o ano da colheita da amostra e a identificação do respetivo relatório. A estrutura desta folha pode ser vista na Figura 4.4.

Relativamente à estrutura da base de dados, importa referir que o desfasamento de uma coluna entre as duas folhas está diretamente relacionado com a otimização da base de dados para o treino da RNA. Ou seja, se o propósito da rede é prever com um ano de antecedência defeitos que possam ocorrer na máquina, os *targets* têm de estar uma coluna desfasados para a frente. O funcionamento da RNA caracteriza-se pelos *targets* terem as medições para o ano N e os dados

de entrada têm as medições para o ano N-1. Por exemplo, para as medições de 2010 precisamos de definir como targets os dados de 2011.

Transformador	18128							
Ano	2013	2007	2007	2009	2010	2010	2012	2012
id	1477	"0743"	1244	"0556"	"0354"	"0411"	1769	1957
C2H2	0,47	4,3	1,62	0,4	8,02	7,07	24,7	0,99
C2H4	0,85	21,59	6,12	1,32	15,55	13,84	17,4	1,21
CH4	1,21	59,5	13,94	0,43	6,53	5,18	10,47	0,47
H2	4,67	32,68	25,03	6,17	64,27	47,35	43,45	4,4
C2H6	0,25	157,2	40,58	2,51	10,99	9,14	9,39	0,35
Teor água	8,9	6,9	4,6	4	4	2,5	8,2	9,2
Índice acidez	0,09	0,015	0,007	0,005	0,038	0,047	0,081	0,061
Tensão interfacial	35,4	31,5	30,05	31,2	22,3	22,4	19,4	20,5
Tangente delta	0,00625	0,0226	0,02506	0,01987	0,0057	0,00536	0,00703	0,00902
Tensão disruptiva	79,3	78,2	78,7	77,6	77,6	38,1	82	73,2
teor passivador	210	2	204	190	75	216	123	138

Figura 4.4 – Base de dados com os objetivos.

4.2.4. Implementação da Rede Neuronal Proposta

Após a recolha e a seleção dos dados para construir a base de dados, procedeu-se à implementação da RNA utilizando um software para a implementar, treinar e otimizar. Assim, o *software* utilizado para implementar a RNA foi: *MATLAB Realese 2012b* [41].

A escolha de *software* recaiu sobre o *MATLAB* por este se tratar de um *software* de alto desempenho especificamente direcionado para o cálculo numérico. O *MATLAB* integra análise numérica, manipulação com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional [40]. Acrescentando a estas características o *MATLAB* dispõe de várias *Toolboxes* que auxiliam na resolução de problemas específicos.

Para a implementação da rede neuronal proposta, utilizou-se a *toolbox Neural Network* do *MATLAB*. Esta *toolbox* fornece um conjunto de funções para auxiliar à modelização de redes neuronais.

De entre as várias funções existentes nesta *toolbox*, destacam-se as funções para construir o mais variado tipo de redes neuronais, por exemplo a rede neuronal do tipo *feedforward* [40], bem como outras opções para treinar a RNA, por exemplo: o treino baseado em Levenberg-Marquardt [40].

Assim, é possível projetar, treinar, visualizar e simular redes neuronais usando esta *toolbox* para diversas aplicações em engenharia, nas quais se insere a previsão de avarias em transformadores.

A Figura 4.5 apresenta um exemplo de estrutura de uma RNA que, inclusivamente, apresenta uma arquitetura semelhante à utilizada para desenvolver o método de previsão de avarias em transformadores.

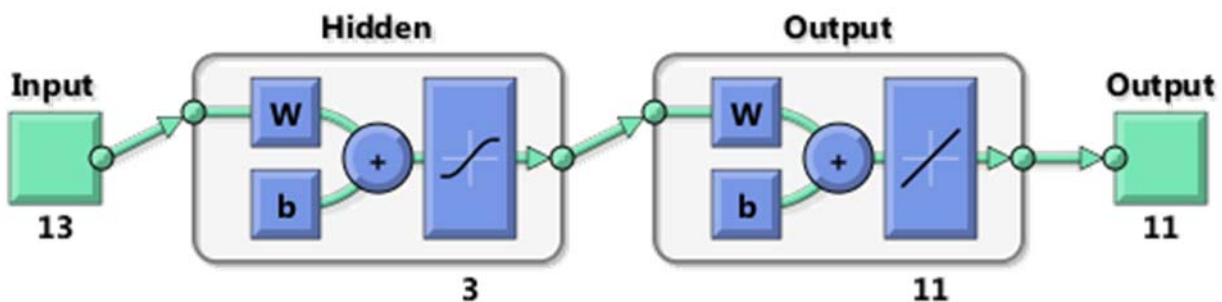


Figura 4.5 – Estrutura de uma Rede Neural Artificial.

4.2.4.1. Método de treino da Rede Neural

Na resolução do problema proposto, o treino da RNA é uma etapa particularmente crítica, visto que, apenas com uma correta definição de critérios de treino, escolha do tipo de RNA a utilizar e avaliação do treino será possível obter bons resultados.

Cronologicamente, o processo de treino começa com a importação de 75% dos dados da base de dados para o MATLAB mantendo a sua estrutura, dados esses que já foram explicados em 4.2.3. Apenas são importados 75% dos dados porque é esta a quantidade de dados ideal para

treinar a rede (escolhidos de forma aleatória). Os restantes 25% dos dados ficam reservados para teste.

Após os dados estarem carregados no MATLAB, devido à sua heterogeneidade, surgiu a necessidade de proceder à sua normalização. Caso contrário, existiria a possibilidade da RNA atribuir pesos muito diferentes a cada uma das variáveis e, assim, arruinar o processo de treino.

Como é perceptível na Figura 4.3, existem na mesma coluna valores na ordem das milésimas, como é o caso da tangente de delta e valores na ordem das centenas, teor de inibidor ou passivador. Para proceder à normalização utilizou-se uma função do MATLAB designada por *mapminmax* que se caracteriza por fazer convergir todos os valores para um intervalo entre [-1,1] e , desta forma, uniformizar a distribuição de pesos que a rede vai atribuir a cada uma das variáveis [27], neste caso optou-se por utilizar o intervalo [0,1].

Devido ao facto de a base de dados não ter muitos dados, tal como foi referido anteriormente, surgiu a necessidade de repetir o treino da rede neuronal até um número máximo de testes, que neste caso são 100. Pode-se referir que foi criada uma rotina que treina 100 RNAs e guarda todos os resultados desses treinos.

No MATLAB para a realização do treino da rede, foi escolhido o *Trainlm (Levenberg-Marquardt backpropagation)*, que é uma função de treino da rede que tem a capacidade de atualizar o peso das variáveis de acordo com a otimização *Levenberg-Marquardt* [42]. O *trainlm* caracteriza-se por ser o mais rápido algoritmo de *backpropagation* na *toolbox* do MATLAB e é altamente recomendado como um algoritmo de primeira escolha supervisionado, embora exija mais memória do que outros. Este método foi publicado primeiramente por Kenneth Levenberg em 1944 e aperfeiçoado por Donald Marquardt 1963 [43].

A Figura 4.6 apresenta a ferramenta de treino de RNAs do MATLAB, em que podem ser observadas as possibilidades de configuração de todos os parâmetros abordados neste tópico.

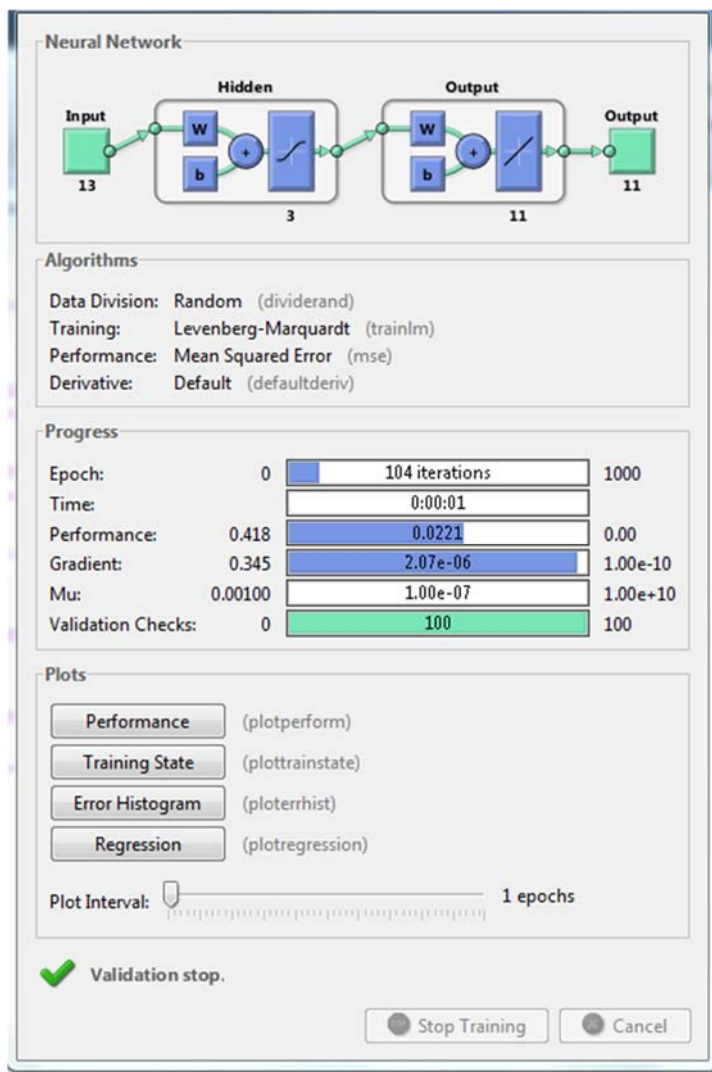


Figura 4.6 – Ferramenta de treino de RNA do MATLAB.

Atingido o número máximo de testes, a rotina termina e inicia-se a análise do desempenho das RNAs. Esta consiste essencialmente na análise de 2 indicadores comparando-os até encontrar a RNA com o melhor desempenho.

Os dois indicadores analisados foram: MSE- Mean Squared Error que mede o desempenho da rede de acordo com a média dos quadrados dos erros e o SSE-Sum Squared Error que mede o desempenho de acordo com a soma dos quadrados dos erros [40]. Os dois tipos de erros estão implementados em funções de MATLAB.

Analizado o desempenho de todas as redes, escolhe-se a que apresenta um melhor desempenho e aplica-se ao caso de estudo.

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de blocos que explica todo o processo de treino da RNA descrito ao longo deste tópico.

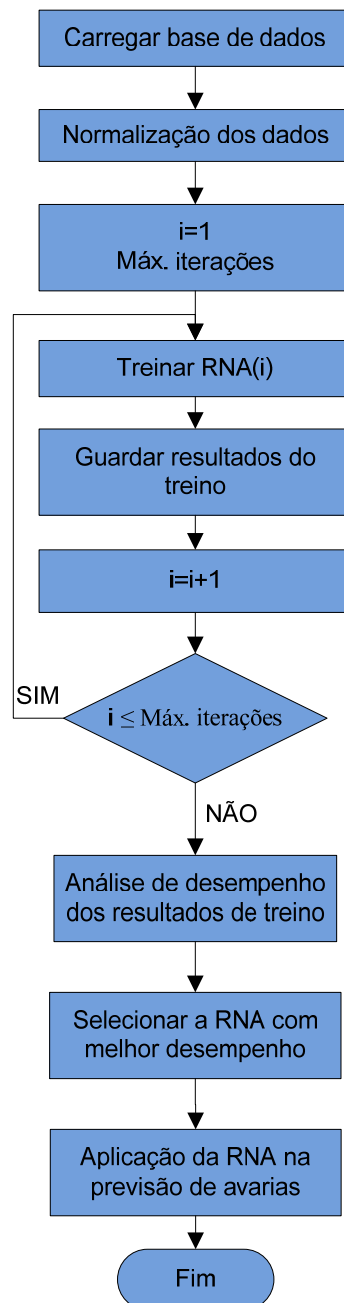


Figura 4.7 – Diagrama de blocos do processo de treino.

O método de treino apresentado na Figura 4.7 foi aplicado a diferente tipo de RNAs. Este método começou por ser aplicado a 3 diferentes tipos de RNAs:

- Rede do tipo *Feedforward*;
- Rede do tipo *Cascadefeedforward*;
- Rede do tipo *Fitnet*.

Para cada uma destas redes foi aplicado o processo de treino apresentado anteriormente e, depois, foi determinado o tipo de RNA mais adequada para o problema proposto. Este processo de seleção estará baseado na rede que apresentar o menor erro MSE e SSE ao longo dos 100 testes.

De seguida, o método de treino passava por avaliar qual era o número ideal de neurónios na camada oculta. Os resultados do treino das várias RNAs usadas serão abordados no próximo capítulo.

4.2.5. Classificação das Avarias Previstas pela Rede Neuronal

Este ponto referente ao método proposto, é também essencial para a previsão de avarias. Após a RNA gerar os parâmetros previstos para a próxima medição, é necessário avaliar se o transformador está avariado, ou não, e qual o tipo de avaria.

Após a RNA determinar os dados previstos para os parâmetros físico-químicos e DGA, são calculados os rácios que permitem diagnosticar falhas na parte ativa do transformador, em concordância com a Tabela 2.2. Relativamente aos parâmetros físico-químicos gerados pela rede são comparados com os valores previstos pela norma, presentes na Tabela 2.1.

Para auxiliar esta análise desenvolveu-se uma aplicação que calcula os rácios das concentrações e gera um alerta quando as condições para a determinação de um defeito são atingidas, tal como quando alguma das características do óleo apresenta graus de deterioração não aceitáveis pela norma.

Pelo facto de se serem apenas dados previstos e estes estarem sujeitos uma margem de erro, a aplicação utiliza uma margem de 10% para gerar um alerta relativo à possibilidade de determinado defeito poder vir a ocorrer num futuro muito próximo.

Desta forma, os dados que são extraídos da rede tornam-se de mais fácil compreensão e mais intuitivos para o utilizador desta ferramenta.

4.3. Conclusão

Quando se procura uma solução para um problema, o mais importante é definir de forma clara e precisa os objetivos. É apenas através desta perfeita definição que se torna possível determinar os recursos necessários.

No caso desta dissertação, que envolve uma elevada quantidade de dados, é necessário definir os mais relevantes e que acrescentam mais-valia na previsão de avarias em transformadores em serviço. Por vezes, uma incorreta definição dos dados a utilizar pode conduzir a problemas graves e colocar todo o restante processo em risco.

Após uma perfeita definição de critérios, importa otimizar o processo através de tentativas e testes até descobrir a melhor forma de solucionar o problema, o que nem sempre é fácil, principalmente quando se pretende prever um valor futuro.

Capítulo 5

Caso de Estudo e Análise de Resultados

5. Caso de Estudo e Análise de Resultados

5.1. Introdução

Desenvolvida a metodologia para a previsão de avarias, é necessário testar e analisar a sua aplicabilidade e fiabilidade.

Neste capítulo, pretende-se confirmar a empregabilidade e o valor da metodologia proposta. Para tal, irá ser associada a um caso específico de acordo com o apresentado no capítulo 4. A partir daí irá proceder-se à sua avaliação, recorrendo ao cálculo de erros nas mais diferentes fases do processo até chegar a avaliação final. Esta avaliação passa por uma comparação entre a previsão e o que realmente aconteceu.

Ao longo deste capítulo serão ainda apresentadas e justificadas as escolhas mais importantes feitas ao longo de todo este trabalho, como por exemplo, o tipo de RNA a utilizar, o número de neurónios na camada oculta, etc.

5.2. Dados de Entrada

Os dados de entrada foram obtidos a partir de mais de dois mil relatórios de ensaios físico-químicos ao óleo isolante de mais de trinta transformadores de potência instalados em Portugal. Destes relatórios analisados e processados, usaram-se para carregar na base de dados que serve de base a este estudo cento e sete dados.

Para além dos dados retirados dos relatórios de ensaios ao óleo e do momento da amostragem, a idade de cada transformador e a data da colheita da amostra são considerados como dados de entrada para a RNA. Esta informação pode ser analisada com mais detalhe no ponto 4.2.3.

Dos cento e sete dados de entrada disponíveis, foram escolhidos aleatoriamente oitenta e dois para o treino da rede, cerca de três quartos, e vinte e cinco para teste da mesma.

5.3. Resultados do Treino

A realização do treino da rede divide-se em duas partes distintas, uma primeira etapa que consiste na escolha do melhor tipo de RNA para esta problemática. E uma segunda, em que, com a RNA escolhida, se tenta otimizar o seu desempenho até atingir valores aceitáveis.

Para a realização do treino da rede, tal como foi referido anteriormente, utilizou-se a *toolbox* para RNAs do MATLAB em que se utilizou o tipo de rede *Feedforward*, bem como as suas derivações: *Cascadefeedforward* e *Fitnet*.

Uma vez descritos os diferentes tipos de redes utilizados na metodologia proposta no capítulo 4, importa analisar o seu desempenho e justificar a escolha efetuada. Para tal efetuaram-se testes de robustez a cada um dos tipos de rede em cada uma das iterações do seu processo de treino. Recorde-se que, devido aos poucos dados de entrada, foi criada uma rotina com cem testes para otimizar o método de treino.

Para a realização destes testes de robustez, utilizaram-se os três tipos de rede exatamente com as mesmas configurações (mesmo número de camadas ocultas de neurónios, mesmo número de neurónios nas camadas ocultas, etc.). Estes testes usaram as funções MSE e SSE no MATLAB, descritas no ponto 4.2.4.1.

Calculados os erros de cada uma das redes em cada um dos testes, construiu-se uma tabela comparativa com os três tipos de redes e calculou-se a média dos erros, tendo-se chegado à conclusão de que a *CascadeFeedforwardnet* apresentava valores de erro superiores às *Feedforwardnet* e a *Fitnet*, sendo que estas duas apresentavam valores muito próximos, ver Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Erro médio do treino com diferentes RNA utilizando os métodos MSE e SSE.

Tipo de RNA	Erro Médio	
	SSE	MSE
CascadeFeedforwardnet	17,09	0,042
Feedforwardnet	13,93	0,034
Fitnet	13,91	0,034

Através da análise da Tabela 5.1 é possível excluir o tipo de rede *CascadFeedFoward*, mas pelo facto das redes do tipo *Feedforward* e *Fitnet* terem valores de erro muito próximos é importante analisar graficamente a evolução do erro para estes dois tipos de redes ao longo dos 100 testes efetuados apresentado na Figura 5.1 e Figura 5.2.

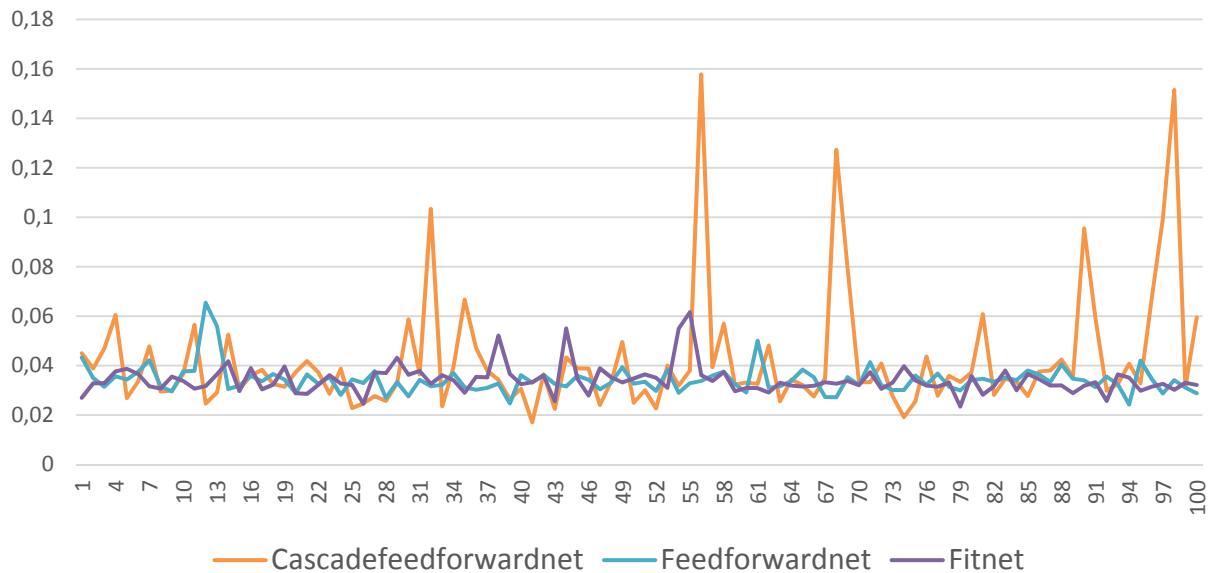


Figura 5.1 – Avaliação do desempenho dos tipos de RNA, pelo método MSE.

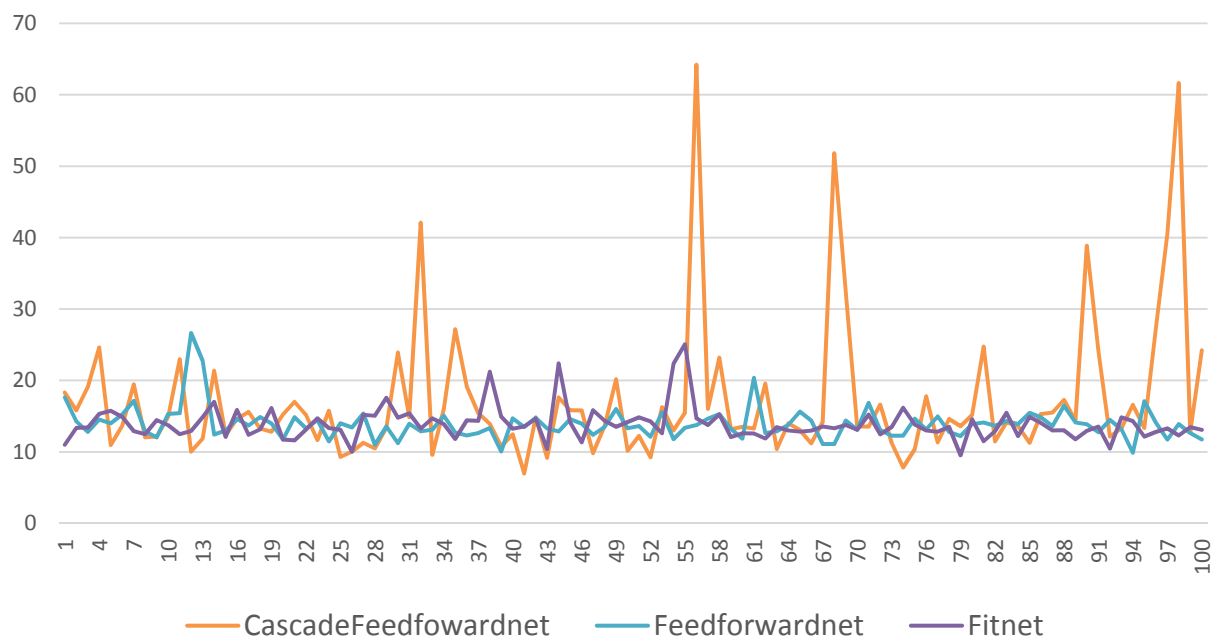


Figura 5.2 – Avaliação do desempenho dos tipos de RNA, pelo método SSE.

Através da análise dos gráficos representados na Figura 5.1 e Figura 5.2 em que se analisa o erro através do método MSE e SSE respetivamente, pode concluir-se que o tipo de rede *Fitnet* tem um desempenho ligeiramente superior ao da *Feedforward*.

Pode-se constatar que, em termos absolutos, o erro destas duas redes é muito semelhante. Graficamente também não existe uma diferença acentuada mas, no entanto, a partir da quinquagésima quinta iteração os valores de erro calculados pelo método MSE para a *Fitnet* são sempre inferiores aos da *Feedforward*.

Uma vez efetuada a avaliação dos três tipos de rede, escolheu-se o que tinha melhor desempenho, a *Fitnet*.

Após se ter escolhido o tipo de rede com melhor performance, por tentativa e erro, procedeu-se à otimização do desempenho desta, testando-se a RNA com diferente número de neurónios nas camadas ocultas.

Cumprido o processo iterativo para encontrar a melhor configuração para a rede, chegou-se à conclusão que a melhor configuração seria utilizar apenas uma camada oculta com três neurónios, como pode ser visto na Tabela 5.2 e nos gráficos representados na Figura 5.3 e Figura 5.4.

Tabela 5.2 – Erro médio do treino com diferente número de neurónios na camada oculta utilizando os métodos MSE e SSE.

Tipo de RNA	Erro Médio	
	SSE	MSE
3 Neurónios	13,91	0,034
10 Neurónios	20,92	0,051
20 Neurónios	35,17	0,086

A Tabela 5.2 mostra que o erro calculado pelo método MSE e SSE é bastante inferior para a rede com três neurónios na camada oculta do que com dez ou vinte neurónios. Importa referir, que estes três casos não foram os únicos testados, mas sim, os que apresentaram melhores resultados de todas as tentativas efetuadas.

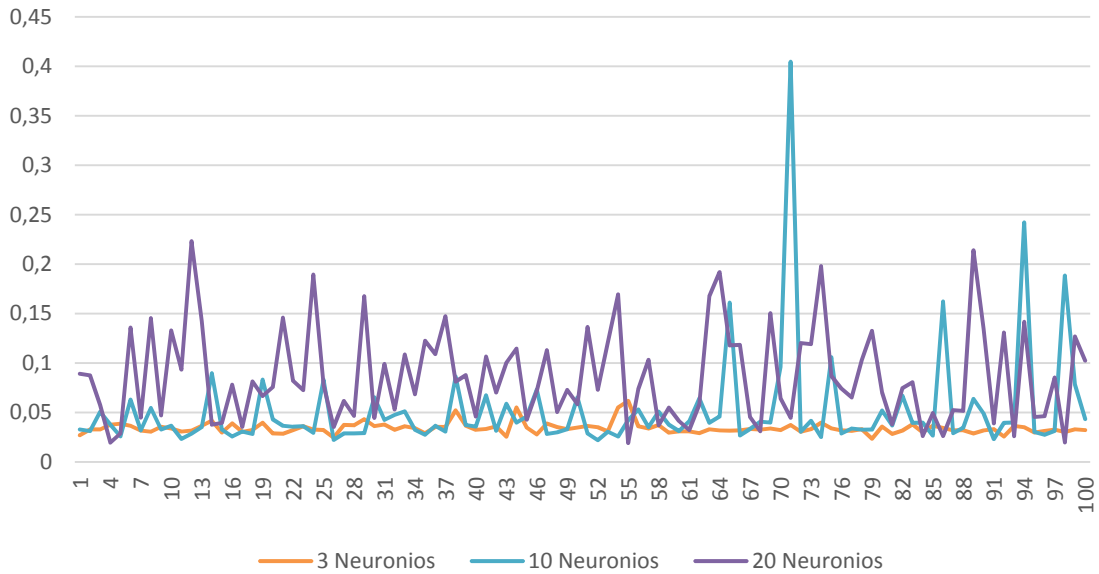


Figura 5.3 – Avaliação do desempenho da RNA com diferente número de neurónios na camada oculta com o método MSE.

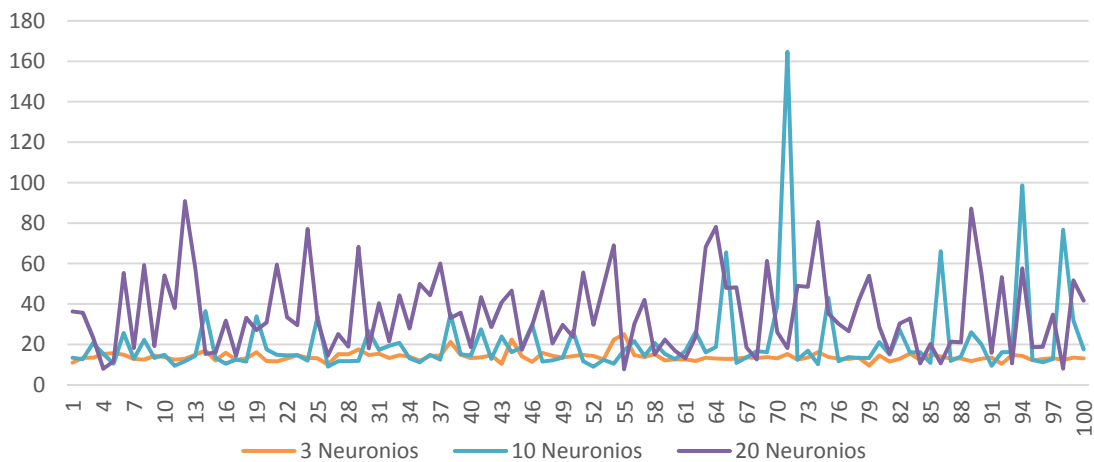


Figura 5.4 – Avaliação do desempenho da RNA com diferente número de neurónios na camada oculta com o método SSE.

Analisando os gráficos da Figura 5.3 e Figura 5.4, é possível reforçar a ideia de que a utilização de apenas três neurónios na camada oculta é fracamente melhor, não só pelo erro médio ser inferior mas, também, porque ao longo das cem iterações não apresenta tantas oscilações como as outras duas configurações.

5.4. Comparação com o Caso Real

Concluído o processo de avaliação do método de treino, aplicou-se a melhor configuração da RNA a um caso de estudo concreto no sentido de poder avaliar o real desempenho da metodologia proposta.

O caso de estudo escolhido foi um transformador trifásico com uma potência de 75MVA, 3 enrolamentos nos quais os níveis de tensão são: 220kV no enrolamento primário, 18kV no enrolamento secundário e o enrolamento terciário é meramente de estabilização. Este transformador encontra-se instalado numa Central Hidroelétrica de Albufeira.

Analisando a base de dados, pode-se constatar que o transformador em causa apresentava desde 2007, um histórico de falha térmica do tipo T1, segundo a Tabela 2.2, que corresponde à existência de pontos quentes com uma temperatura inferior a 300°C.

Para este caso, utilizaram-se os resultados do relatório efetuado em 2010 como dados de entrada da RNA, que apresentava uma falha do tipo T1 e, assim, poder prever a evolução da sua condição num futuro próximo.

Foram escolhidos os dados de 2010 deste transformador como dados de entrada na rede porque, para além dos dados de 2010, possuíam-se os dados de 2011 que serviram de comparação com os dados previstos.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de entrada referentes ao ano de 2010 e uma comparação entre os valores previstos pela RNA e os reais obtidos a partir de uma colheita para análise efetuada no ano de 2011.

Tabela 5.3 – Comparação entre Valores reais e valores previstos pela RNA.

		Valores Reais		Valores Previstos pela RNA	
		16641		16641	
		2010	2011		
	Número de Série				
	Ano				
	Id	1202	1397	---	
Dados de entrada	C ₂ H ₂	ppm v/v	0,98	5,16	5,58
	C ₂ H ₄	ppm v/v	7,45	91,18	75,30
	CH ₄	ppm v/v	18,65	122,17	103,96
	H ₂	ppm v/v	15,34	48,50	49,49
	C ₂ H ₆	ppm v/v	13,57	58,10	59,91
	Teor água	mg/kg	8,30	8,40	8,88
	Índice acidez	mg KOH/g	0,005	0,039	0,034
	Tensão interfacial	mN/m	46,5	21,50	21,77
	Tangente delta		0,0028	0,0226	0,0215
	Tensão disruptiva	kV	79,00	76,50	71,83
	Teor passivador	ppm	30,00	20,00	16,74
	Momento de amostragem		2000	1000	---
Idade do transformador	anos	26	27	---	

Analisando a Tabela 5.3 pode-se constatar que os valores previstos pela RNA aproximam-se dos reais, por exemplo, para tensão interfacial a RNA prevê um valor de 21,77mN/m e o valor real é 21,5mN/m, dando um erro relativo de 1%. No caso do Hidrogénio (H₂), o valor previsto é 49,49ppm¹, e o real é 48,50ppm com um erro de 2%. O erro médio e o desvio padrão dos valores previstos face aos valores reais são aproximadamente 8% e 6% respetivamente.

Utilizando a aplicação desenvolvida para a classificação de avarias previstas pela RNA, determinou-se o tipo de defeito que poderia estar a afetar o transformador. O tipo de defeito determinado a partir dos rácios de concentrações de gases dissolvidos no óleo estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Tipo de defeito detetado em função da norma para óleo de transformadores em serviço.

Rácios \ Ano	Real		Previsto
	2010	2011	
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	0,13	0,06	0,07
CH ₄ /H ₂	1,22	2,52	2,10
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	0,55	1,57	1,26
Tipo de Defeito	T1	T2	T2

¹ ppm – par por milhão

Analisando os resultados obtidos na Tabela 5.4, pode concluir-se que a RNA conseguiu identificar uma avaria do tipo T2 no transformador em causa. Esta previsão adquire especial importância porque prevê uma evolução do defeito constatado no ano de 2010 (defeito tipo T1) para um defeito do tipo T2, que se veio a confirmar através do relatório de ensaios realizado em 2011.

Enquanto um defeito do tipo T1 é um defeito não muito grave (ponto quente com temperatura inferior a 300°C). O defeito do tipo T2 já é um defeito grave (ponto quente com temperaturas entre os 300 e 700°C), que pode colocar em risco a integridade do transformador.

Após a análise do relatório resultante da amostra colhida em 2011 que diagnosticava a existência de pontos quentes, com uma temperatura entre 300 e 700°C, o cliente solicitou a realização de uma inspeção interna ao transformador através da qual se confirmou a indicação dada nesse relatório e a previsão feita pela RNA. Assim, a Figura 5.5 e a Figura 5.6 ilustram as consequências deste defeito.



Figura 5.5 – Vista geral das ligações entre as travessias e o enrolamento secundário completamente carbonizadas.



Figura 5.6 – Vista em pormenor das ligações entre as travessias e o enrolamento secundário completamente carbonizadas.

Analisando a Figura 5.5, pode constatar-se que os cabos que efetuam o grupo de ligação e as ligações entre o enrolamento secundário e as travessias ficaram completamente carbonizados devido a pontos quentes. A Figura 5.6 apresenta pormenores da completa destruição do isolamento radial dos cabos.

Neste tipo de defeitos, o *timing* de atuação é extremamente importante porque quanto mais tempo o transformador se mantiver em serviço, maior é a probabilidade do defeito se alastrar a outras partes do transformador (neste caso aos enrolamentos e, assim, destruir por completo o transformador).

A Figura 5.7 e Figura 5.8 apresentam o resultado da reparação efetuada neste transformador, para que ele pudesse continuar em serviço.



Figura 5.7 – Vista em pormenor da reparação efetuada nas conexões afetadas pelo defeito.

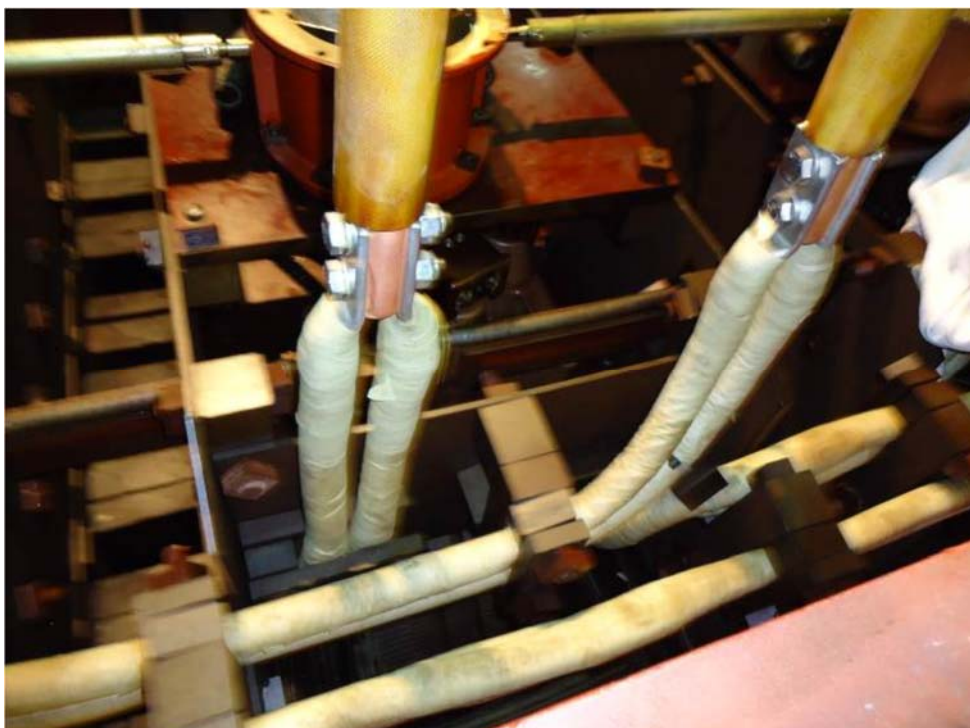


Figura 5.8 – Vista geral da reparação efetuada no transformador em estudo.

Como é possível constatar na Figura 5.7, foi necessário cortar os cabos afetados pelo defeito até um local no qual o isolamento e o cobre não estivessem afetados, neste caso em concreto, até muito perto dos enrolamentos. Após o corte das extensões de cabo destruídas, foram executadas cravações de novos cabos e repostos o isolamento, como é possível verificar na Figura 5.8.

Relativamente aos parâmetros físico-químicos, a previsão efetuada pela RNA apresenta valores coerentes e com um elevado grau de assertividade, como se pode constatar na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Tipo de defeito detetado em função da norma para óleo de transformadores em serviço.

Parâmetros	Real				Previsto	
	2010	Norma	2011	Norma	---	Norma
Teor água	8,30	Razoável	8,40	Razoável	8,88	Razoável
Índice acidez	0,005	Bom	0,039	Bom	0,034	Bom
Tangente delta	0,0028	Bom	0,0226	Bom	0,0215	Bom
Tensão disruptiva	79,00	Bom	76,50	Bom	71,83	Bom
Teor passivador	30	Repor	20	Repor	16,74	Repor

A Tabela 5.5 apresenta uma comparação entre os valores previstos pela RNA e os valores reais do ensaio efetuado em 2011, sempre com a indicação dada pela norma de óleos, cujo valores de referência podem ser consultados na Tabela 2.1.

Pode constatar-se que, de acordo com a Tabela 2.1, a RNA acertou em todos parâmetros e apresenta valores muito próximos aos reais no caso da evolução da tensão disruptiva em que o valor real é de 76,50kV e o previsto é de 71,83kV, ou seja, a previsão para este parâmetro apresenta um erro relativo de 6%. No parâmetro da tangente de delta, a RNA previu um valor de 0,0215 e o valor real obtido na medição foi de 0,0226 com um erro relativo de aproximadamente de 5%.

5.5. Análise de Resultados

Analisando os resultados obtidos pode constatar-se que a RNA prevê, com elevado grau de assertividade defeitos que possam vir a ocorrer, assim como a evolução dos parâmetros físico-químicos.

Relativamente ao caso de estudo apresentado, em termos analíticos, os erros relativos para cada um dos parâmetros são inferiores do que fazia prever o cálculo do MSE e SSE no capítulo anterior. Tendo como valor médio de 8.31%, ver Tabela 5.6, que indica um grau aceitável de exatidão do método.

Relativamente à previsão de avarias em que o que importa são os rácios: C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 e C_2H_4/C_2H_6 , os valores previstos pela RNA permitem o seu cálculo com elevado grau de assertividade tanto para este caso de estudo em particular, como para todos os outros.

Para os parâmetros físico-químicos, o grau de assertividade não é tão elevado, atingindo um erro médio apenas para estes parâmetros de aproximadamente 20%,.

A evolução destes mesmos parâmetros é difícil de prever, mais ainda do que os DGA, devido à inexistência de uma evolução lógica, a curto prazo, sendo necessário utilizar intervalos de tempo muito extensos, sem intervenção no óleo dos transformadores, algo que é praticamente impossível.

Assim, a Tabela 5.6 apresenta uma comparação entre os valores reais obtidos a partir dos ensaios efetuados ao óleo em 2011 e os valores previstos pela RNA com o respetivo erro relativo para cada parâmetro, bem como o cálculo do erro relativo médio e o desvio padrão.

Tabela 5.6 – Comparação entre valores reais e previstos com erros relativos e desvio padrão.

Parâmetros	Valor Real 2011	Previsão RNA	Erro Relativo %
C_2H_2 ppm v/v	5,16	5,58	8,22
C_2H_4 ppm v/v	91,18	75,30	17,42
CH_4 ppm v/v	122,17	103,96	14,90
H_2 ppm v/v	48,50	49,49	2,04
C_2H_6 ppm v/v	58,10	59,91	3,12
Teor água mg/kg	8,40	8,88	5,77
Índice acidez mg KOH/g	0,039	0,034	11,55
Tensão interfacial mN/m	21,50	21,77	1,27
Tangente delta	0,0226	0,0215	4,75
Tensão disruptiva kV	76,50	71,83	6,10
Teor passivador ppm	20,00	16,74	16,31
Erro relativo médio		%	8,31
Desvio padrão		%	5,57

Através da análise da Tabela 5.6, pode constatar-se que, a RNA prevê valores com um erro relativo que varia dos 1,27% até 17,42% que conduz a um erro médio de 8,31% e um desvio padrão de 5,57%.

Importa referir que, para outros casos de estudo, a variação entre os valores previstos e os reais foram superiores, ultrapassando em alguns casos um erro médio de 30%. Optou-se por este caso por ter apresentado um erro médio baixo e também porque, do ponto de vista académico, permite comprovar a empregabilidade do método, expondo as consequências do tipo defeito previsto e a necessidade de existência um método que os preveja.

Os possíveis motivos para existir alguns casos de estudo com um desvio mais elevado entre valores previstos e valores reais, já foram apontados no ponto 4.2 e prendem-se essencialmente com alguns aspetos:

- Reduzidas dimensões da base de dados, precisando de um histórico de medições com mais casos reais. Neste trabalho foram utilizados aproximadamente 100 casos. Uma possibilidade de reduzir o erro da previsão é dotar a RNA de uma base de dados com mais casos reais para, assim, obter uma maior perceção das tendências de avarias nos transformadores de potência;
- O elevado número de dados de saída da RNA em função dos dados de entrada. Como dados de entrada, a RNA utiliza 13 parâmetros e prevê 11 parâmetros de saída. Para além disso, os dados de saída são praticamente os mesmos que os dados de entrada;
- Inclusão de novos parâmetros de entrada que estejam relacionados com os dados de saída da RNA, tais como, horas de serviço, regime de exploração, temperatura média do transformador nos intervalos entre medições. Estes parâmetros podem influenciar a degradação dos transformadores de potência. Por exemplo, um transformador que esteja em pleno serviço ao longo de todo o ano tem uma deterioração superior a um outro que esteja parqueado². No entanto, este tipo de informação é difícil de obter devido ao grau de sigilo a que estão sujeitas;

² Transformador parqueado significa estar na instalação pronto a entrar em serviço, mas desligado.

- Alteração da estrutura de dados de entrada da metodologia proposta. A metodologia considera como dados de entrada os parâmetros da medição anterior, podendo considerar parâmetros de 2 ou mais medições anteriores;
- Os dados a prever são dados com uma complexidade muito elevada e muito subjetivos de sofrer perturbações, desde o processo de recolha até ao processo experimental de análise da amostra e cálculo de concentrações. Não esquecer que em muitos casos referem-se a valores na ordem de grandeza de ppm.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

6. Conclusão

6.1. Conclusões e Principais Contribuições

A realização desta dissertação permitiu clarificar vários aspetos relacionados com transformadores de potência.

Concluída a mesma é possível afirmar que, o conceito de manutenção preventiva é, de todo, aplicável a este tipo de máquinas devido aos seus preços avultados, às dificuldades de transporte e à falta de reservas na maior parte das instalações, implicando uma constante monitorização e pensada gestão da sua vida útil.

O dimensionamento e construção de um transformador é extremamente complexa e obedece à análise de vários fatores, desde logo, a escolha dos seus constituintes uma vez que estes influenciarão o rendimento da máquina, o seu período de vida útil e o número de intervenções às quais a máquina deverá ser sujeita. Por esse motivo, esta dissertação abordou todos os principais constituintes de um transformador de potência, descrevendo as suas características, funções e fatores de degradação.

Ao longo desta dissertação, o componente dos transformadores que foi abordado com maior preponderância foi o óleo isolante, uma vez que o óleo isolante está para o transformador de potência como o sangue está esta para o corpo humano. Da mesma forma que uma análise sanguínea permite determinar doenças, uma análise ao óleo isolante de um transformador permite determinar avarias, diagnosticar problemas e o seu estado de degradação.

Considerando as características reveladoras do óleo isolante e, associando-as a poderosas ferramentas informáticas, é possível obter uma significativa otimização e refinação de valores, bem como desenvolver uma capacidade, até agora, pouco explorada que é a previsão de valores e consequente previsão de falhas. Para tal, foram abordadas várias técnicas de inteligência artificial, apontadas pela comunidade científica como técnicas de excelência para a elaboração de previsões.

Analisadas as características e empregabilidade das várias técnicas de IA, optou-se pelo aprofundar do estudo das RNAs, técnica de excelência para a previsão de resultados como os

abordados nesta dissertação, o que poderia gerar uma ferramenta de extrema utilidade e com um potencial muito elevado porque, com os resultados das suas previsões, poderiam desenvolver-se ferramentas para o auxílio na tomada de decisão (planeamento de ações de manutenção a nível temporal e de âmbito, assim como, na estimação do tempo de vida útil dos equipamentos).

Analisadas as potencialidades das técnicas de inteligência artificial, nomeadamente das redes neuronais, evoluiu-se para uma fase de experimentação na qual se definiu uma metodologia capaz de potenciar as RNAs na previsão de parâmetros físico-químicos e DGAs do óleo. Algo que se veio a revelar como uma boa aposta, uma vez, que a metodologia proposta teve um desempenho bastante satisfatório tanto na previsão individual de cada valor como, também, na evolução destes parâmetros em conjunto, como ficou provado no caso de estudo anterior.

Assim, nesta dissertação selecionaram-se e estruturaram-se os parâmetros necessários para a rede neuronal, desenvolvendo uma base de dados no *software Excel 2013*, assunto explicado com maior detalhe nos pontos 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3. Construída a base de dados implementou-se a metodologia proposta para previsão de avarias em transformadores.

A metodologia proposta utilizou 3 tipos diferentes de RNAs para previsão: *Feedforward*, *Cascadefeedforward* e *Fitnet* (ver ponto 4.2.4) sendo efetuado o processo de treino para cada uma delas, e posterior análise do seu desempenho, através da determinação do erro pelos métodos MSE- Mean Squared Error, e o SSE-Sum Squared Error. Este processo de treino foi repetido até um número máximo de 100 testes.

Encontrado o melhor tipo de rede neuronal para a metodologia proposta, desenvolveu-se uma aplicação para determinar os rácios das concentrações e averiguar a existência de um defeito consoante os valores limites apresentados pela norma (consultar a Tabela 2.1 e Tabela 2.2).

Analisados os 3 tipos de RNAs conclui-se que a rede neuronal com melhor desempenho para a previsão deste tipo de parâmetros foi a do tipo *Fitnet*. Tal como pode ser analisado na Tabela 5.1 em que os erros MSE e SSE apresentaram valores de 0,034 e 13,91, respetivamente.

Esta rede foi posteriormente aplicada a um caso real, em que se estuda um transformador de potência instalado numa central hidroelétrica de albufeira. Partindo de uma amostra colhida no

ano de 2010 em que o transformador apresentava uma falha térmica do tipo T1 (pontos quentes com uma temperatura inferior a 300°C), a RNA previu a evolução destes parâmetros para um futuro próximo.

A RNA previu o surgimento de um defeito do tipo T2 (pontos quentes com uma temperatura entre 300°C e 700°C), algo que se veio a confirmar, posteriormente, através de uma colheita efetuada no ano de 2011.

Os valores previstos apresentaram um erro médio de aproximadamente de 8% face aos valores reais, consultar a Tabela 5.5. O defeito do tipo T2 é considerado um defeito grave, uma vez que, pode colocar em risco a integridade do transformador, tal como se veio a verificar levando à substituição de componentes do transformador (ver Figura 5.5 e Figura 5.6).

A rede neuronal conseguiu prever a evolução da condição do transformador provando, assim, a aplicabilidade deste tipo de técnica no auxílio da deteção de avarias em transformadores de potência, contribuindo significativamente para o estudo de fatores evolutivos no período de vida dos transformadores. Algo que até agora não tinha sido alvo de estudos muito aprofundados a nível mundial.

Esta dissertação pode trazer vantagens à EFACEC, na medida em que se trata de um grande fabricante de transformadores a nível mundial, reconhecida pelos seus parâmetros de qualidade. Também à unidade de *Servicing* desta empresa, dado que passa a usufruir de uma ferramenta capaz de auxiliar os seus clientes na prevenção de falhas e no diagnóstico de avarias e defeitos das suas máquinas.

6.2. Trabalho Futuro

Esta dissertação aborda uma problemática inexplorada a nível nacional e pouco explorada a nível mundial, o que permite a possibilidade de realização de otimizações à metodologia proposta.

Importa referir que esta dissertação aborda um tema com um elevado nível de complexidade. Para se poder melhorar os resultados obtidos será necessário, primeiramente, desenvolver uma base de dados consideravelmente superior. Algo que passará, certamente, por uma estratégia conjunta entre grandes fabricantes de transformadores, como por exemplo a EFACEC e os seus principais clientes, a EDP, REN, GNF, EDF, Sonelgáz, entre outros grandes *players* do SEE mundial, para se poder desenvolver uma base histórica sólida e com diferentes casos evolutivos.

No que diz respeito à inteligência artificial aplicada a previsões, o principal fator de sucesso é uma base de dados sólida porque tudo o resto é obtido experimentalmente. Como tal, após a construção de uma base de dados (com mais dados do que os usados nesta dissertação), estará aberto um caminho para serem experimentados diferentes tipos de inteligência artificial, combinação de técnicas para previsões, ou até mesmo, novas configurações para a metodologia proposta e, assim, atingirem-se valores com um maior grau de assertividade. Podendo no futuro os seguintes tópicos serem explorados para melhoramento do trabalho proposto:

- Testar a metodologia de previsão com outros métodos para além das redes neuronais, como, por exemplo, métodos híbridos, lógica difusa e, até, sistemas periciais;
- Inclusão de mais parâmetros nos dados de entrada na RNA, tais como horas de serviço, regime de exploração ou, até mesmo, temperatura de funcionamento do transformador;
- Utilização de RNA para previsão individual de cada um dos 11 parâmetros necessário para a deteção de avarias.

Referências

Referências

- [1] C. Carvalho, “Transformadores”, 2a edição, Editorial Engenharia, 1983.
- [2] IEC 60076-8, “Power Transformers - Application Guide”, 1997.
- [3] EFACEC Transformadores, “Instruções Operacionais de Transformadores Instalados na RNT”.
- [4] M. Heathcote, “The J & P Transformer Book”, 12a edição, Newnes, 1999.
- [5] CIGRE Brochure 323, “Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers”, 2007.
- [6] B. Pahlavanpour, “Power Transformer Insulation Ageing”, CIGRE - SC 15 Meeting, Sydney, Australia, 1995.
- [7] J. Rasco, “Naphtenic Mineral Insulating Oil Refining/Manufacture, Additives And Storage”, MyTransfo Proceedings, Turim, Italia, 2010.
- [8] M. Martins, “Sulfureto de Cobre Causa Falhas Catastróficas Em Transformadores. Enquadramento Do Problema E Sua Mitigacao”, XII ERIAC - CIGRE, Foz do Iguayacu, Brasil, 2007.
- [9] IEC 60422, “Mineral Insulating Oil In Electrical Equipment - Supervision And Maintenance Guidance”, 2005.
- [10] CIGRE Brochure 378, “Copper Sulphide In Transformer Insulation”, 2009.
- [11] A. Castro, V. Miranda e S. Lima, “Transformer fault diagnosis based on autoassociative neuronal networks”. Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference on, 2011.
- [12] IEC, “IEC-60599 - Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis”, 1999.
- [13] IEEE, “Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers - Redline”, IEEE Std C57.104-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991) - Redline, p. 1-45, 2009.
- [14] N. Muhamad, B. Phung, e T. Blackburn, “Comparative study and analysis of DGA methods for mineral oil using fuzzy logic”, Power Engineering Conference, 2007.

- [15] Y. Hong-Tzer e L. Chiung-Chou, "Adaptive fuzzy diagnosis system for dissolved gas analysis of power transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, p. 1342-1350, 1999.
- [16] J. Lee, D. Lee, P. Ji, J. Lim e S. Kim, "Diagnosis of Power Transformer using Fuzzy Clustering and Radial Basis Function Neuronal Network", International Joint Conference on Neuronal Networks, IJCNN '06, 2006.
- [17] IEC 60422, "Mineral Insulating Oil In Electrical Equipment - Supervision And Maintenance Guidance" , 2005.
- [18] M. Duval, e A. de Pablo, "Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, no. 2, p. 31-41, 2001.
- [19] IEC 354, "Loading Guide For Oil Immersed Power Transformers" , 1991.
- [20] M. Ali, C. Eley, A. Emsley, R. Heywood e X. Xaio, "Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 12, no.3, pp. 28-34, 1996.
- [21] M. Arbib, "Handbook of Brain Theory and Neuronal Networks", Bradford Books, 2a edição, 2002.
- [22] ASTM D3612-01, "Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography", ASTM Book of Standards Volume 10.03, Electrical Insulating Liquids and Gases; Electrical Protective Equipment, 2002.
- [23] B. Barraclough, E. Bayley, I. Davies, K. Robinson, R. Rogers e C. Shanks, "CEGB Experience of the Analysis of Dissolved Gas in Transformer Oil for the Detection of Incipient Faults", IEE Conference on Diagnostic Testing of High Voltage Power Apparatus in Service, pp. 178-192, 1993.
- [24] D. Bates, "DGA in a Box – A Utility's Perspective", Alabam Power Company.
- [25] ROBERT C. DUKARM, JAMES A. RUSSELL, FREDERICK C. MORIN, III, BRYAN J. PERRY, and ROBIN H. STEINHORN "The cGMP-specific Phosphodiesterase Inhibitor E4021 Dilates the

Pulmonary Circulation", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 160, No. 3(1999), pp. 858-865.

[26] Z. Berler, A. Golubev, A. Romashkov e I. Blokhintsev, "A New Method of Partial Discharge Measurements", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Atlanta, EUA, 1998.

[27] N. Bish, P. Howson, R. Howlett, "Condition Monitoring of Dielectric Behavior Leading to the Diagnosis of Partial Discharge Onset Using Neuronal Network Analysis", 33rd Universities Power Engineering Conference, 1999.

[28] E. Boshe, "Experience With the Development & Use of An Expert System for the Evaluation of Transformer Dissolved Gas Data," Proc. Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, Electr. Manuf. & Coil Winding Assoc., Imperial Beach, California, pp. 295-299, 1995.

[29] T. Bouthiba, "Artificial Neuronal Network-Based Fault Location in EHV Transmission Lines", University of Science and Technology of Oran, Algeria.

[30] C57.125, IEEE PES Transformer Committee, "IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors", IEEE Standards Board, 1991.

[31] C57.113, IEEE PES Transformers Committee, "IEEE Trial-Use Guide for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors", IEEE/NEMA, 1998.

[32] R. Okrasa, "Preventive maintenance – Handbook", 2a edição, Ontario Hydro, pp. 3-7, 1997.

[33] Department of the Interior Bureau of Reclamation, F15 3-30, "Facilities Instructions, Standards and Techniques Transformer Maintenance", Denver, Colorado, EUA, 2000.

[34] ABB, "User's Manual, Operation and Maintenance for Power Transformers", 1ZCL000002EG-EN– rev.1 pp. 2-8.

- [35] Department of the Interior Bureau of Reclamation, “Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics”, Hydroelectric Research and Technical Services Group, Denver, Colorado, EUA, 2005.
- [36] M.Bandyopadhyay, “Transformer diagnostics in the practical field”, Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Montreal, pp. 192-198, 2007.
- [37] LAbELEC “laboratório de energia LAbELEC”, Consultado: Maio de 2013, disponível em: <http://www.a-nossa-energia.edp.pt/homepage/index.php>;
- [38] EFACEC “laboratório da EFACEC”, Consultado: Junho de 2013, disponível em: http://www.efacec.pt/PresentationLayer/efacec_competencias_00.aspx?idioma=1&area=2&local=46;
- [39] Nynas “óleo isolante Nynas”, Consultado: Agosto de 2013, disponível em: <http://www.nynas.com/en/Segment/Transformer-oils/The-offering/Transformer-oils/>;
- [40] MATLAB “*software* da empresa Mathworks”, Consultado: Março de 2013, disponível em: <http://www.mathworks.com/products/MATLAB/>;
- [41] C. Graciola, J Neto, A. Goedtel, S. da Silva e C. do Nascimento, “Estudo da Robustez de Uma Rede Neuronal Artificial Aplicada ao Motor de Indução Trifásico sob Alimentação Desequilibrada” Universidade Federal do ABC, 2010.
- [42] D. MacKay, "Bayesianinterpolation," Neuronal Computation, vol. 4, no. 3, pp. 415–447, 1992.
- [43] M. Hagan, H. Demuth e M. Beale, “Neuronal Network Design”, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.

Anexos

Anexos

Anexo A

EDP PRODUÇÃO – CH POCINHO

Título

RELATÓRIO DE INTERVENÇÃO

TRABALHOS NO TRANSFORMADOR EFACEC Nº 16641-S

Autor:

Rafael Pereira

Aprovado por:

Data de emissão:

16/08/2011

Referência:

ACORDO DE QUADRO

Propostas Efacec Nº ENVP

Distribuição:

EDP Produção:

Eng.º Luís

Eng. Fernando

Eng. Rui

0

Índice

1 - Introdução

2 – Trabalhos realizados

3 – Anexos

1

Introdução / Identificação do transformador

De acordo com a solicitação da empresa EDP PRODUÇÃO e o Acordo Quadro N.º 01/10/PHMN, a EFACEC realizou ensaios preliminares e inspeção, pela porta de visita, ao transformador EFACEC N.º 16641-S, 62 MVA, 240 / 10 kV, segundo a proposta ENVP N.º 13-0138A.

Na sequência desta inspeção veio a verificar-se uma intervenção mais profunda para refazer as ligações dos cabos da BT e os trabalhos subsequentes, de acordo com a proposta ENVP N.º 13-0280.



Chapa de características

2

Trabalhos Realizados

Foram realizados entre 22 de Julho e 11 de Agosto de 2011 os seguintes trabalhos:

2.1. - Serviços de acordo com a proposta inicial ENVP, entre 22 e 23 de Julho de 2011:

- Desligar os barramentos AT e BT.
- Ensaio eléctrico ao transformador:
 - Medição das resistências de isolamento dos enrolamentos.
 - Medição das resistências óhmicas dos enrolamentos.
 - Medição da Tg δ do transformador.
 - Ensaio de detecção de cloro / PCB's no óleo.
 - Ensaio físico químico e dieléctrico do óleo.
 - Análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo.
 - Análise de produtos furânicos dissolvidos no óleo.
- Esvaziamento parcial do óleo do transformador, até à zona do grande reforço, para depósitos apropriados, disponibilizados pela EFACEC.
- Abertura de porta de visita para inspecção interna.
- Inspecção à parte activa do transformador.

NOTA: Esta inspecção visava principalmente observar os cabos de ligação às travessias (ausência de aquecimentos visíveis) bem como uma visão geral do estado do transformador (parte superior das fases).

2.2. - Resultados da inspecção interna realizada a 23 de Julho:

- Os ensaios realizados a 22 de Junho revelaram um aumento da resistência da BT (quando comparado com valores das intervenções anteriores).

- A inspecção interna revelou a presença de aquecimentos nas cravações dos cabos da BT aos terminais de ligação às travessias da BT.
- Apresentamos, a seguir, algumas fotos mais significativas da situação encontrada.



Vista geral do interior das ligações dos cabos da BT às travessias.



Mais um detalhe da ligação; já é visível o isolamento do cabo queimado.



Todas os 12 cabos d eligação apresentavam sinais de aquecimento nas cravações, embora uns mais pronunciados que outros.



Nesta foto vesse a situação mais crítica, verificada na fase U (terminal a1). Para além do papel completamente queimado, aparecem já alguns condutores de cobre fundidos



À parte dos problemas nas cravações da BT, não foram identificados mais problemas no transformador; na foto uma vista dos moldados.



Também os comutadores fora de tensão da AT apresentavam um aspecto normal.

- Em face do verificado nas ligações da BT, em particular na fase U, na ponta a1, a Efacec recomendou fazer uma intervenção urgente, com reparação destas cravações, substituído e emendando os cabos.

Em consequência, foi apresentada a proposta ENVP

2.3. - Serviços de acordo com a proposta ENVP, entre 22 de Julho e 11 de Agosto de 2011:

- Desmontagem do transformador para transporte, incluindo desmontagem do sistema de protecção contra incêndio, desligar armários de circuitos auxiliares e redes de terra.
- Transporte do transformador do local de instalação, para a sala de máquinas da Central do Pocinho.
- Remoção da tampa da cuba do transformador. A remoção da tampa foi realizada no túnel de acesso à sala de máquinas, por corte da soldadura.
- Remoção dos cabos e isolamentos danificados.
- Substituição dos cabos das ligações BT danificados e respectivas cravações.

Apresentamos de seguida um conjunto de fotos mais significativas:



Transformador na cela com os acessórios desmontados e pronto a transportar para o túnel de acesso à sala de máquinas da Central



Operação de corte da tampa, no túnel de acesso



Situação verificada após remoção da tampa



Idem anterior



Idem anterior – vista de detalhe



Um dos cabos já apresentava fios de cobre fundidos.



Vista dos cabos após remoção do isolamento.



Verificou-se que o enegrecido dos cabos se situa na periferia, nas zonas em contacto com a fita de nastro que se apresentava “tostada”.



Remoção do isolamento até às zonas de cravação.



Preparação da cravação nas zonas de emenda dos cabos



Idem anterior



Emenda dos novos cabos



Cravações dos cavaleiros para emenda dos novos cabos aos existentes.



Vista geral



Retoma do isolamento



Vista geral dos cabos já emendados



Retoma do aperto de montantes e limpeza



Vista geral antes da cravação dos terminais de ligação às travessias



Pernos das travessias



Pontas com terminais cravados, isolados e ligados aos pernos das travessias



Verificação de apertos com chave dinamométrica

- Ripagem do transformador para o túnel de acesso para a realização da soldadura da tampa.
 - Soldadura da tampa do transformador.
 - Verificação da soldadura por ensaios de líquidos penetrantes
 - Desmontagem das 5 uniões de tubo existentes e remoção da tubagem para apropriação.
 - Apropriação da tubagem através da soldadura de 10 novas flanges DN25.
 - Montagem da tubagem.
 - Desmontagem das válvulas de castelo existentes.
 - Apropriação e montagem de novas válvulas de esfera (2 DN80 e 3 DN25).
 - Transporte do transformador do local da realização dos serviços para o local da instalação (cela do TR1).
 - Montagem do equipamento exterior, retirado para transporte, incluindo montagem do sistema de protecção contra incêndio, ligar armários de circuitos auxiliares e redes de terra.
 - Secagem da parte activa do transformador, realizada com o transformador na sua cela, consistindo em ciclos sucessivos (24H/dia) de Hot-oil-spray, sob vácuo, com as travessias montadas no transformador.
- Durante a secagem foram realizados ensaios de controlo e acompanhamento, nomeadamente a medição de $T_g \delta$, temperatura do óleo de secagem, vácuo e quantidade de água removida. No final da secagem foi medida a temperatura média do cobre dos enrolamentos e verificaram-se valores de 107 / 108 °C (na BT e na AT, respectivamente).
- Enchimento do transformador sob vácuo com óleo novo fornecido pela Efacec.

Dado que o transformador sofreu uma secagem e uma vez que o óleo já apresentava sinais de envelhecimento, a EDP optou por substituir a correcção do teor de passivador pela substituição do óleo.

- Verificações e ensaios finais de entrada em serviço.

Foram realizados os seguintes ensaios finais:

- Medição das resistências de isolamento dos enrolamentos.
- Medição das resistências óhmicas dos enrolamentos.
- Medição da $T_g \delta$ do transformador e das travessias com tomada capacitiva.

- Ensaio de detecção de cloro / PCB's no óleo.
- Ensaio físico químicos e dieléctricos do óleo.
- Análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo.
- Ligar barramentos AT e BT.
- Limpeza do estaleiro.
- Assistência à colocação em serviço



3

Anexos



Relatórios de ensaios eléctricos:

- CED– Ensaios eléctricos no local antes e após a intervenção

Anexo B

 LQ	LABORATÓRIO DE QUÍMICA	N.º BA 03.0039		
BOLETIM DE ANÁLISE				
ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS				
FASE U				
AMOSTRA N.º: <u>4015 / 03</u> TRANSFORMADOR TIPO: CORE <input type="checkbox"/> SHELL <input checked="" type="checkbox"/>				
O.F. _____ N.º TFO: _____ POTÊNCIA <u>340 MVA</u> TENSÃO: <u>410/18/21kV</u>				
TIPO DE ARREF.: <u>ODAF</u> CLIENTE: _____ DATA DA AMOSTRA: <u>2003-01-10</u>				
LOCAL DE AMOSTRAGEM: <u>TOURADA INFERIOR - APÓS ENSAIO ADJECIMENTO</u>				
ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO POR CROMATOGRAFIA				
GASES ANALISADOS	MÉTODO	VALOR MEDIDO	UNIDADE	
Hidrogénio (H ₂)	CEI 567	5,76	ppm v/v	
Metano (CH ₄)		0,46		
Etano (C ₂ H ₆)		0,02		
Etileno (C ₂ H ₄)		0,57		
Acetileno (C ₂ H ₂)		0,20		
Propano (C ₃ H ₈)		0,08		
Propileno (C ₃ H ₆)		0,15		
Monóxido de carbono (CO)		11,37		
Dióxido de carbono (CO ₂)		227,48		
Oxigénio (O ₂)		9652,46		
Azoto (N ₂)		21589,4		
Teor de gás total		3,15		%
OBS.: <u>O ÓLEO ESTÁ CONFORME</u>				
	I.O.: CQLQ 10092 - anexo 2	2003-01-10 PÁGINA 1/1		

Mod. 120 324 P.001 - 3.000 ex. F. A4 - 7/2001 - G.V.P.

	LABORATÓRIO DE QUÍMICA	N.º BA 03.0760	
BOLETIM DE ANÁLISE ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS			
AMOSTRA N.º: <u>5021 / 03</u> TRANSFORMADOR TIPO: CORE <input type="checkbox"/> SHELL <input checked="" type="checkbox"/> FASE <u>U</u>			
O.F. _____ N.º TFO: _____ POTÊNCIA <u>340</u> MVA TENSÃO: <u>410</u> kV			
TIPO DE ARREF.: <u>ODAF</u> CLIENTE: _____ DATA DA AMOSTRA: <u>2</u> / <u>21</u>			
LOCAL DE AMOSTRAGEM: <u>TOMADA INFERIOR - ANTES DA ENTRADA</u> <u>SERVICO</u>			
Aspecto geral: <u>LÍMPIDO, SEM MATERIAIS EM SUSPENSÃO</u>			
CARACTERÍSTICA	MÉTODO	VALORES MEDIDOS	UNIDADE
Cor	ISO 2049	0	-----
Teor de água	CEI 814	5,4	mg/Kg
Índice de acidez	ASTM D974	9,005	mg KOH/g
Tensão interfacial, 20°C	ISO 6295	42,0	mN/m
Tangente delta, 90°C	CEI 247	0,00057	-----
Tensão disruptiva	CEI 156	79,9	kV
Em face destes resultados e tomando a amostra como representativa da carga contida no transformador de potência, CONCLUI-SE:			
<input checked="" type="checkbox"/> 1 - O óleo está conforme.			
<input type="checkbox"/> 2 - Teor de água não conforme. Necessário efectuar novo tratamento.			
<input type="checkbox"/> 3 - Acidez excessiva. Recomenda-se a substituição imediata do óleo.			
<input type="checkbox"/> 4 - Tensão interfacial baixa. Recomenda-se a substituição imediata do óleo.			
<input type="checkbox"/> 5 - Tangente delta a 90°C elevada. Necessário proceder à substituição do óleo.			
<input type="checkbox"/> 6 - Tensão disruptiva baixa. Necessário proceder à substituição do óleo.			
<input type="checkbox"/> 7 - _____			
	I.O.: CQLQ 10092 - anexo 1	2003-06-26 PÁGINA 1/1	

Mod. 120 324 P.001 - 3.000 ex. F. A4 - 12/02 - 1g



LABORATÓRIO DE QUÍMICA

N.º BA.03.0815

BOLETIM DE ANÁLISE

ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS

AMOSTRA N.º: 5024 / 03 TRANSFORMADOR TIPO: CORE SHELL
 O.F. _____ N.º TFO: _____ POTÊNCIA 340 MVA TENSÃO 410/8-21 KV
 TIPO DE ARREF.: ODAF CLIENTE: _____ DATA DA AMOSTRA: _____ 01
 LOCAL DE AMOSTRAGEM: TOPODA INFELICIA - ANTES DA ENTRADA SERVIÇO FASE U

ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO POR CROMATOGRAFIA

GASES ANALISADOS	MÉTODO	VALOR MEDIDO	UNIDADE
Hidrogénio (H ₂)	CEI 567	2,57	ppm v/v
Metano (CH ₄)		0,57	
Etano (C ₂ H ₆)		0,13	
Etileno (C ₂ H ₄)		0,61	
Acetileno (C ₂ H ₂)		0,41	
Propano (C ₃ H ₈)		0,77	
Propileno (C ₃ H ₆)		0,67	
Monóxido de carbono (CO)		0,55	
Dióxido de carbono (CO ₂)		446,61	
Oxigénio (O ₂)		15454,3	
Azoto (N ₂)		35729,8	
Teor de gás total		5,16	


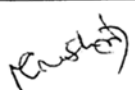
OBS.: _____

Mod. 120.324 P.001 - 3.000 ex. F. A4 - 12/02 - lg


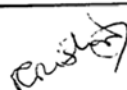
Handwritten signature

I.O.: CQLQ 10092 - anexo 2



2003-07-02
 PÁGINA 1/1

	LABORATÓRIO DE QUÍMICA	N.º BA 03.0034	
BOLETIM DE ANÁLISE			
ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS			
FASE V			
AMOSTRA N.º: <u>4013 103</u> TRANSFORMADOR TIPO: CORE <input type="checkbox"/> SHELL <input checked="" type="checkbox"/>			
O.F. _____ N.º TFO: _____ POTÊNCIA <u>340</u> MVA TENSÃO: <u>40/18-21</u> kV			
TIPO DE ARREF.: <u>ONAN</u> CLIENTE: _____ DATA DA AMOSTRA: _____			
LOCAL DE AMOSTRAGEM: <u>TOMADA INFERIOR - ANTES DO ENSAIO DE RECARGA</u>			
ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO POR CROMATOGRAFIA			
GASES ANALISADOS	MÉTODO	VALOR MEDIDO	UNIDADE
Hidrogénio (H ₂)	CEI 567	4,10	ppm v/v
Metano (CH ₄)		0,61	
Etano (C ₂ H ₆)		0,03	
Etileno (C ₂ H ₄)		1,13	
Acetileno (C ₂ H ₂)		0,32	
Propano (C ₃ H ₈)		1,53	
Propileno (C ₃ H ₆)		0,29	
Monóxido de carbono (CO)		5,28	
Dióxido de carbono (CO ₂)		587,22	
Oxigénio (O ₂)		17046,3	
Azoto (N ₂)		32768,1	
Teor de gás total		5,04	
OBS.: <u>O ÓLEO ESTÁ CONFORME</u>			
	I.O.: CQLQ 10092 - anexo 2	2003-01-09 PÁGINA 1/1	

Mod. 120 324 P 001 - 3.000 ex. F. A. - 7/2001 - G.V.P.

	LABORATÓRIO DE QUÍMICA	N.º BA 03 0040	
BOLETIM DE ANÁLISE			
ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS			
FASE V			
AMOSTRA N.º: <u>4016 103</u> TRANSFORMADOR TIPO: CORE <input type="checkbox"/> SHELL <input checked="" type="checkbox"/>			
O.F. _____ N.º TFO: _____ POTÊNCIA <u>340</u> MVA TENSÃO <u>410/18/21</u> KV			
TIPO DE ARREF.: <u>ODAF</u> CLIENTE: <u>PECO</u> DATA DA AMOSTRA: _____			
LOCAL DE AMOSTRAGEM: <u>TORADA INFERIOR - APÓS GUAISO AQUECIMENTO</u>			
ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO POR CROMATOGRAFIA			
GASES ANALISADOS	MÉTODO	VALOR MEDIDO	UNIDADE
Hidrogénio (H ₂)	CEI 567	14,72	ppm v/v
Metano (CH ₄)		0,45	
Etano (C ₂ H ₆)		0,02	
Etileno (C ₂ H ₄)		0,51	
Acetileno (C ₂ H ₂)		0,18	
Propano (C ₃ H ₈)		0,08	
Propileno (C ₃ H ₆)		0,14	
Monóxido de carbono (CO)		10,82	
Dióxido de carbono (CO ₂)		209,18	
Oxigénio (O ₂)		9596,57	
Azoto (N ₂)		22410,3	
Teor de gás total		3,22	
OBS.: <u>o óleo está confiante</u>			
	I.O.: CQLQ 10092 - anexo 2	2003-01-10 PÁGINA 1/1	

Mod. 120 324 P.001 - 3.000 ex. F. A4 - 7/2001 - G.V.P.

 LQ	LABORATÓRIO DE QUÍMICA	N.º BA. 03.0816																													
BOLETIM DE ANÁLISE ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS																															
AMOSTRA N.º: <u>5025 / 03</u> TRANSFORMADOR TIPO: CORE <input type="checkbox"/> SHELL <input checked="" type="checkbox"/>																															
O.F. _____ N.º TFO: _____ POTÊNCIA <u>340</u> MVA TENSÃO: <u>410/18-21</u> kV																															
TIPO DE ARREF.: <u>ODAF</u> CLIENTE: _____ DATA DA AMOSTRA: <u>2003/07/01</u>																															
LOCAL DE AMOSTRAGEM: <u>ESTADA INTERIOR - ANTES DA ENTRADA SERVIÇO FASE V</u>																															
Aspecto geral: <u>LÍMPIDO, SEM PARTICULAS EM SUSPENSÃO</u>																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">CARACTERÍSTICA</th> <th style="width: 20%;">MÉTODO</th> <th style="width: 30%;">VALORES MEDIDOS</th> <th style="width: 20%;">UNIDADE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cor</td> <td>ISO 2049</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td>Teor de água</td> <td>CEI 814</td> <td style="text-align: center;">4,0</td> <td style="text-align: center;">mg/Kg</td> </tr> <tr> <td>Índice de acidez</td> <td>ASTM D974</td> <td style="text-align: center;">0,005</td> <td style="text-align: center;">mg KOH/g</td> </tr> <tr> <td>Tensão interfacial, 20 °C</td> <td>ISO 6295</td> <td style="text-align: center;">423</td> <td style="text-align: center;">mN/m</td> </tr> <tr> <td>Tangente delta, 90°C</td> <td>CEI 247</td> <td style="text-align: center;">0,00179</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td>Tensão disruptiva</td> <td>CEI 156</td> <td style="text-align: center;">71,3</td> <td style="text-align: center;">kV</td> </tr> </tbody> </table>	CARACTERÍSTICA	MÉTODO	VALORES MEDIDOS	UNIDADE	Cor	ISO 2049	0	-----	Teor de água	CEI 814	4,0	mg/Kg	Índice de acidez	ASTM D974	0,005	mg KOH/g	Tensão interfacial, 20 °C	ISO 6295	423	mN/m	Tangente delta, 90°C	CEI 247	0,00179	-----	Tensão disruptiva	CEI 156	71,3	kV	Em face destes resultados e tomando a amostra como representativa da carga contida no transformador de potência, CONCLUI-SE:		
CARACTERÍSTICA	MÉTODO	VALORES MEDIDOS	UNIDADE																												
Cor	ISO 2049	0	-----																												
Teor de água	CEI 814	4,0	mg/Kg																												
Índice de acidez	ASTM D974	0,005	mg KOH/g																												
Tensão interfacial, 20 °C	ISO 6295	423	mN/m																												
Tangente delta, 90°C	CEI 247	0,00179	-----																												
Tensão disruptiva	CEI 156	71,3	kV																												
<input type="checkbox"/> 1 - O óleo está conforme. <input type="checkbox"/> 2 - Teor de água não conforme. Necessário efectuar novo tratamento. <input type="checkbox"/> 3 - Acidez excessiva. Recomenda-se a substituição imediata do óleo. <input type="checkbox"/> 4 - Tensão interfacial baixa. Recomenda-se a substituição imediata do óleo. <input type="checkbox"/> 5 - Tangente delta a 90°C elevada. Necessário proceder à substituição do óleo. <input type="checkbox"/> 6 - Tensão disruptiva baixa. Necessário proceder à substituição do óleo. <input checked="" type="checkbox"/> 7 - <u>N.º total de partículas muito elevado</u>																															
Mod. 120 324 P 001 - 3 000 ex. F. A4 - 12/02 - 1g 	I.O.: CQLQ 10092 - anexo 1	2003-07-02 PÁGINA 1/1																													

	Laboratório de Química		Nº.:BA.12.0931
	Boletim de Análise <u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60110/12	Subprojecto: S00016641	Nº. TI	
Transformador Tipo: Shell	Potência: 62 MVA	Tensão: 240 kV	
Tipo de Arref.: ONAF	Cliente:		
Local de instalação			
Local Amostragem: Tomada Inferior-Antes reparação			
Temperatura de Amostragem: 32 °C	Data de Amostragem: 05-06-2012		
Análise	Método	Valor experimental	Unidade
Enxofre corrosivo	ASTM D1275	---	---

Conclusão:


- 1 - O óleo está conforme.
 2 - O óleo não está conforme. Recomenda-se a substituição do óleo.

Característica	Método	Valor experimental	Unidade
Teor Passivador	Interno	37	mg/kg

Conclusão:

Obs.:

Emissão	Data	Documento	Página
1547	11-06-2012	PTLQ 10092 - Anexo 5	1/1

	Laboratório de Química	Nº.:BA.12.0931
Boletim de Análise		
<u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60110/12	Subprojecto: S00016641	Nº. Tfo:
Transformador Tipo: Shell	Potência: 62 MVA	Tensão: 240 kV
Tipo de Arref.: ONAF	Cliente: E	
Local de instalação:		
Local Amostragem: Tomada Inferior-Antes reparação		
Temperatura de Amostragem: 32 °C		Data de Amostragem: 05-06-2012

Aspecto Geral: Límpido, sem materiais em suspensão


Característica	Método	Valores medidos	Unidade
Cor	ISO 2049	3.5	-----
Teor de água	CEI 60814	3.5	mg/kg
Índice de acidez	ASTM D974	0.119	mg KOH/g
Tensão Interfacial, 20°C	ASTM D971	20.0	mN/m
Tangente delta, 90°C	CEI 60247	0.01357	-----
Tensão disruptiva	CEI 60156	73.9	kV

Conclusão:

- 1 - O transformador está em condições de ser mantido em serviço.
- 2 - Índice de acidez elevado mas ainda dentro dos limites geralmente aceitáveis. Recomenda-se uma vigilância.
- 3 - Índice de acidez excessivo. Recomenda-se a substituição ou a regeneração do óleo.
- 4 - Teor de água excessivo. Prever o acondicionamento do óleo.
- 5 - Tangente delta a 90 °C elevada. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 6 - Tensão disruptiva baixa. Recomenda-se o acondicionamento ou a substituição do óleo.
- 7 - Tensão interfacial baixa. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 8 - Tensão interfacial baixa; de acordo com a Norma CEI 60422, recomendam-se análises mais frequentes.

Obs.:

Emissão	Data	Documento	Página
1547	11-06-2012	PTLQ 10092 - Anexo 1	1/1

	Laboratório de Química		Nº.:BA.10.0335
	Boletim de Análise <u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60024/10		Subprojecto: S00012634	Nº. Tfo
Transformador Tipo: Shell		Potência: 340 MVA	Tensão: 18 kV
Tipo de Arref.: ODAF		Cliente:	
Local de instalação:			
Local Amostragem: Tomada Inferior-Após reparação			
Temperatura de Amostragem: 15 °C		Data de Amostragem: 10-02-2010	

Aspecto Geral: Límpido, sem materiais em suspensão


Característica	Método	Valores medidos	Unidade
Cor	ISO 2049	3.5	-----
Teor de água	CEI 60814	9.3	mg/kg
Índice de acidez	ASTM D974	0.028	mg KOH/g
Tensão Interfacial, 20°C	ASTM D971	23.7	mN/m
Tangente delta, 90°C	CEI 60247	0.03868	-----
Tensão disruptiva	CEI 60156	74.0	kV

Conclusão:

- 1 - O transformador está em condições de ser mantido em serviço.
- 2 - Índice de acidez elevado mas ainda dentro dos limites geralmente aceitáveis. Recomenda-se uma vigilância.
- 3 - Índice de acidez excessivo. Recomenda-se a substituição ou a regeneração do óleo.
- 4 - Teor de água excessivo. Prever o acondicionamento do óleo.
- 5 - Tangente delta a 90 °C elevada. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 6 - Tensão disruptiva baixa. Recomenda-se o acondicionamento ou a substituição do óleo.
- 7 - Tensão interfacial baixa. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 8 -

Obs.: O óleo está conforme.

Emissão	Data	Documento	Página
1547	18-02-2010	PTLQ 10092 - Anexo 1	1/1

	Laboratório de Química	Nº.: BA.10.0335
---	-------------------------------	-----------------


Boletim de Análise
Óleo de transformadores de potência em serviço

Amostra Nº.: 60024/10	Subprojecto: S00012634	Nº. T1
Transformador Tipo: Shell	Potência: 340 MVA	Tensão: 18 kV
Tipo de Arref.: ODAF	Cliente:	
Local de instalaçãc		
Local Amostragem: Tomada Inferior-Após reparação		
Temperatura de Amostragem: 15 °C		Data de Amostragem: 10-02-2010

Gases analisados	Método	Valor medido	Unidade
Hidrogénio (H2)	CEI 60567	2.22	ppm v/v
Metano (CH4)		2.54	
Etano (C2H6)		5.06	
Etileno (C2H4)		2.10	
Acetileno (C2H2)		0.49	
Propano (C3H8)		7.13	
Propileno (C3H6)		1.08	
Monóxido de carbono (CO)		16.30	
Dióxido de carbono (CO2)		398.66	
Oxigénio (O2)		6674.1	
Azoto (N2)		18241.3	
Teor de gás total			2.54

Conclusão: O óleo está conforme.

Emissão	Data	Documento	Página
1547	18-02-2010	PTLQ 10092 - Anexo 2	1/1

	Laboratório de Química	Nº.:BA.10.0273
	Boletim de Análise <u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>	
Amostra Nº.: 60020/10	Subprojecto: S00012634	Nº. Tfc
Transformador Tipo: Shell	Potência: 340 MVA	Tensão: 18 kV
Tipo de Arref.: ODAF	Cliente:	
Local de instalação:		
Local Amostragem: Tomada Inferior-Antes reparação		
Temperatura de Amostragem: 14 °C	Data de Amostragem: 06-02-2010	

Aspecto Geral: Límpido, sem materiais em suspensão


Característica	Método	Valores medidos	Unidade
Cor	ISO 2049	3,5	-----
Teor de água	CEI 60814	6,0	mg/kg
Índice de acidez	ASTM D974	0,040	mg KOH/g
Tensão Interfacial, 20°C	ASTM D971	24,3	mN/m
Tangente delta, 90°C	CEI 60247	0,04209	-----
Tensão disruptiva	CEI 60156	79,0	kV

Conclusão:

- 1 - O transformador está em condições de ser mantido em serviço.
- 2 - Índice de acidez elevado mas ainda dentro dos limites geralmente aceitáveis. Recomenda-se uma vigilância.
- 3 - Índice de acidez excessivo. Recomenda-se a substituição ou a regeneração do óleo.
- 4 - Teor de água excessivo. Prever o acondicionamento do óleo.
- 5 - Tangente delta a 90 °C elevada. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 6 - Tensão disruptiva baixa. Recomenda-se o acondicionamento ou a substituição do óleo.
- 7 - Tensão interfacial baixa. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 8 - Ver análise de gases.


Obs.: Os resultados apontam para uma descarga de alta energia.

Emissão	Data	Documento	Página
9411	12-02-2010	PTLQ 10092 - Anexo 1	1/1

	Laboratório de Química		Nº.: BA.10.0273
	Boletim de Análise <u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60020/10		Subprojecto: S00012634	Nº. Tfo:
Transformador Tipo: Shell		Potência: 340 MVA	Tensão: 18 kV
Tipo de Arref.: ODAF		Cliente: F	
Local de instalação:			
Local Amostragem: Tomada Inferior-Antes reparação			
Temperatura de Amostragem: 14 °C		Data de Amostragem: 06-02-2010	
Gases analisados	Método	Valor medido	Unidade
Hidrogénio (H2)	CEI 60567	19.59	ppm v/v
Metano (CH4)		161.28	
Etano (C2H6)		319.41	
Etileno (C2H4)		46.58	
Acetileno (C2H2)		7.07	
Propano (C3H8)		273.23	
Propileno (C3H6)		38.40	
Monóxido de carbono (CO)		402.00	
Dióxido de carbono (CO2)		9355.42	
Oxigénio (O2)		9073.9	
Azoto (N2)		61389.1	
Teor de gás total		8.11	%

Conclusão: Os resultados apontam para uma descarga de alta energia.

Emissão	Data	Documento	Página
9411	12-02-2010	PTLQ 10092 - Anexo 2	1/1

	Laboratório de Química	Nº.:BA.10.1396	
Boletim de Análise			
<u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>			
Amostra Nº.: 60135/10	Subprojecto: S00016640	Nº. Tfr	
Transformador Tipo: Shell	Potência: 62 MVA	Tensão: 240 kV	
Tipo de Arref.: ONAF	Cliente: I		
Local de instalação:			
Local Amostragem: Tomada Inferior-Transformador em serviço			
Temperatura de Amostragem: 42 °C		Data de Amostragem: 26-07-2010	
Análise	Método	Valor experimental	Unidade
Enxofre corrosivo	ASTM D1275	---	-----

Conclusão:


- 1 - O óleo está conforme.
 2 - O óleo não está conforme. Recomenda-se a substituição do óleo.

Característica	Método	Valor experimental	Unidade
Teor Passivador	Interno	259	mg/kg

Conclusão: o óleo está conforme

Obs.:

Emissão	Data	Documento	Página
8103	04-08-2010	PTLQ 10092 - Anexo 5	1/1

	Laboratório de Química		Nº.:BA.10.1396
	Boletim de Análise <u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60135/10		Subprojecto: S00016640	Nº. Tfo:
Transformador Tipo: Shell		Potência: 62 MVA	Tensão: 240 kV
Tipo de Arref.: ONAF		Cliente:	
Local de instalação:			
Local Amostragem: Tomada Inferior-Transformador em serviço			
Temperatura de Amostragem: 42 °C		Data de Amostragem: 26-07-2010	

Aspecto Geral: Límpido, sem materiais em suspensão


Característica	Método	Valores medidos	Unidade
Cor	ISO 2049	2,0	-----
Teor de água	CEI 60814	13,5	mg/kg
Índice de acidez	ASTM D974	0,0389	mg KOH/g
Tensão Interfacial, 20°C	ASTM D971	25,0	mN/m
Tangente delta, 90°C	CEI 60247	0,01524	-----
Tensão disruptiva	CEI 60156	82,5	kV

Conclusão:

- 1 - O transformador está em condições de ser mantido em serviço.
- 2 - Índice de acidez elevado mas ainda dentro dos limites geralmente aceitáveis. Recomenda-se uma vigilância.
- 3 - Índice de acidez excessivo. Recomenda-se a substituição ou a regeneração do óleo.
- 4 - Teor de água excessivo. Prever o acondicionamento do óleo.
- 5 - Tangente delta a 90 °C elevada. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 6 - Tensão disruptiva baixa. Recomenda-se o acondicionamento ou a substituição do óleo.
- 7 - Tensão interfacial baixa. Recomenda-se a substituição do óleo.
- 8 - Teor de água ligeiramente elevado

Obs.:

Emissão	Data	Documento	Página
8103	04-08-2010	PTLQ 10092 - Anexo 1	1/1

	Laboratório de Química	Nº.:BA.10.1590
Boletim de Análise		
<u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60161/10	Subprojecto: S00016639	Nº. Tfo:
Transformador Tipo: Shell	Potência: 62 MVA	Tensão: 240 kV
Tipo de Arref.: ONAF	Cliente:	
Local de instalação:		
Local Amostragem: Tomada Inferior-Antes reparação		
Temperatura de Amostragem: 26 °C		Data de Amostragem: 31-08-2010


Característica	Método	Valores medidos	Unidade
5 - hidroximetil - 2 - furfural (5HMF)	CEI 61198	<0.05	mg/kg
Álcool furfúlico (2FOL)		<0.05	
2 - furfural (2FAL)		0.63	
2 - acetilfurano (2ACF)		<0.05	
5 - metil - 2 - furfural (5MEF)		<0.05	

Conclusão:

- 1 - O óleo está conforme.
- 2 - O óleo apresenta sintomas de degradação ligeira do papel isolante.
- 3 - O óleo apresenta sintomas de degradação do papel isolante.
- 4 - O óleo apresenta sintomas de degradação severa do papel isolante.

Obs.: Ver ensaio de compostos furânicos.


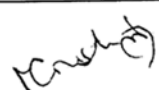
Emissão	Data	Documento	Página
9411	16-09-2010	PTLQ 10092 - Anexo 6	1/1

	Laboratório de Química	Nº.: BA.10.1590
Boletim de Análise <u>Óleo de transformadores de potência em serviço</u>		
Amostra Nº.: 60161/10	Subprojecto: S00016639	Nº. Tfo: 10000
Transformador Tipo: Shell	Potência: 62 MVA	Tensão: 240 kV
Tipo de Arref.: ONAF	Cliente:	
Local de instalação:		
Local Amostragem: Tomada Inferior-Antes reparação		
Temperatura de Amostragem: 26 °C	Data de Amostragem: 31-08-2010	

Gases analisados	Método	Valor medido	Unidade
Hidrogénio (H2)	CEI 60567	37.06	ppm v/v
Metano (CH4)		18.60	
Etano (C2H6)		17.88	
Etileno (C2H4)		10.47	
Acetileno (C2H2)		3.64	
Propano (C3H8)		90.74	
Propileno (C3H6)		34.53	
Monóxido de carbono (CO)		604.58	
Dióxido de carbono (CO2)		3060.56	
Oxigénio (O2)		5737.4	
Azoto (N2)		75433.5	
Teor de gás total		8.50	

Conclusão: Ver ensaio de compostos furânicos.

Emissão	Data	Documento	Página
9411	16-09-2010	PTLQ 10092 - Anexo 2	1/1

	LABORATÓRIO DE QUÍMICA	N.º BA. 63.0033	
BOLETIM DE ANÁLISE			
ÓLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NOVOS			
FASE U			
AMOSTRA N.º: <u>4012 / 03</u> TRANSFORMADOR TIPO: CORE <input type="checkbox"/> SHELL <input checked="" type="checkbox"/>			
O.F. <u>10028</u> N.º TFO: _____ POTÊNCIA <u>340</u> MVA TENSÃO: <u>410/18-21</u> kV			
TIPO DE ARREF.: <u>ONAN</u> CLIENTE: _____ DATA DA AMOSTRA: <u>2003/01/09</u>			
LOCAL DE AMOSTRAGEM: <u>TOmada inferior - ANTES DO ENSAIO AQUECIMENTO</u>			
ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO POR CROMATOGRAFIA			
GASES ANALISADOS	MÉTODO	VALOR MEDIDO	UNIDADE
Hidrogénio (H ₂)	CEI 567	5,04	ppm v/v
Metano (CH ₄)		9,36	
Etano (C ₂ H ₆)		0,05	
Etileno (C ₂ H ₄)		9,48	
Acetileno (C ₂ H ₂)		0,22	
Propano (C ₃ H ₈)		9,17	
Propileno (C ₃ H ₆)		9,13	
Monóxido de carbono (CO)		5,88	
Dióxido de carbono (CO ₂)		161,60	
Oxigénio (O ₂)		7510,75	
Azoto (N ₂)		15658,3	
Teor de gás total		232	
OBS.: <u>O ÓLEO ESTÁ CONFORTÉ</u>			
	I.O.: CQLQ 10092 - anexo 2	2003-01-09 PÁGINA 1/1	

Mod. 120 324 P.001 - 3.000 ex. F.A4 - 7/2001 - G.V.P.

Anexo C

```

%% ler dados
excelFile='Dados_treino_v21.xlsx';
input=xlsread(excelFile,'Dados_entrada','C4:DA16');
target=xlsread(excelFile,'Target','B4:CZ14');

%% Normalizar dados de entrada
[norm_input,ps1]=mapminmax(input,0,1);
[norm_target,ps2]=mapminmax(target,0,1);

%% Ler dados de teste
excelFile='Dados_teste_v3.xlsx';
input_Testes=xlsread(excelFile,'Dados','C4:AM16');
output_Testes=xlsread(excelFile,'Output','B4:AL14');

%% Normalizar dados de teste
[norm_input_teste]=mapminmax('apply',input_Testes,ps1);
[norm_output_teste]=mapminmax('apply',output_Testes,ps2);

%% treinar a rede neuronal para o caso do teste 1
matlab open
for i=1:100
    res(i).net=0;
    res(i).norm_Y=0;
    res(i).Y=0;
    res(i).perf_mse=0;
    res(i).perf_sse=0;
    res(i).perf_sae=0;
    res(i).perf_mae=0;
end
% net = cascadeforwardnet(3);
% net = feedforwardnet(3);
net = fitnet(3);
net.trainParam.max_fail=100;
net.trainParam.min_grad=1e-10;
net.trainParam.showWindow=0;

parfor i=1:100
    res(i).net=train(net,norm_input,norm_target);
    res(i).norm_Y=sim(res(i).net,norm_input_teste);
    res(i).perf_mse=mse(res(i).net,norm_output_teste,res(i).norm_Y);
    res(i).perf_sse=sse(res(i).net,norm_output_teste,res(i).norm_Y);
    res(i).perf_sae=sae(res(i).net,norm_output_teste,res(i).norm_Y);
    res(i).perf_mae=mae(res(i).net,norm_output_teste,res(i).norm_Y);
    res(i).Y=mapminmax('reverse',res(i).norm_Y,ps2);
end
matlab close
  
```