

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Desenvolvimento de Metodologia de Identificação de Transformadores AT/MT com Defeitos de Fabrico

Catarina de Oliveira Samagaio Alfaiate Reste

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Cláudio Monteiro

19 de julho de 2023

Resumo

Desenvolvida em contexto empresarial na E-REDES, esta dissertação propõe um modelo de análise de dados concebido para determinar se o defeito apresentado por um conjunto específico de transformadores AT/MT da rede distribuição elétrica da empresa estarão diretamente relacionadas com algum defeito de fabrico ou se se devem a problemas gerados por circunstâncias externas.

O objetivo é facultar à empresa uma metodologia que permita planejar atempadamente as beneficiações desses importantes ativos e ainda evitar a necessidade de intervenções não previstas, na perspetiva de que uma metodologia desta natureza pode gerar importantes vantagens económicas e melhorar a qualidade do serviço prestado aos clientes.

O presente trabalho começa com o estudo do transformador de potência com incidência nos seus aspetos construtivos e na sua função na rede de distribuição, bem como na avaliação das falhas mais recorrentes, seguida da análise às metodologias de diagnóstico do equipamento e exposição dos possíveis causas para o aparecimento de defeitos de fabrico. Posteriormente, faz-se a caracterização dos transformadores detidos pela empresa e exposição da metodologia proposta e a sua aplicação ao caso de estudo, finalizando com as conclusões retiradas do estudo.

O estudo demonstrou que os dados fornecidos pelo fabricante dos transformadores identificados como problemático no parque a E-REDES, não permitem identificar padrões claros e consistentes que confirmem a hipótese levantada pela E-REDES de um defeito no processo de fabricação desses ativos. Esta constatação sugere que outros fatores não considerados poderão estar a contribuir para a ocorrência do problema em questão, possivelmente em combinação com aqueles que foram alvo das variáveis investigadas.

A análise efetuada foi fundamental para a E-REDES, pois permitiu desbloquear o processo de decisão relativo às ações futuras a realizar no conjunto de transformadores em questão. O facto de estar estatisticamente demonstrada a não causalidade entre as características/componentes dos TP e a subida anormal do gás etano contribui para suportar a decisão de prosseguir com as investigações no sentido de se perceber a origem do problema, e disponibilizar os recursos financeiros e humanos necessários para o efeito.

Palavras-Chave: Transformadores de potência AT/MT, *Data Mining*, Defeito térmico de baixa temperatura, Condição do Transformador, Índice de Saúde, Falhas no Transformador, *Dis-solved Gas Analysis*.

Abstract

This work, developed within the business context of E- REDES, proposes a data analysis model to determine whether the defects occurring in a specific group of AT /MT transformers in the company's power distribution network are directly related to manufacturing defects or are due to problems caused by external circumstances.

The goal is to provide the company with a methodology that will allow timely planning of improvements to these critical assets and avoid unforeseen interventions, with the expectation that such a methodology can provide significant economic benefits and improve the quality of service provided to customers.

The present work commences with a study of power transformers, focusing on their constructional aspects and their role in the distribution network, as well as the evaluation of the most recurrent failures. This is followed by an analysis of equipment diagnostic methodologies and an exposition of possible causes for the occurrence of manufacturing defects. Subsequently, the company's transformers are characterized, and the proposed methodology is presented along with its application to the case study. The chapter ends with the conclusions drawn from the study.

The study demonstrated that the data provided by the manufacturer of the identified problematic transformers in the E-REDES network do not allow for the identification of clear and consistent patterns that confirm the hypothesis raised by E-REDES regarding a manufacturing defect in these assets. This finding suggests that other unconsidered factors may be contributing to the occurrence of the observed problem, possibly in combination with the variables investigated.

The performed analysis was fundamental for E-REDES, as it allowed unlocking the decision-making process regarding future actions to be carried out concerning the set of transformers in question. The statistically proven non-causality between the characteristics/components of the power transformers and the abnormal rise of ethane gas supports the decision to continue investigations to understand the origin of the problem and provide the necessary financial and human resources for this purpose.

Keywords: AT/MT power transformers, Data Mining, Low-Temperature Thermal Defect, Transformer Condition, Health Index, Transformer Failures, Dissolved Gas Analysis.

Agradecimentos

Nesta etapa final do meu percurso acadêmico, devo a várias pessoas um testemunho de reconhecimento, não só àquelas que de algum modo contribuíram para o resultado final deste estudo, mas também às que, direta ou indiretamente, me ajudaram a ultrapassar os desafios com que me deparei ao longo dos últimos cinco anos.

Ao Professor Cláudio Monteiro, meu orientador, expresso a minha mais profunda gratidão, pela disponibilidade e interesse com que acompanhou as diferentes fases da dissertação de mestrado, o que fez sempre com uma abordagem clara, serena, positiva e verdadeiramente motivadora.

À Engenheira Cristina Carvalho, minha co-orientadora, agradeço o tempo que atenciosamente me dispensou, os valiosos conhecimentos que partilhou comigo e os gratificantes incentivos que me ajudaram a ter mais confiança na resolução de aspetos decisivos do projeto que levei a cabo.

Estou também imensamente grato ao Engenheiro Miguel Freitas, pelo apoio constante, pelo ambiente favorável que criou no contexto em que desenvolvi o trabalho, pela amizade e pela preocupação que teve em tornar esta experiência tão estimulante e enriquecedora como efetivamente veio a ser.

Pretendo ainda estender o meu agradecimento ao Engenheiro Hugo Albuquerque, pela amabilidade com que se dispôs a esclarecer algumas questões fundamentais da investigação que realizei, bem como a toda a equipa da Estratégia de Gestão de Ativos da E-REDES, pela simpatia com que me recebeu, pelo modo como facilitou a minha integração na empresa e pela preciosa cooperação que recebi ao longo de seis meses.

Sei que aos meus pais, Jorge e Manuela, e à minha irmã Inês, basta dizer-lhes que senti sempre o seu amor incondicional e que o seu permanente suporte afetivo me ajudou a encarar com serenidade as situações mais desafiantes com que me deparei.

À minha avó Helena agradeço o encorajamento, a generosidade e o apoio em todas as horas, lamentando que o meu avô Manuel já não possa ter consciência plena do resultado desta etapa da minha vida. Do afeto familiar que tive o privilégio de receber destaco igualmente o da minha avó Maria do Céu, lembrando os carinhosos incentivos que me deu e sua tristeza por o meu avô Horácio não ter tido oportunidade de me conhecer.

Por último, agradecer ao meu namorado Platon, por todo o apoio que me tem dado e pelo caminho de descoberta que tem partilhado comigo e também aos meus amigos, cujo presença na minha vida foi fundamental para o desfecho extremamente positivo da jornada que agora termina. Já sinto saudades!

Um especial obrigado à Cati, ao Bernardo, ao Gui, à Maria e ao Tigas por tornarem estes últimos 5 anos inesquecíveis e por partilharem comigo os melhores momentos e os desafios mais stressantes durante este percurso.

Catarina de Oliveira Samagaio Alfaiate Reste

*“Great things are not done by one person.
They’re done by a team of people”*

Steve Jobs

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Questões de Investigação	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Metodologias e Ferramentas a Utilizar	3
1.5	Estrutura da Dissertação	3
1.6	Utilidade e aplicação dos resultados da dissertação	4
2	O Transformador de Potência AT/MT	7
2.1	Aspetos Construtivos	7
2.1.1	Parte Ativa	7
2.1.2	Cuba	8
2.1.3	Sistema de Isolamento	9
2.1.4	Sistema de Refrigeração	10
2.1.5	Travessias	11
2.1.6	Comutador de Tensão em Carga	12
2.1.7	Proteções Próprias	13
2.2	Ensaio de um Transformador de Potência	15
2.2.1	Ensaio de Qualificação	15
2.2.2	Ensaio de Receção	16
2.2.3	Procedimentos de Manutenção Preventiva	16
2.3	Tipos de Falha de um Transformador de Potência	17
2.3.1	Falha no Circuito Magnético	18
2.3.2	Falha nos Enrolamentos	19
2.3.3	Falha na Cuba	19
2.3.4	Falha do Sistema de Isolamento	19
2.3.5	Falha do Sistema de Refrigeração	20
2.3.6	Falha nas Travessias	20
2.3.7	Falha no Regulador de tensão	20
2.3.8	Falha nas Proteções Próprias	20
2.4	Metodologias de Diagnóstico dos TP	21
2.4.1	Diagnóstico do Óleo Isolante	22
2.4.2	Diagnóstico do Papel Isolante	27
2.4.3	Resistência do Isolamento e Índice de Polarização	30
2.4.4	Corrente de Excitação	30
2.4.5	Indutância de Fugas	31
2.4.6	Descargas Parciais	31
2.4.7	Análise da resposta dielétrica	33

2.4.8	Termografia	34
2.4.9	Inspeção Visual	34
2.4.10	Análise da Resposta em Frequência	35
2.4.11	Análise das Vibrações	35
2.4.12	Fator de Potência	35
2.4.13	Resistência do Enrolamento	36
2.4.14	Temperatura	36
2.5	Defeitos de Fabrico	37
3	Metodologia Proposta	39
3.1	Caraterização de Transformadores da E-REDES	39
3.1.1	Universo de Transformadores da E-REDES	39
3.1.2	Conjunto de Transformadores considerados problemáticos	41
3.2	Metodologia Concebida	44
3.2.1	Métodos estatísticos	47
3.2.2	<i>Mining</i> dos Dados	51
4	Aplicação da Metodologia ao Caso de Estudo	55
4.1	Recolha e Preparação dos Dados	55
4.2	Seleção das variáveis alvo	58
4.2.1	Teste <i>Chi-Square</i>	59
4.2.2	Teste T	69
4.3	Aplicação de regras de associação	69
4.4	Avaliação e interpretação dos resultados	71
5	Conclusões e Trabalho Futuro	73
5.1	Resposta às questões de investigação	73
5.2	Satisfação dos Objetivos	75
5.3	Utilidade do Trabalho Realizado	76
A	Anexos	79
A.1	Anexo 1 - Distribuição geográfica dos transformadores AT/MT	79
A.2	Anexo 2 - Estrutura de Metadados	80
A.3	Anexo 3 - Aplicação do teste <i>chi-square</i> às variáveis categóricas não seleccionadas	82
A.4	Anexo 4 - Aplicação do teste T às variáveis numéricas	92
A.5	Anexo 5 - Aplicação das Regras de Associação	94
	Referências	99

Lista de Figuras

2.1	Núcleo Magnético do Transformador de Potência	8
2.2	Cuba e Parte Ativa do Transformador	9
2.3	Radiadores e Ventiladores do TP	11
2.4	Travessias do Transformador	12
2.5	Comutador de Tensão em Carga [1]	13
2.6	Termômetro e Válvula de Sobrepressão	14
2.7	Taxa de avarias em função do tempo de serviço do transformador [2]	17
2.8	Distribuição de falhas por componente do transformador [3]	18
2.9	Técnicas de monitorização usadas no diagnóstico dos TP	21
2.10	Formação de Gases em Função da temperatura [4]	22
2.11	Triângulo de Duval [5]	26
2.12	Estrutura Molecular da Celulose [6]	28
2.13	Circuito genérico utilizado na identificação de descargas parciais [7]	32
2.14	Circuito genérico para o cálculo do FP [3]	35
3.1	Distribuição dos transformadores por idade	40
3.2	Distribuição dos transformadores por índice de saúde	40
3.3	Resultado de uma análise DGA ao óleo	41
3.4	Comparação de 4 conjuntos de transformadores produzidos por diferentes fabricantes	42
3.5	Distribuição dos Transformadores do fabricante em questão de acordo com a presença ou não de defeito, adquiridos após 2003	42
3.6	Distribuição dos Transformadores dos outros fabricantes de acordo com a presença ou não de defeito	43
3.7	Distribuição dos transformadores considerados problemáticos por idade	43
3.8	Distribuição dos transformadores considerados problemáticos por índice de saúde	44
3.9	Quatro fases dos processo de <i>data mining</i>	45
3.10	Fluxograma relativo à metodologia desenvolvida	46
3.11	Exemplo para aplicação do teste <i>chi-square</i>	47
3.12	Fluxograma relativo ao algoritmo <i>apriori</i> [8]	53
4.1	Consolidação dos dados relativos aos transformadores considerados problemáticos	56
4.2	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o ano de fabrico, por aplicação do teste qui-quadrado	61
4.3	Distribuição dos transformadores por ano de fabrico	62
4.4	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a espessura da chapa, por aplicação do teste qui-quadrado	63
4.5	Distribuição dos transformadores por espessura da chapa magnética	63

4.6	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante da barra de cobre, por aplicação do teste qui-quadrado	64
4.7	Distribuição dos transformadores por fabricante da barra de cobre	64
4.8	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante das travessias, por aplicação do teste qui-quadrado	65
4.9	Distribuição dos transformadores por fabricante das travessias	65
4.10	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante do cabo transposto, por aplicação do teste qui-quadrado	66
4.11	Distribuição dos transformadores por fabricante do cabo transposto	66
4.12	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a fábrica responsável pela soldagem, por aplicação do teste qui-quadrado	67
A.1	Mapa da distribuição geográfica dos transformadores AT/MT	79
A.2	Estrutura de metadados criada	80
A.3	Estrutura de metadados criada - continuação	81
A.4	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o grupo de ligação, por aplicação do teste qui-quadrado	82
A.5	Distribuição dos transformadores por grupo de ligação	82
A.6	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a potência, por aplicação do teste qui-quadrado	83
A.7	Distribuição dos transformadores por potência	83
A.8	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a relação de transformação, por aplicação do teste qui-quadrado	83
A.9	Distribuição dos transformadores por relação de transformação	84
A.10	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o tipo de óleo isolante, por aplicação do teste qui-quadrado	84
A.11	Distribuição dos transformadores por tipo de óleo isolante	84
A.12	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante da chapa magnética, por aplicação do teste qui-quadrado	85
A.13	Distribuição dos transformadores por fabricante da chapa magnética	85
A.14	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante do comutador de tensão em carga (OLTC), por aplicação do teste qui-quadrado	85
A.15	Distribuição dos transformadores por fabricante do comutador de tensão em carga (OLTC)	86
A.16	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante das shunts, por aplicação do teste qui-quadrado	86
A.17	Distribuição dos transformadores por fabricante das shunts	86
A.18	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante dos toros, por aplicação do teste qui-quadrado	87
A.19	Distribuição dos transformadores por fabricante dos toros	87
A.20	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante do balão, por aplicação do teste qui-quadrado	87
A.21	Distribuição dos transformadores por fabricante do balão	88
A.22	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a tinta interior, por aplicação do teste qui-quadrado	88
A.23	Distribuição dos transformadores consoante a tinta interior utilizada	88
A.24	Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a condutância, por aplicação do teste qui-quadrado	89
A.25	Distribuição dos transformadores de acordo com a condutância	89

A.26 Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e carga à qual o TP se encontra submetido um maior número de horas, por aplicação do teste qui-quadrado . . .	89
A.27 Distribuição dos transformadores consoante o patamar de carga	90
A.28 Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e os transformadores que operam em níveis de carga superiores a 80%, por aplicação do teste qui-quadrado . .	90
A.29 Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e concelho da subestação onde o TP está instalado, por aplicação do teste qui-quadrado	91
A.30 Tabela construída para a aplicação do teste T	92
A.31 Resultado da aplicação do teste T	93
A.32 Implementação do algoritmo que permitiu a extração das regras de associação . .	94
A.33 Lista das regras de associação obtidas a partir do algoritmo apriori	97

Lista de Tabelas

2.1	Ensaio de Série aplicados aos transformadores	15
2.2	Diagnóstico dos defeitos a partir da análise dos gases dissolvidos no óleo	23
2.3	Diagnóstico das falhas consoante presença dos vários gases, aplicado o <i>Key Method</i> [7]	24
2.4	Limite de Concentração de Gases Dissolvidos	24
2.5	Rácios de gás para o método de <i>Doernenburg</i> [7]	25
2.6	Rácios aplicando o método de Rogers e respetivas falhas associadas [7]	25
2.7	Correlação da concentração do composto 2-FAL e valor do DP com a condição do isolamento [9]	29
2.8	Estado do isolamento associado às diferentes gamas do IP	30
2.9	Classificação da severidade do aumento de temperatura[10]	34
2.10	Condição do isolamento consoante o fator de potência [3]	36
3.1	Síntese do teste <i>chi-square</i>	48
4.1	Descrição das variáveis utilizadas na análise	57
4.2	Resumo da seleção as variáveis categóricas	68
4.3	Variáveis numéricas em análise	69
4.4	Tabela síntese das variáveis alvo selecionadas e respetivas classes	70
4.5	Resumo das regras de associação selecionadas	71

Abreviaturas e Símbolos

AT	Alta Tensão
BT	Baixa tensão
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Pressão e Alta Resolução
MPP	Manutenção Preventiva Preditiva
MPS	Manutenção Preventiva Sistemática
MT	Média Tensão
PD	<i>Partial Discharge</i>
ppm	Partes por milhão
TP	Transformador de Potência
α	Ângulo

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

A E-REDES, empresa que integra o universo do grupo EDP, é o principal operador da rede de distribuição de eletricidade em Portugal e, nesta qualidade, tem como missão assegurar a continuidade do fornecimento de eletricidade a todos os consumidores, nacionais ou institucionais. Por conseguinte, o seu desempenho económico e a qualidade do serviço que presta aos clientes dependem do desempenho dos seus ativos na rede de distribuição [11]. Isto explica a existência do Departamento de Estratégia de Gestão de Ativos, cuja função é, entre outros, desenvolver e aplicar metodologias de análise e gestão de risco destes ativos, nomeadamente através de modelos que permitam verificar e medir o seu índice de saúde e a probabilidade de falha [12].

Os transformadores são um dos ativos mais importantes e valiosos da rede de distribuição elétrica, pois são indispensáveis para garantir a redução da alta tensão aos níveis de tensão compatíveis com a capacidade dos sistemas que chegam diretamente a energia aos consumidores. Daí que qualquer falha neste processo de redução de tensão pode ter graves consequências na disponibilidade elétrica, representando perdas económicas e ambientais significativas, em casos de extrema gravidade. Além disso, tendo em conta que a substituição de um único transformador pode facilmente ascender a mais de 400.000 euros, é essencial garantir a longevidade e fiabilidade deste tipo de equipamento, evitando possíveis avarias, nomeadamente através da deteção e identificação de anomalias na sua fase inicial e evitando assim a ocorrência de falhas catastróficas envolvendo ações e medidas de reabilitação não planeadas [13].

O estado do transformador é avaliado através da realização de diversos ensaios elétricos e de análises ao óleo isolante, nomeadamente para verificar a presença de gases e o seu grau de concentração, com base nos quais se estabelecem ações de manutenção futuras e possíveis operações de reabilitação. A avaliação contínua do TP, através da recolha e análise de vários tipos de transformadores, será fundamental para a metodologia a seguir na dissertação.

Tendo em conta a complexidade deste ativo e a sua indispensabilidade no funcionamento da rede de distribuição elétrica, é necessário conhecer em pormenor os seus aspetos construtivos e a sua função, bem como compreender as situações em que as falhas ocorrem normalmente e as suas causas, de modo a ser possível o desenvolvimento de sistemas que permitam o diagnóstico da origem destas falhas. Assim, a distinção entre as falhas causadas pelo funcionamento dos transformadores e as falhas causadas pelas suas deficiências de fabrico é fundamental.

A motivação para a concretização desta dissertação é precisamente esta, baseada num trabalho desenvolvido no âmbito de uma parceria entre a FEUP e a E-REDES. O estudo consiste em desenvolver uma metodologia orientada para os dados capaz de determinar se os defeitos identificados nos transformadores da empresa estão diretamente relacionados com alguma deficiência de fabrico. Esta metodologia será aplicada a situações que já foram identificadas como problemáticas nas famílias transformadoras do parque da empresa.

1.2 Questões de Investigação

Esta dissertação pretende responder a várias questões de investigação, tais como:

- Quais as ferramentas, métodos e algoritmos de análise mais adequados para identificar padrões e relações entre as características dos transformadores e o defeito térmico?
- Qual a aplicabilidade da metodologia proposta a diferentes contextos industriais?
- É possível afirmar que o defeito identificado advém de um defeito no fabrico dos transformadores?
- Quais são os próximos passos a serem levados a cabo pela empresa com base nos resultados e descobertas desta pesquisa?

1.3 Objetivos

A presente dissertação visa o desenvolvimento de um modelo de dados, capaz de identificar defeitos de fabrico em transformadores AT/MT. A concretização deste objetivo passa por atingir alguns outros, designadamente os seguintes:

- Compreender os aspetos construtivos do transformador e a função deste equipamento na rede de distribuição elétrica e os modos de falha que ocorrem;
- Conhecer as metodologias de diagnóstico da condição destes ativos;
- Identificar, através dos dados disponíveis, os transformadores considerados problemáticos;
- Estabelecer a relação entre os defeitos detetados por análises ao óleo isolante e os transformadores considerados problemáticos;

- Desenvolver o método mais adequado para o caso apresentado pela E-REDES;
- Aplicar o método desenvolvido aos casos de transformadores em estudo;

1.4 Metodologias e Ferramentas a Utilizar

Anteriormente a esta dissertação foram realizados estudos que permitiram a identificação de metodologias para a detecção de falhas em equipamentos em funcionamento e o desenvolvimento e análise da condição dos transformadores. Para além disso, foi ainda feito um estudo baseado no desenvolvimento de um algoritmo que permite calcular o índice de saúde dos transformadores, bem como a sua probabilidade de falha e vida restante. Dando sequência aos estudos anteriores, esta dissertação visa protocolar a metodologia adequada para o tratamento dos dados referentes às características e condições de operação dos transformadores, com o propósito de analisar a existência de possíveis correlações entre essas informações e o defeito térmico identificado. Essa relação, se confirmada, suscita a hipótese de se tratar de um defeito no processo de fabrico do transformador.

Assim, este estudo começa com uma análise dos dados de aproximadamente 700 transformadores, distribuídos por cerca de 400 subestações AT/MT, e mais especificamente de um subgrupo de cerca de 100 transformadores produzidos por uma empresa específica, 56 dos quais com defeito. Estes dados relativos aos resultados de ensaios e testes de diagnóstico da condição dos transformadores serão fornecidos pela EDP Labelec- Estudos, Desenvolvimentos e Atividades Laboratoriais, S.A, empresa que tem a seu cargo, entre outras funções, a inspeção dos ativos do setor elétrico [14].

A E-REDES verificou uma elevada concentração de etano no óleo de 55 % dos transformadores produzidos por um fabricante, o que suscitou a questão de saber se essa concentração advém de um defeito de fabrico ou não. Deste modo, foi feita uma primeira análise, recorrendo a métodos estatístico, com incidência na relação entre presença ou ausência do defeito e as características e modo de operação dos TP, com o intuito de perceber quais os dados relevantes para análises subsequentes. Posteriormente, aplicou-se uma técnica de *datamining*, denominada regras de associação, com o objetivo de estabelecer correlações entre o problema identificado e a conjugação das várias variáveis com relevância estatística, selecionadas previamente. Tal abordagem permitiu aferir se o defeito térmico observado advém de um defeito no processo de fabrico do ativo. No que diz respeito ao desenvolvimento do modelo, utilizou-se o *software Excel* para a aplicação dos métodos estatísticos e a linguagem de programação *Python* no software Visual Studio Code para a implementação das regras de associação.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, no primeiro dos quais é realizado um enquadramento de toda a problemática relacionada com os transformadores AT/MT e é exposta

a motivação que levou a empresa a propor este tema à FEUP e os objetivos pretendidos com o estudo a realizar. Na parte introdutória são ainda apresentadas as ferramentas a utilizar no desenvolvimento do trabalho e o contexto empresarial na qual o tema se insere.

Segue-se um capítulo com uma abordagem ao estado da arte relativamente a esta problemática, dando conta do resultado da pesquisa realizada para o efeito em literatura científica, seguida de uma fundamentação teórica detalhada sobre o ativo em que incide o estudo: o capítulo 2 é dedicado à descrição dos aspetos construtivos dos transformadores e a sua função na rede de distribuição e, posteriormente, são apresentados os ensaios realizados aos TP, tanto pelos seus fabricantes como pela E-REDES; seguidamente surge a revisão da literatura relativa aos modos de falha mais recorrentes nestes ativos e às metodologias já existentes para o diagnóstico da sua condição. Por fim, surge uma secção relativa aos defeitos de fabrico neste equipamento.

No capítulo 3 é então feita uma breve caracterização dos transformadores da empresa, focando nos considerados problemáticos, seguida da apresentação da metodologia proposta, com a exposição de todos os aspetos relevantes relacionados com a sua implementação.

A aplicação da metodologia proposta a transformadores já identificados como problemáticos no parque de transformadores AT/MT da E-REDES é descrita no capítulo 4, que contém ainda a análise de dados dos ativos em causa, nomeadamente os regimes de carga e os elementos sobre os seus aspetos construtivos/caraterísticas, no sentido de obter respostas ao problema enunciado.

Finalmente, no capítulo 5 expõem-se as conclusões retiradas da análise dos resultados obtidos com o modelo implementado e são apresentadas as respostas às questões de investigação enunciadas. Por fim, abordam-se as contribuições do estudo desenvolvido para a E-REDES e são ainda sugeridos trabalhos futuros que possam vir a ser desenvolvidos no âmbito deste tema.

1.6 Utilidade e aplicação dos resultados da dissertação

A presente dissertação foi realizada em conjunto com a equipa do Departamento de Estratégia de Gestão de Ativos da E-REDES, que, entre outras atividades, está incumbida de avaliar a condição de todos os transformadores, através da análise dos respetivos ciclos de vida, no sentido de os manter com níveis de eficiência, segurança e sustentabilidade tão bons quanto possível. Devido à circunstância de serem imprescindíveis para o funcionamento da rede de distribuição elétrica, os transformadores AT/MT têm de ser vigiados regularmente com recurso a vários ensaios e diversas inspeções visuais, preferencialmente sem retirar o equipamento de serviço, já que a dimensão considerável destes ativos inviabiliza, como se compreende, o seu transporte para manutenção em fábricas, salvo quando não existe alternativa e seja técnico-economicamente justificável.

A E-REDES constatou uma elevada percentagem de gás Etano no óleo isolante de 55% dos transformadores produzidos por um determinado fabricante e adquiridos desde 2003. Entretanto, a empresa distribuidora de energia realizou algumas diligências para aferir o impacto da concentração do referido gás na vida restante desses transformadores e identificar a causa que poderá estar na sua origem, mas estas foram, até à data, inconclusivas, o que remete, com maior urgência,

para a questão de perceber em que medida a situação poderá estar relacionada com algum defeito de fabrico.

É essa uma das questões de investigação que se pretende esclarecer com este estudo centrado no desenvolvimento de uma metodologia que permita a identificação de eventuais relações entre os caraterísticas dos transformadores AT/MT e o defeito identificado, no sentido de perceber até que ponto o tal defeito é provocado por um problema no fabrico do equipamento.

Com este modelo, a empresa sabe antecipadamente os ativos que poderão ser diagnosticados com o mesmo tipo de defeito, o que permite ao Departamento da Estratégia de Gestão de Ativos realizar uma análise ao risco de os manter na rede de distribuição. Deste modo, a equipa identifica e prioriza as necessidades de intervenção na rede e essa informação será posteriormente usada para desenvolver o plano de investimentos na rede de distribuição.

Assim, a identificação dos defeitos de fabrico numa fase precoce irá reduzir as consequências negativas que falhas funcionais poderiam provocar na rede de distribuição, permitindo à E-REDES proteger a qualidade de serviço e mitigar perdas a nível económico, uma vez que é expetável que as intervenções não previstas no conjunto de transformadores em análise sejam consideravelmente reduzidas.

Capítulo 2

O Transformador de Potência AT/MT

O transformador de potência é imprescindível para o funcionamento de qualquer rede de distribuição elétrica, sendo a sua principal função assegurar a conversão de tensão elevada para um nível de tensão mais baixa, no caso específico em estudo convertendo-a de alta para média tensão.

O presente capítulo é desenvolvido com base numa análise detalhada dos aspetos construtivos do transformador de potência trifásico, seguida de uma abordagem aos diferentes tipos de ensaios realizados ao TP e aos seus modos de falha mais recorrentes. Por fim apresentam-se ainda as metodologias mais utilizadas no diagnóstico da condição do ativo em causa.

2.1 Aspetos Construtivos

2.1.1 Parte Ativa

A parte ativa do transformador é constituída por dois componentes, designadamente o núcleo magnético e os enrolamentos.

- **Núcleo Magnético**

O núcleo do transformador é composto por uma liga de aço-silício, material ferromagnético que proporciona uma elevada permeabilidade magnética e resistência mecânica, facilitando a condução do fluxo com reduzida dispersão magnética. A sua estrutura laminada, visível na figura 2.1, formada por chapas finas isoladas eletricamente entre si, permite reduzir as correntes de Foucault e, em consequência, diminuir significativamente as perdas por efeito Joule [15].

No que diz respeito ao tipo de construção do núcleo magnético, os transformadores podem ainda classificar-se em dois grandes grupos: tipo Shell e tipo Core. Os transformadores a serem tratados nesta dissertação são do tipo Core. Neste tipo de construção o núcleo é constituído por 3 enrolamentos cilíndricos, que são montados concentricamente em torno do núcleo. Geralmente o enrolamento de média tensão corresponde ao cilindro interno e o de alta tensão ao cilindro externo [4].

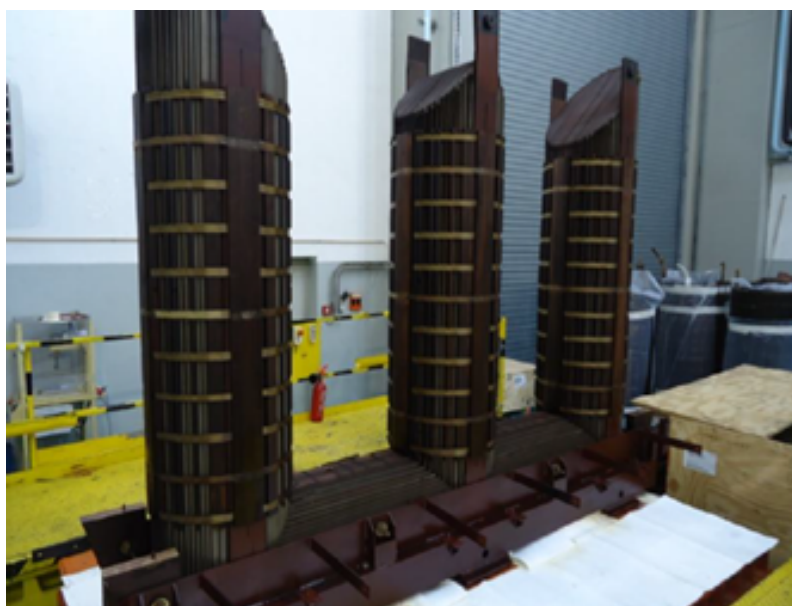


Figura 2.1: Núcleo Magnético do Transformador de Potência

- **Enrolamentos**

Os enrolamentos são componentes geralmente construídos de cobre eletrolítico ou alumínio, os quais constituem o circuito elétrico do transformador, sendo a sua principal função conduzir a corrente elétrica nas diferentes fases. O mais usual é o cobre eletrolítico, sobretudo pela sua capacidade mecânica, elevada condutividade e custo adequado para as características que oferece, sendo utilizado sob a forma de barras isoladas com papel isolante, tipicamente papel Kraft.

O enrolamento, onde se efetua a alimentação denomina-se de primário e o outro, conhecido como o de baixa tensão em transformadores de potência AT/MT, designa-se secundário [4].

2.1.2 Cuba

No interior da cuba encontra-se a parte ativa imersa no óleo isolante, sendo que a principal função é garantir o suporte e a proteção mecânica dos vários componentes do transformador de potência. Além disso, é ainda responsável por assegurar a ligação à terra do circuito magnético e das várias partes metálicas do transformador. A cuba é ainda dotada de um conservador, um depósito de óleo localizado na sua parte superior, cuja função é fazer a compensação da variação do volume do óleo isolante, de acordo com as suas variações de temperatura. Essa compensação concretiza-se com a entrada e saída de ar do conservador, por meio de um tubo ligado ao exterior que contém um depósito de sílica gel designado “secador de ar”, que atenua a humidade no ar circulante. A cuba, representada na figura 2.2, em conjunto com o conservador, garante a estanquicidade do sistema, o que evita derrames de óleo, que podem provocar a contaminação do meio ambiente e em última instância, incêndios no ativo. [16]



Figura 2.2: Cuba e Parte Ativa do Transformador

2.1.3 Sistema de Isolamento

- **Isolamento Sólido**

O isolamento sólido mais utilizado nos transformadores é o papel Kraft. Feito à base de moléculas de celulose, envolve o cobre ou o alumínio (do circuito elétrico), permitindo o isolamento, a refrigeração do óleo e assegurando também o suporte mecânico. A utilização do papel Kraft em larga escala deve-se à conjugação de vários fatores, nomeadamente o baixo custo, a facilidade em obtê-lo e as características dielétricas ótimas que conferem ao isolamento sólido uma boa estabilidade mecânica, já que a celulose não tende a deformar-se quando impregnada em óleo isolante. Em situações que requerem uma maior resistência, pode recorrer-se à utilização de excertos do chamado cartão de Kraft e também à madeira laminada, por garantirem uma ainda maior solidez mecânica. [4]

- **Óleo Isolante**

Este fluido dielétrico, obtido pela hidrogenação catalítica e tratamento ácido de combustíveis fósseis, nomeadamente do petróleo, tem como funções quer o isolamento da parte ativa do transformador e respetiva cuba, quer a dissipação de calor do interior para o ambiente.

De facto, trata-se de um elemento imprescindível do sistema de isolamento elétrico, pois proporciona ao transformador uma maior consistência e eficiência. Um bom óleo isolante deve ter as seguintes propriedades [4]:

- Elevada rigidez dielétrica, de forma a suportar as solicitações a que poderá estar sujeito em serviço;
- Resistência à oxidação, de modo a prolongar o tempo de vida útil do transformador;
- Viscosidade adequada para garantir a dissipação de calor e a sua circulação;
- Baixa reatividade química
- Resistência ao fogo

A análise ao óleo isolante permite conhecer as condições em que o transformador está a operar, nomeadamente através da deteção da presença de gases dissolvidos no óleo, o que permite retirar conclusões acerca do tipo de falhas e respetiva gravidade.

2.1.4 Sistema de Refrigeração

O aquecimento do transformador durante o seu funcionamento é inevitável e como tal é fundamental provê-lo de um sistema de refrigeração, dependendo a sua complexidade do contexto ambiental em que o equipamento se encontra a funcionar. Dessa forma, evita-se que ele atinja temperaturas elevadas que possam prejudicar o seu normal funcionamento e originar falhas, além de prevenir a degradação do papel e do óleo isolante.

Assim, o sistema de refrigeração pode ser codificado consoante o meio de arrefecimento interno e externo e o tipo de circulação a que o óleo está sujeito, nos seguintes termos [4]:

- ONAN - Óleo isolante natural arrefecimento natural;
- ONAF - Óleo isolante natural arrefecimento forçado;
- OFAF - Óleo isolante com circulação forçada, arrefecimento forçado;
- ODAF - Óleo isolante direcionado, ar forçado;
- OFWF - Óleo isolante com circulação forçada, arrefecimento forçado por intermédio de água;

São componentes do sistema de refrigeração os radiadores e os ventiladores, representados na figura 2.3.

Os radiadores permitem que o óleo isolante arrefeça, uma vez que no interior da tubagem, o fluído vai dissipando calor para o exterior. Tal acontece devido ao contacto do ar atmosférico mais frio com as paredes mais quente do radiador [17].

Os ventiladores facilitam a tarefa dos radiadores, forçando o ar a circular.



Figura 2.3: Radiadores e Ventiladores do TP

2.1.5 Travessias

As travessias, representadas na figura 2.4, asseguram o isolamento entre a passagem dos condutores exteriores para os interiores de ligação aos enrolamentos. Podem ser classificadas de acordo com o tipo de construção, materiais isolantes que contêm e tensão nominal de serviço considerando-se normalmente dois grandes grupos: as travessias capacitivas e as travessias não capacitivas [15].

- **Travessias Capacitivas**

Este tipo de travessias é utilizado, habitualmente, em transformadores com tensões de serviço mais elevadas, na ordem dos 60 kV. O papel (Kraft) é o material isolante mais utilizado, podendo este ser resinado (RBP), impregnado em resina (RIP), ou impregnado em óleo (OIP). A travessia é então formada pelo condutor central e a flange de montagem, estando distribuída entre eles uma série de condensadores concêntricos. [15] [4]

- **Travessias Não Capacitivas**

As travessias não-capacitivas, constituídas por um condutor central revestido por um isolante de porcelana, vidro ou papel, são geralmente utilizadas em transformadores com níveis de tensão inferiores a 15kV. A sua principal desvantagem prende-se com o facto de apresentarem no seu interior uma grande concentração de campo elétrico, podendo por isso originar descargas parciais comprometedoras para a sua condição. [15] [4]



Figura 2.4: Travessias do Transformador

2.1.6 Comutador de Tensão em Carga

Este componente é responsável pela regulação de tensão, conseguida através da variação do rácio do número de espiras dos enrolamentos, garantindo assim um determinado nível de tensão. A regulação é efetuada no enrolamento primário, onde estão ligadas várias tomadas, sendo que cada uma delas está associada a uma determinada quantidade de espiras. A variação da razão de transformação é efetuada sem interromper a corrente de carga desse enrolamento e, como tal, a ligação à tomada seguinte é feita antes de se quebrar a ligação à tomada anterior [18]. Este processo é feito por intermédio de uma impedância de transição, na forma de reactância ou resistência, de modo a dissipar a corrente que advém do curto-circuito entre espiras.

O comutador de tensão em carga é constituído por um componente de seleção de tomadas, denominado seletor, e por um dispositivo de comutação, o ruptor, que efetua a transferência de corrente da tomada ativa para a tomada seguinte escolhida pelo seletor, que não possui carga.

Tanto os contactos do ruptor como as impedâncias de transição encontram-se imersos no óleo isolante próprio do compartimento do ruptor, evitando-se assim a contaminação do óleo da cuba do transformador. [16]

Na figura 2.5 estão representados o comutador de tensão em carga, bem como o mecanismo de funcionamento do ruptor e do seletor de tomadas.

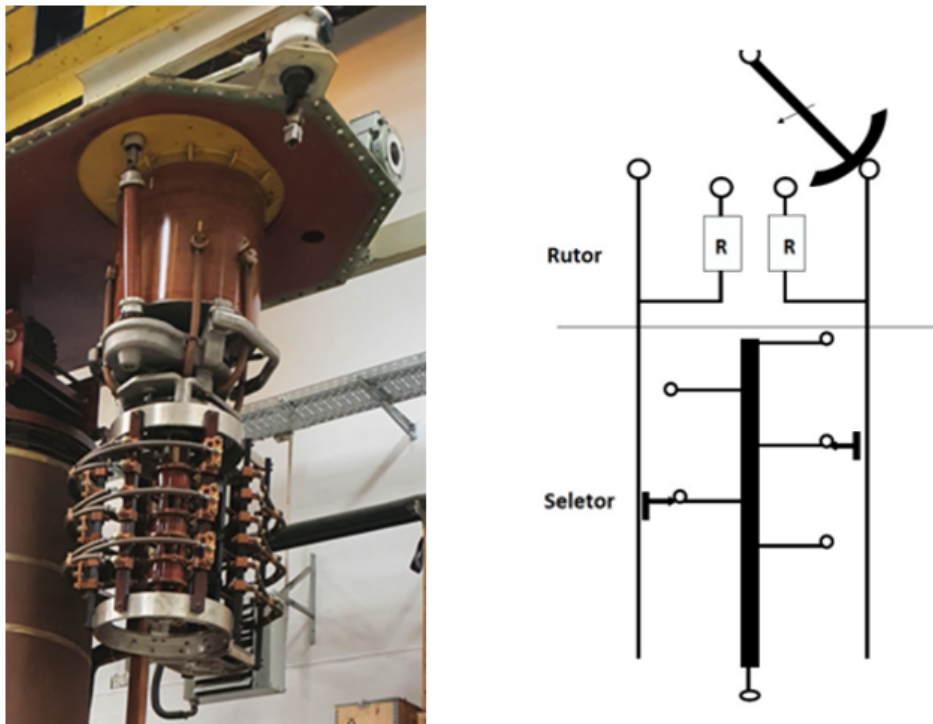


Figura 2.5: Comutador de Tensão em Carga [1]

2.1.7 Proteções Próprias

A instalação nos TP de um conjunto de acessórios de controlo, medição e proteção, denominados proteções próprias, permite monitorizar o funcionamento do ativo, alertando caso existam de situações adversas. Tipicamente, estas proteções estão associadas a sistemas de alarmes, que são acionados quando se deteta algum parâmetro invulgar, levando em alguns casos à desligação imediata do transformador [16]. De seguida, apresentam-se as proteções maioritariamente utilizadas nos TP AT/MT, bem como uma breve descrição do seu funcionamento [19] [4] [16]:

- **Relé de Buchholz**

O Relé de Buchholz, colocado no tubo que faz a ligação entre a cuba do TP e o conservador, é usado para a proteção da parte ativa do transformador. Este componente permite detetar vários modos de falha, designadamente quantidades anormais de gases no óleo resultantes de sobrecargas e defeitos internos no ativo, perdas de fluído isolante e eventuais fluxos de óleo na cuba.

- **Termómetros de óleo**

Este sistema é constituído por sensores imersos no óleo que efetuam a medição da temperatura do óleo, auxiliando no diagnóstico e análise do estado do transformador. Na figura 2.6 está representado este sistema.

- **Imagem Térmica**

O termómetro de imagem térmica permite estimar a temperatura do “ponto mais quente” do enrolamento, através da imersão de uma sonda na bolsa de óleo situada na tampa da cuba, combinada com uma resistência de aquecimento.

- **Válvula de sobrepressão**

Este equipamento, expresso na figura 2.6, assegura a limitação e eliminação rápida de sobrepressões internas, que podem ser provocadas pela formação de gases resultantes de descargas eléctricas, nomeadamente curto-circuitos, ou por um aumento do nível do óleo.

- **Indicadores do nível do óleo**

Os indicadores são dispositivos de controlo que acionam alarmes no caso de se verificarem situações irregulares, nomeadamente perdas significativas de óleo. Adicionalmente, estes permitem controlar operações de esvaziamento e enchimento do fluído isolante.

- **Relé de fluxo do óleo**

Este componente assegura a proteção do comutador de tensão em carga, através da deteção de situações em que o fluxo de óleo entre a parte superior do comutador e do conservador apresenta valores superior ao pré-definido.



Figura 2.6: Termómetro e Válvula de Sobrepressão

2.2 Ensaios de um Transformador de Potência

2.2.1 Ensaios de Qualificação

Na E-REDES, a fim de garantir que os transformadores produzidos numa fábrica tenham um determinado nível de qualidade, são realizados um conjunto de ensaios de qualificação, que avaliam se as especificações requeridas são satisfeitas. Neste sentido, o fabricante efetua ensaios de série, que seguem a norma EN 600761-1. Na tabela 2.1 encontram-se especificados esses ensaios [20]:

Tabela 2.1: Ensaios de Série aplicados aos transformadores

Ensaio	Descrição do ensaio
E1-SERIE	Medição da resistência do enrolamento
E2-SERIE	Medição da relação de transformação e verificação do símbolo de ligações
E3-SERIE	
	Medição da impedância de curto-circuito e das perdas devido à carga nas tomadas principal e extremas
E4-SERIE	Medição das perdas e da corrente em vazio
E5-SERIE	Ensaios dielétricos individuais
E6-SERIE	Ensaios ao regulador de tomadas
E7-SERIE	Ensaio de estanquicidade
E8-SERIE	Verificação da relação de transformação e polaridades dos transformadores de corrente
E9-SERIE	Ensaios de revestimento protetor
E10-SERIE	Cálculo do Índice de Eficiência de Pico (PEI)
E11-SERIE	Controlo dimensional dos transformadores relativamente aos planos fornecidos e aos limites especificados
E12-SERIE	Controlo das proteções próprias do transformador
E13-SERIE	Controlo da potência dos ventiladores

2.2.2 Ensaios de Receção

Aquando da sua receção, os transformadores são submetidos a ensaios de receção, realizados na presença de um representante da E-REDES, com vista verificar a qualidade do equipamento entregue por uma determinada entidade. Estes ensaios consistem na repetição dos ensaios de série efetuados previamente pelo fabricante, de forma a garantir que o nível de qualidade do equipamento é compatível com as condições de exploração que será submetido e com as condições contratuais [20].

2.2.3 Procedimentos de Manutenção Preventiva

Os transformadores são ativos com um valor patrimonial muito elevado, e como tal, um defeito nos mesmos pode conduzir a situações com consequências significativas em termos financeiros, técnicos e ambientais. Neste sentido, há a necessidade de realizar ensaios e utilizar métodos de diagnóstico que permitam a monitorização da condição do transformador e planear eventuais ações de manutenção preventiva [20]. Assim, na E-REDES são seguidas duas estratégias de manutenção distintas, Manutenção Preventiva Sistemática (MPS) e Manutenção Preventiva Preditiva (MPP).

2.2.3.1 Procedimentos de Manutenção Preventiva Sistemática

A MPS é um tipo de manutenção no qual os TP são submetidos um conjunto de inspeções e ensaios, efetuados de acordo com as recomendações do fabricante e conhecimento técnico acumulado na E-REDES, realizados segundo prazos pré-estabelecidos.

Esta estratégia consiste essencialmente em três ações: a revisão normal, realizada de 3 em 3 anos, que permite aferir a degradação de alguns componentes do transformador; a revisão do regulador em carga, feita em função das recomendações do fabricante, sendo extremamente importante já que este é dos componentes com maior desgaste do TP; e por fim a análise anual ao óleo do transformador. Para além destes procedimentos de manutenção, a E-REDES realiza ainda outras ações com uma periodicidade semestral. O sistema de ventilação sofre uma revisão e é efetuada uma limpeza dos filtros de ventilação forçada. O sistema de deteção e extinção de incêndio, quando existe, é também verificado regularmente, por questões de segurança [20].

A descrição destes métodos de diagnósticos é realizada, numa forma mais pormenorizada na secção 2.4.

2.2.3.2 Procedimentos de Manutenção Preventiva Preditiva

Esta estratégia de manutenção consiste na projeção da evolução da condição ativo, através da modelação com base em dados recolhidos na sua monitorização, permitindo, assim, prever a ocorrência de eventuais avarias e evitar ações corretivas. A MPP dos TP baseia-se em 4 vertentes [20]:

A primeira prende-se com um projeto de sensoriação denominado TRANSFO, que se encontra instalado em 56 TP da E-REDES, avaliando continuamente o estado do TP e emitindo alertas em *dashboards* dedicados. Após a análise desses avisos, poderão surgir ações de manutenção preventiva preditiva.

A segunda manifesta-se na implementação de testes elétricos a um conjunto limitado de ativos, que apresentem falhas potenciais, tendo por base os resultados da análise DGA periódica do óleo.

A terceira prende-se com o facto da movimentação destes ativos ser um fator crítico, que pode influenciar a sua condição. Deste modo, a realização de testes elétricos permite assegurar a boa condição do transformador ou conhecer a sua condição após o transporte.

A quarta vertente incide na realização de uma ação de MPP, no ano $n+1$, sempre que o Índice de Saúde do ativo no ano n for inferior a 40 %. Esta ação engloba os mesmos parâmetros avaliados na manutenção preventiva sistemática efetuada periodicamente, ou seja, inclui a inspeção visual e os ensaios das proteções próprias e dos disparos associados ao TP e ainda as verificações do funcionamento do comando do comutador de tensão em carga.

2.3 Tipos de Falha de um Transformador de Potência

O transformador, sendo um elemento da rede de distribuição, sofre, inevitavelmente, um envelhecimento e degradação dos seus componentes, e um consequente aumento da taxa de avarias [4]. A evolução típica desta taxa encontra-se representada na figura 2.7, através da chamada curva de banheira.

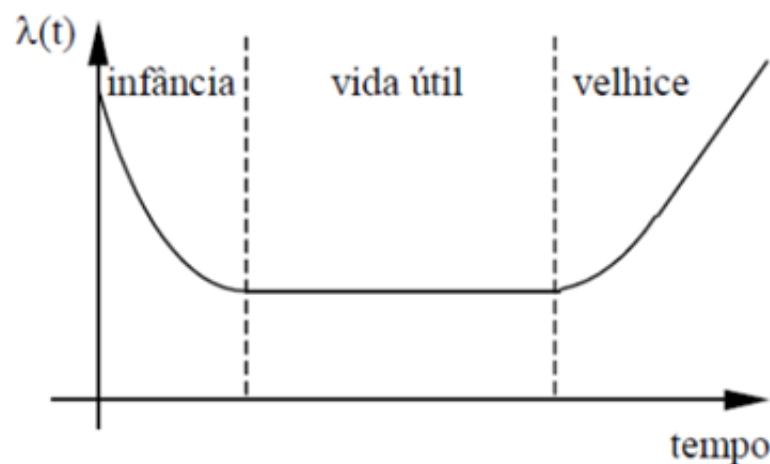


Figura 2.7: Taxa de avarias em função do tempo de serviço do transformador [2]

Como é possível observar a partir do gráfico representado, o tempo de vida de um TP encontra-se tipicamente dividido em três períodos: infância, vida útil e velhice.

No primeiro período pode verificar-se uma taxa de avarias superior à do período normal de funcionamento, que se deve, principalmente a questões relacionadas com defeitos de fabrico, de montagem e de instalação ou ainda situações de degradação do equipamento durante o seu transporte. No tempo de vida útil é quando se verifica uma taxa de avarias menor e constante. Por fim, segue-se o período de velhice, no qual se poderá constatar um aumento acentuado da taxa de avarias, em resultado do desgaste e envelhecimento do TP [21].

O conhecimento das causas que estão na origem dos modos de falha de um transformador é fundamental para que seja possível tomar medidas corretivas que previnam, no futuro, eventuais problemas idênticos [22].

Este estudo é feito recorrendo à análise de vários fatores designadamente, o estado atual dos componentes do TP, condições ambientais e outros fatores externos. Existem ainda situações em que não há registo de falhas, contudo o equipamento em serviço revela indícios de funcionamento anormal, como por exemplo um aumento na concentração de gases no óleo isolante [4].

Nesta secção serão apresentados os principais modos de falha apresentados pelo TP AT/MT, fazendo-se, ainda, uma abordagem aos efeitos resultantes destas falhas. Na figura 2.8 estão expressas a percentagem de falhas associadas a cada componente do transformador.

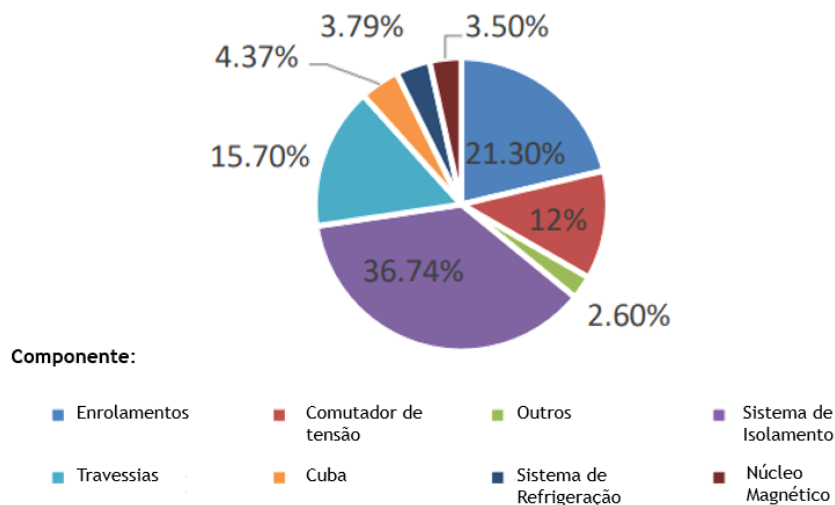


Figura 2.8: Distribuição de falhas por componente do transformador [3]

2.3.1 Falha no Circuito Magnético

Ao nível do circuito magnético podem surgir falhas mecânicas, designadamente o deslocamento das lâminas do núcleo devido a forças eletromagnéticas, em resultado da circulação das correntes de Foucault nas mesmas. Além disso, estas correntes podem causar um sobreaquecimento do núcleo, e, consequentemente, danificar os enrolamentos e o óleo do transformador, que liberta um gás quando aquecido, podendo deteriorar ainda outros componentes do equipamento.

Por fim, as reações químicas entre o óleo envelhecido e as placas de aço podem também causar a corrosão das lâminas do núcleo. [23]

2.3.2 Falha nos Enrolamentos

Uma das principais causas de falha nos transformadores são as condições anormais de funcionamento ao nível dos enrolamentos, em consequência do seu desgaste mecânico, térmico e dielétrico [23]. As falhas dielétricas decorrem da divisão do material de isolamento entre fases, pela presença de valores de corrente e tensão superiores ao nominal. Isto provoca frequentemente pequenos curto-circuitos que levarão inicialmente à queima local dos enrolamentos.

Os enrolamentos são normalmente constituídos por cobre, que pode apresentar perdas térmicas. Estas originam pontos quentes neste componente, podendo causar, ao longo do tempo, o desgaste ou, em casos extremos, a rutura total do enrolamento.

As falhas mecânicas têm origem em situações como a reparação incorreta, manutenção desadequada, corrosão, fabrico, vibração, curto-circuitos e movimento mecânico no interior do transformador. Estas manifestam-se através da distorção, afrouxamento ou deslocamento do enrolamento, resultando numa diminuição do desempenho do ativo [23].

2.3.3 Falha na Cuba

As falhas na cuba decorrem, essencialmente, de situações resultantes do desgaste ambiental, nomeadamente, meio corrosivo, elevada humidade e radiação solar. Estas falhas resultam em fugas e fendas nas paredes da cuba, que levam ao derrame do óleo isolante e consequente diminuição do seu nível, afetando assim o sistema de isolamento. A perda de óleo causa ainda um sobreaquecimento no transformador, o que pode danificar os seus componentes [24].

2.3.4 Falha do Sistema de Isolamento

Como já foi referido anteriormente, o sistema de isolamento é constituído por materiais isolantes sólidos e líquidos. As condições anormais de funcionamento que surgem no papel kraft resultam da degradação da celulose, que pode ocorrer por três processos: pirólise, hidrólise e oxidação [25]. A presença de água no óleo isolante (hidrólise) constitui o principal fator de degradação do papel isolante. O envelhecimento do isolante sólido conduz a perda ao nível das suas propriedades dielétricas e mecânicas.

Já as falhas associadas ao óleo isolante estão relacionadas com a sua degradação gradual, que resulta numa perda da qualidade do fluido, afetando assim as suas propriedades isolantes e o seu arrefecimento. Com o seu envelhecimento surgem na sua constituição partículas como a água e depósitos, que tornam o óleo mais viscoso, dificultando a sua circulação. A presença de água pode ainda causar curto-circuitos [26].

2.3.5 Falha do Sistema de Refrigeração

A ocorrência de uma falha no sistema de refrigeração dificulta a dissipação do calor do interior do transformador para o meio ambiente, o que pode afetar vários componentes do equipamento. Uma das principais origens da falha deste sistema é a presença de fendas nos tubos de óleo/água, resultantes da corrosão, humidade e radiação solar, que provocam uma diminuição da troca de calor. A avaria nos ventiladores de arrefecimento e o mau funcionamento dos termóstatos que medem o calor do transformador, estão também na origem das falhas no sistema de refrigeração [16].

2.3.6 Falha nas Travessias

A principal causa de falha nas travessias é o seu envelhecimento, que levará ao sobreaquecimento do componente. Esta falha reflete-se no aparecimento de descargas parciais, que provocam o aparecimento de arcos elétricos no interior deste componente, levando à libertação de gases que podem causar, em casos extremos, a sua explosão.

Além disso, a degradação das travessias pode causar a alteração das suas propriedades dielétricas, afetando a estanquicidade do componente. Esta diminuição da sua capacidade estanque pode levar à intrusão de água, perdas de óleo e contaminação dos isolantes [4].

2.3.7 Falha no Regulador de tensão

A falta de manutenção deste equipamento é uma das principais causas de falhas do regulador, uma vez que pode provocar a dessincronização entre o seletor e o comutador, fazendo com que o regulador não esteja na posição correta. Além disso, a presença de condensadores antigos no motor pode levar a uma perda de controlo na direção do movimento do regulador ou até mesmo a sua paragem, impedindo a variação do rácio e espiras. Ao longo do tempo, as molas dos comutadores vão também perdendo elasticidade, e em caso de quebra não será possível alterar o rácio do número de espiras do regulador.

Por fim, o uso frequente do regulador pode levar ao seu desgaste, provocando, em algumas situações, o aparecimento de um arco elétrico, levando à libertação de gases que podem contaminar o óleo isolante [23].

2.3.8 Falha nas Proteções Próprias

A monitorização do funcionamento do transformador é realizada recorrendo a acessórios de controlo e proteções próprias, que ajudam na minimização de falhas graves. Este tipo de falhas pode estar associado a uma medição incorreta da temperatura, feita pelos termómetros do óleo isolante e dos enrolamentos, provocando assim intervenções desnecessárias no equipamento. Além disso, acumulação de gases no relé de Buchholz, leva ao seu sobreaquecimento, reduzindo a sua sensibilidade na deteção de falhas dielétricas. A ocorrência de uma falha na válvula de sobrepressão, reduz a capacidade deste componente reduzir a pressão rapidamente [23].

2.4 Metodologias de Diagnóstico dos TP

O transformador é um dos ativos mais importantes e valiosos da rede de distribuição, pelo que qualquer falha, avaria ou o seu mau funcionamento afetará a sua vida restante, resultando em perdas económicas para o sistema [3]. Assim, é extremamente importante identificar as falhas potenciais o mais cedo possível, antes que estas se tornem falhas funcionais que coloquem o transformador fora de serviço. Neste sentido, é fundamental avaliar o desempenho do transformador recorrendo a métodos de diagnóstico que permitem acompanhar o seu estado de funcionamento.

A complexidade intrínseca das estruturas dos transformadores obriga a que vários conjuntos de dados e indicadores de condição sejam adotados, para permitir que avaliação seja efetuada de diversos ângulos [5].

Nesta secção serão discutidas as técnicas de monitorização mais utilizadas no diagnóstico dos TP. No entanto, há que ter presente que existe uma grande variedade de métodos e técnicas que permitem avaliar a condição deste equipamento.

Na figura 2.9 apresenta-se um esquema dos métodos de diagnóstico importantes para a avaliação da condição do transformador.

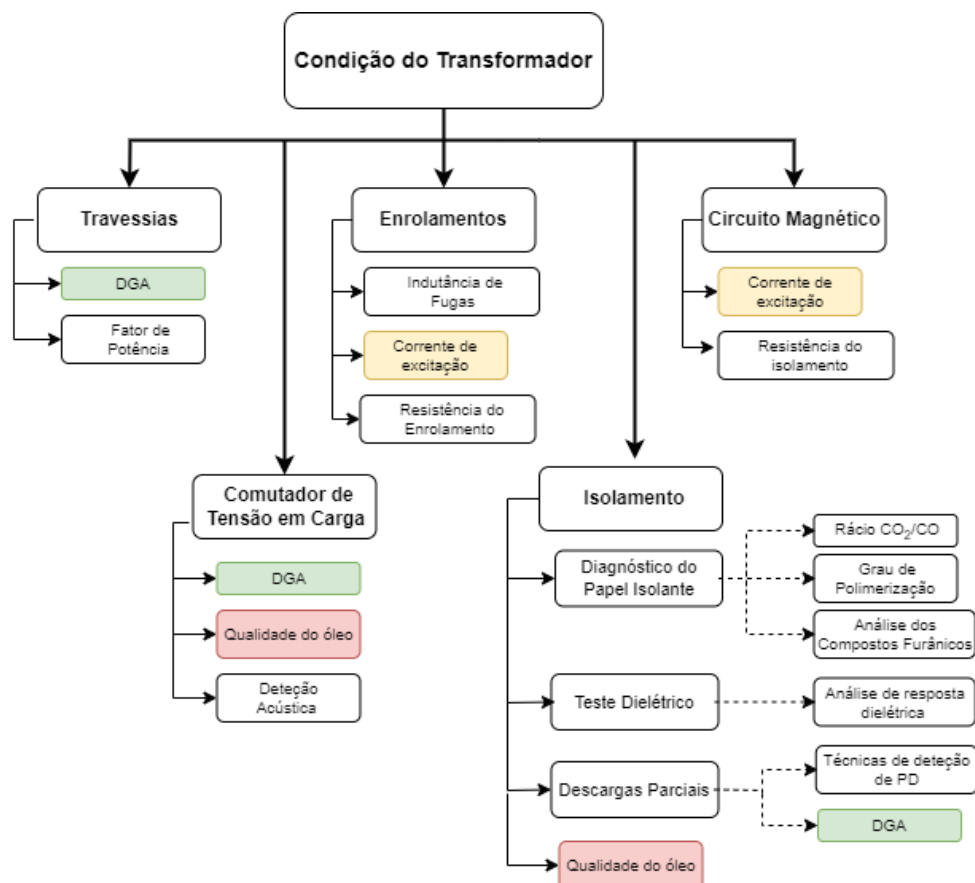


Figura 2.9: Técnicas de monitorização usadas no diagnóstico dos TP

2.4.1 Diagnóstico do Óleo Isolante

O aparecimento de gases no interior de um transformador pode ser provocado, pelo envelhecimento gradual do óleo e papel isolante e por defeitos de natureza térmica ou elétrica.

O fluido isolante utilizado nos TP é habitualmente constituído por moléculas de hidrocarbonetos, pelo que a sua degradação se traduz na alteração da estrutura destas moléculas, em resultado de reações de decomposição (quebra de ligações C-C), de desidrogenação (quebra de ligações C-H) e de síntese. A combinação dos fragmentos iónicos ou radicais leva à formação de gases como o Hidrogénio(H_2), Metano(CH_4), Etano(C_2H_6), Etileno(C_2H_4) e o Acetileno(C_2H_2).

A natureza dos gases e a sua proporção na mistura gasosa são variáveis e dependem da temperatura do defeito [27] [28]. Esta relação encontra-se representada na figura 2.10.

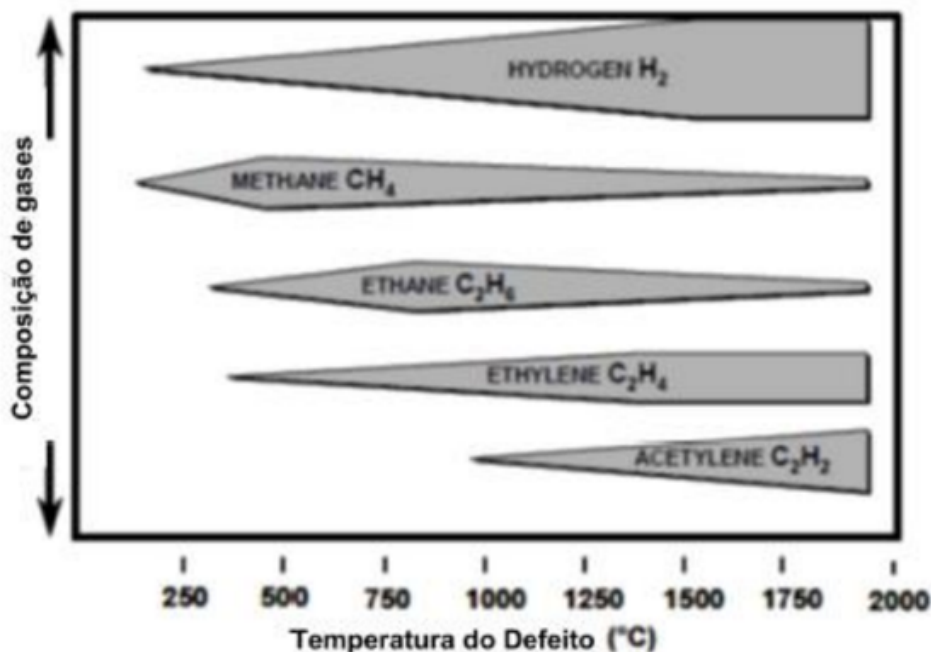


Figura 2.10: Formação de Gases em Função da temperatura [4]

Em virtude das dimensões do transformador, é possível retirar amostras de fluido isolante, na zona inferior do TP, com o mesmo em serviço e garantindo condições de segurança. A amostra de pequeno volume de óleo é encaminhada para um laboratório onde se procedem às análises físico-químicas e dielétricas. Em alternativa, poder-se-á recorrer a sistemas de monitorização de DGA [4] [28].

Na tabela 2.2, apresentam-se os defeitos que advém da presença de cada gás dissolvido no óleo.

Tabela 2.2: Diagnóstico dos defeitos a partir da análise dos gases dissolvidos no óleo

Gás	Defeito associado
Hidrogénio (H_2), <i>Metano</i> (CH_4)	Descargas parciais no óleo isolante
Etileno (C_2H_4), <i>Etano</i> (C_2H_6)	Defeito térmico (sobreaquecimento)
Acetileno (C_2H_2)	Arcos elétricos
Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono(CO_2)	Defeito térmico no papel isolante (sobreaquecimento da celulose)

2.4.1.1 DGA (*Dissolved Gas Analysis*)

O DGA é um método que permite avaliar continuamente a condição de funcionamento do transformador, através da identificação de potenciais falhas e causas para a formação de gases no óleo isolante, resultantes da degradação dos componentes do transformador [5] [7]. Com base nesta análise é possível distinguir falhas internas, tais como, arcos elétricos, descargas parciais, sobreaquecimento do sistema isolante, sobrecargas severas [29]. Este método pode ser executado em 3 passos: o primeiro consiste na extração de uma amostra de óleo, a partir da qual se extraem os gases presentes neste fluido, que são posteriormente identificados através de uma análise cromatográfica. De seguida, verifica-se se há evidência de falha no TP, através da análise da concentração dos gases. Por fim, procede-se à determinação dos tipos de falha e a sua localização no transformador [3].

Esta última etapa pode ser realizada recorrendo a vários métodos, descritos de seguida:

- **Key Method**

Este método faz o diagnóstico de potenciais falhas com base na proporção de cada gás no óleo isolante. Dependendo da sua concentração relativa, podem-se distinguir diferentes condições de falha padrão, designadamente, a tensão térmica no sistema de isolamento, as descargas parciais e arcos elétricos.

O facto de não existirem limites bem definidos na aplicabilidade deste método, pode comprometer a exatidão na interpretação das falhas [5]. Assim, a precisão deste método está muitas vezes dependente da experiência que o perito encarregue pela análise possui para fazer a correlação entre as concentrações dos gases e as falhas que lhes estão associadas [7]. A tabela 2.3 expressa a relação entre os gases presentes no óleo e o tipo de falhas.

Tabela 2.3: Diagnóstico das falhas consoante presença dos vários gases, aplicado o *Key Method* [7]

Gás	Tipo de Falha
H_2, C_2H_2	Elétrica de alta energia (arco elétrico)
H_2	Elétrica de baixa energia (descarga parcial)
C_2H_4	Térmica (no óleo)
CO	Térmica (no óleo e na celulose)
H_2	Eletrólise

• **Método do Rácio de Doernenburg**

Este método consiste na determinação do rácio dos seguintes gases: CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_2/CH_4 , C_2H_6/C_2H_2 . A partir daí é possível efetuar o diagnóstico de 3 tipos de falha: decomposição térmica, descargas parciais de baixa intensidade e descargas parciais de alta intensidade (arcos elétricos) [7]. O diagnóstico das falhas realiza-se com base em intervalos pré-determinados dos 4 índices referidos, sendo que esta abrangência é apenas considerada válida se pelo menos a concentração de um dos gases principais for o dobro das concentrações limite, expressas na tabela 2.4 [30] [5]. A tabela 2.5 apresenta o diagnóstico das falhas associadas aos diferentes rácios de gás.

Tabela 2.4: Limite de Concentração de Gases Dissolvidos

Gás	Concentração [ppm]
Hidrogénio(H_2)	100
Metano (CH_4)	120
Etileno (C_2H_4)	50
Etano (C_2H_6)	65
Acetileno (C_2H_2)	35
Monóxido de Carbono (CO)	350

Tabela 2.5: Rácios de gás para o método de *Doernenburg* [7]

R1 (CH_4/H_2)	R2 (C_2H_2/C_2H_4)	R3 (C_2H_2/CH_4)	R4 (C_2H_6/C_2H_2)	Diagnóstico de Falha Associado
0.1 - 1.1	0.75	0.3 - 1.0	0.2 - 0.4	decomposição térmica
0.01 - 0.1	sem significado	0.1 - 0.3	0.2 - 0.4	descarga parcial de baixa intensidade
0.01 - 0.1	0.75 - 1.0	0.1 - 0.03	0.2 - 0.4	descarga parcial de alta intensidade (arco elétrico)

• Método do Rogers

Sendo uma técnica melhorada do método descrito anteriormente, a sua validação não está dependente de determinados níveis de concentração de gás. Esta técnica consiste na interpretação de quatro rácios, C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_6/CH_4 , CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , sendo os dois últimos retirados do método de *Doernenburg* [3]. Com base na interpretação dos valores destas quatro relações e no intervalo pré-determinado na qual se inserem, poderão ser definidos 12 tipos de falha. No entanto, algumas investigações revelaram que a proporção de C_2H_6/CH_4 é insignificante, pelo que apenas 6 falhas podem ser detetadas recorrendo a este método [5].

A produção de gases, ao longo da vida do transformador, sem a ocorrência de qualquer falha, poderá levar à deteção incorreta de uma falha, sendo esta uma das maiores limitações deste método [9]. A tabela 2.6 estabelece a relação entre os rácios e o diagnóstico de falhas associado, aplicando o método de *Rogers*.

Tabela 2.6: Rácios aplicando o método de Rogers e respetivas falhas associadas [7]

Caso	R2 (C_2H_2/C_2H_4)	R2 (CH_4/H_2)	R5 (C_2H_4/C_2H_6)	Diagnóstico de Falha Associado
0	0.1	0.1 - 1.1	1.0	unidade normal
1	0.1	0.1 a 1.0	1.0	arco de baixa densidade energética
2	0.1 - 3.0	0.1 - 1.0	3.0	arco descarga de alta energia
3	0.1	0.1 a 1.0	1.0 a 3.0	baixa temperatura térmica
4	0.1	1.0	1.0 a 3.0	falha térmica 700 °C
5	0.1	1.0	3.0	falha térmica 700 °C

• Método da Relação IEC

À semelhança do método de Rogers, esta técnica consiste na interpretação de três rácios $R1(CH_4/H_2)$, $R2(C_2H_2/C_2H_4)$, $R3(C_2H_4/C_2H_6)$, a partir dos quais é possível determinar 9 tipos de falha. Este método, visa a deteção de falhas que possam reduzir a vida funcional do ativo e para as quais devem ser tomadas medidas de emergências, nomeadamente, falhas térmicas, descargas parciais e envelhecimento normal [5]. O rácio C_2H_6/CH_4 é excluído, uma vez que apenas indica uma gama limitada de temperatura de decomposição [3].

Foram ainda realizadas algumas melhorias relativamente à versão inicial, tais como, a representação gráfica dos rácios. Desta forma, é possível identificar as falhas quando as proporções dos gases estão fora dos limites pré-determinados [31].

• Método do Triângulo de Duval

O método o triângulo Duval interpreta os gases dissolvidos a partir de um triângulo com as suas percentagens relativas dos gases CH_4 (Metano), C_2H_2 (Acetileno), C_2H_4 (Etileno), calculadas através do quociente entre a concentração de cada gás e a total, expressas nas equações 2.1, 2.2, 2.3 [7]. No triângulo apresentado na figura 2.11, cada região está associada a um tipo de falha, sendo possível realizar o diagnóstico de 6 anomalias [3] [7].

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (2.1)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (2.2)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (2.3)$$

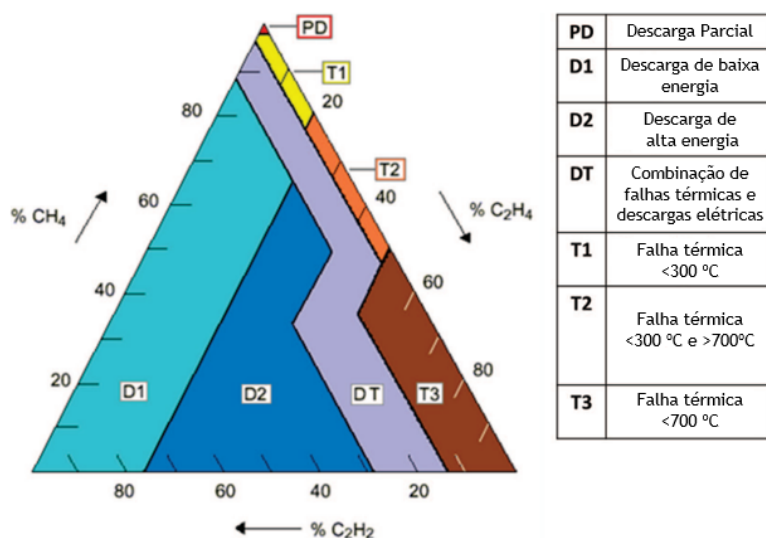


Figura 2.11: Triângulo de Duval [5]

2.4.1.2 Qualidade do Óleo

Para além do método referido anteriormente, existem ainda outros ensaios físico-químicos e dielétricos aplicados ao óleo, que permitem verificar a sua qualidade.

- O **ensaio da tensão disruptiva** avalia a capacidade dielétrica do óleo em suportar tensões elétricas, através da imersão de dois elétrodos no óleo distanciados entre si. De seguida, vão se aplicando diferentes níveis de tensão alternada até que se verifique a disrupção do intervalo [15].
- O **ensaio de tensão interfacial** determina a força necessária para puxar um pequeno anel ao longo da interface óleo-água. Este permite detetar a presença de contaminantes polares resultantes do envelhecimento do óleo [24].
- A **determinação do teor de água presente no fluido isolante** é um dos testes mais importantes a realizar, já que a sua presença acelera o processo de degradação do sistema de isolamento do TP [24].
- O **ensaio à acidez** permite determinar o nível de oxidação do óleo, com a deteção da presença de ácidos diluídos no mesmo. O índice de acidez expressa-se em quantidade de Hidróxido de Potássio (KOH) necessária para neutralizar 1g de óleo (mg KOH /g óleo) [4].
- A avaliação ao **fator de dissipação do óleo** é realizada através da medição do ângulo de perdas ($\tan(\delta)$), que fornece uma indicação da corrente parasita que circula no óleo [15].
- No **ensaio à cor e aspeto do óleo** faz-se uma comparação de uma amostra do fluido com padrões de cor normalizados, atribuindo-se um valor de uma escala de 0 a 8. Os valores mais elevados estão associados a óleos com uma contaminação considerável, sendo o fluido escuro e turvo [15].

2.4.2 Diagnóstico do Papel Isolante

Ao longo do tempo, o isolamento sólido, constituído essencialmente por celulose, sofre um processo de degradação, em resultado decomposição da cadeia de polímeros, que liberta, designadamente, água, ácidos e gases (CO_2 e CO), no óleo isolante. O papel acaba por se degradar a tal ponto que perde toda a sua resistência mecânica, o que põe em risco a integridade eléctrica do equipamento. Neste sentido, são aplicadas técnicas de diagnóstico que permitem avaliar a condição do papel isolante, nas quais são analisados os sub-produtos produzidos em consequência da sua degradação [32] [9].

- **Rácio CO_2/CO**

Este método permite aferir a degradação térmica da celulose, em resultado do seu sobreaquecimento e de um problema no sistema de arrefecimento do TP. No entanto, a decomposição do óleo pode também produzir estes gases(CO_2, CO), devido a diferentes falhas.

Assim, através da análise do rácio CO_2/CO não é possível distinguir as fontes de falha, e pode até acontecer a identificação de um diagnóstico incorreto.

A fim de ultrapassar esta limitação, são recomendados outros métodos adicionais, nomeadamente a análise furânica e o grau de polimerização [9].

• Grau de Polimerização

O grau de polimerização é um fator a partir do qual é possível avaliar a saúde do isolamento sólido. O papel isolante dos transformadores é composto por moléculas de monómero de glicose ($C_6H_{12}O_6$) ligadas entre si para formar a celulose, representada na figura 2.12. Com o envelhecimento do isolamento, os anéis de glicose tornam-se frágeis e começam a quebrar-se. Este método consiste na recolha de amostras de papel dos enrolamentos, a partir das quais é medido o comprimento dos anéis das moléculas de glucose, de forma a estimar a integridade do isolante [9] [6].

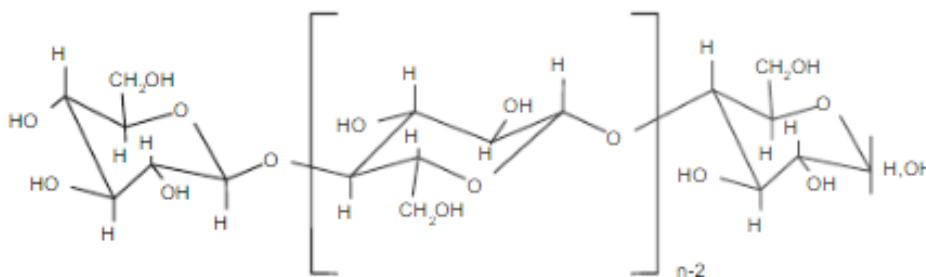


Figura 2.12: Estrutura Molecular da Celulose [6]

A equação de *Arrhenius* (2.4), que estabelece a ligação entre a temperatura e o grau de polimerização num dado instante [33], permite estimar o valor do DP num dado instante após a sua medição inicial [15].

$$DP(t) = \frac{DP(t_0)}{1 + DP(t_0) \times \int_{t_0}^t k(\tau) d\tau} \quad (2.4)$$

,onde $DP(t)$, $DP(t_0)$ correspondem ao grau de polimerização nos instantes t e inicial (t_0), respetivamente e $k(t)$ a taxa de reação, dependente o tempo.

A taxa de reação (envelhecimento) é dada pela equação 2.5, onde A é uma constante de processo (dependente do teor de água, acidez e oxigénio), E_a é a energia de ativação da reação (em J/mol), R_g é a constante universal do gás ($8,314 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura em Kelvin [33].

$$k(t) = A \times \exp \frac{-E_a}{R_g \times T(t)} \quad (2.5)$$

• Análise dos Compostos Furânicos

O diagnóstico do papel isolante pode ser realizado, de uma forma indireta, através de uma análise dos compostos furânicos dissolvidos no óleo, que resultam do processo de deterioração do papel, resultado da humidade, sobreaquecimento e oxidação. Este método, que recorre à Cromatografia Líquida de Alta Pressão e Alta Resolução (HPLC), permite averiguar o grau de polimerização da celulose (componente principal do isolante sólido), mas de um modo indireto. Podem-se formar cinco compostos furânicos: 2-Furfural (2FAL), o 2-Acetilfurano (2ACF), 5-Hidroximetil-2-Furfural (5HMF), 5-Metil-2-Furfural (5MEF) e o Álcool Furfurílico (2FOL), sendo o primeiro o mais abundante no fluido isolante, pelo que a sua concentração é utilizada como variável no cálculo do grau de polimerização [4].

Existem vários métodos que relacionam os compostos furânicos presentes no óleo com o grau de polimerização, salientando-se os quatro métodos apresentados nas equações 2.6 - 2.9 [32].

A tabela 2.7 apresenta a condição de saúde do isolamento em função da concentração do componente 2-FAL(ppm) e do valor de DP.

$$\text{Chendong : DP} = \frac{1.51 - \log_{10}(F)}{0.0035} \quad (2.6)$$

$$\text{Scholnick : DP} = \frac{1.11 - \log_{10}(F)}{0.00288} \quad (2.7)$$

$$\text{Pahlavanpour : DP} = \frac{800}{0.186 \times F + 1} \quad (2.8)$$

$$\text{De Pablo : DP} = \frac{7100}{8.88 + F} \quad (2.9)$$

,sendo F a concentração em ppm do composto furâncio 2-Furfural (2FAL).

Tabela 2.7: Correlação da concentração do composto 2-FAL e valor do DP com a condição do isolamento [9]

2-FAL (ppm)	Valor de DP	Condição do Isolamento
0 - 0.1	700 - 1200	Boa condição
0.1 - 1	450 - 700	Deterioração Moderada
1 - 10	250 - 450	Deterioração Extensa
≥ 10	≤ 250	Final de vida

Uma das principais vantagens da medição do DP a partir dos compostos furânicos é facto de não exigir a retirada do transformador de serviço (não intrusivo), o que torna este método relativamente simples de efetuar. No entanto, a contaminação do óleo isolante e o envelhecimento não uniforme do papel isolante são fatores limitantes para a aplicação desta técnica [6].

2.4.3 Resistência do Isolamento e Índice de Polarização

O teste à resistência de isolamento é utilizado para determinar a corrente de fugas neste componente do TP, que depende de uma variabilidade de fatores no momento da medição, tais como, a temperatura, humidade e o nível impurezas presentes nos materiais do isolamento. A medição da resistência fornece informação acerca do estado global do sistema de isolamento [21]

A medição do índice de polarização é um dos métodos mais comuns para avaliar a humidade e limpeza do isolamento sólido dos enrolamentos. Este índice determina a relação entre as resistências do isolamento medidas 10 minutos e 1 minuto após a aplicação da tensão do ensaio, respetivamente [34]. O aumento da humidade e impureza do isolamento provocam uma diminuição gradual deste índice, o que pode indiciar problemas no sistema de isolamento. A tabela 2.8 apresenta os estados do isolamento associados às diferentes gamas do índice de polarização [34]. Embora seja rápido e conveniente quando comparado a outras técnicas, este método não permite a deteção da degradação do isolamento devido ao envelhecimento e tensões ao longo do tempo [7].

Tabela 2.8: Estado do isolamento associado às diferentes gamas do IP

Índice de Polarização	Estado do Isolamento
1.5 - 2	isolamento seco
1 - 1.5	isolamento com impurezas/húmido
<1	isolamento severamente poluído e húmido

2.4.4 Corrente de Excitação

A medição da corrente de excitação é utilizado para detetar falhas no circuito magnético e nos enrolamentos do transformador, nomeadamente, curvas em curto-circuito, desclassificações do núcleo, problemas com o comutador de tensão em carga. Geralmente, os resultados deste teste são analisados comparando as correntes entre as três fases do TP trifásico, ou, comparando a corrente com uma referência obtida em testes efetuados anteriormente (no caso dos TP monofásicos) [7][21].

2.4.5 Indutância de Fugas

Este método tradicional, tem sido utilizado na detecção de deformações mecânicas ao nível dos enrolamento e do núcleo magnético dos TP, em resultado de um curto-circuito [7]. Este fenómeno provoca, tendencialmente, uma diminuição do diâmetro do enrolamento interior e um aumento do diâmetro do enrolamento exterior. Estas deformações alteram o fluxo de fugas entre os enrolamentos e consequentemente a reactância de fugas. Alguns fatores que afetam este teste são o nível de tensão aplicado na sua realização, o tipo de ligações e de núcleo do TP, a precisão do equipamento usado na medição e a influência do tipo de reactância de magnetização [21].

2.4.6 Descargas Parciais

As descargas parciais consistem em descargas dielétricas locais no sistema de isolamento, em consequência de uma elevada intensidade do campo elétrico. Durante esta disrupção podem-se verificar diversos fenómenos como a emissão eletromagnética (sob a forma de ondas de rádio, luz e calor) e acústica (em faixas audíveis e ultra-sónicas), formação de ozono e a libertação de gases [7]. Tendo em conta que este fenómeno pode comprometer as propriedades dielétricas do isolamento e até mesmo indiciar a sua avaria total, é extremamente importante desenvolver medidas que permitam o seu diagnóstico [5]. Deste modo, através da utilização de diferentes técnicas de medição, tais como, elétricas, químicas, acústicas e óticas, é possível localizar e detetar estas descargas [7].

- **Deteção Química**

Este é um dos métodos mais simples, capaz de detetar descargas parciais através da observação de alterações químicas na composição dos materiais isolantes, baseia-se na recolha e medição de amostras de gás e óleo. A medição da DP pode ser realizada recorrendo a dois métodos: o DGA, que se baseia na recolha de uma amostra de óleo, a partir do qual se determina a concentração de gases, que é analisada pelo Triângulo de Duval; o HPLC, que consiste na avaliação da estabilidade química dos produtos, como a glucose, durante a falha do isolamento. As duas técnicas não são capazes de identificar a origem da descarga [7].

- **Deteção Elétrica**

Baseado na detecção de impulsos elétricos de alta frequência produzidos pelo vazio em resultado de um stress elétrico elevado, este método pode ser efetuado em regime *online* ou *offline*. No modo *offline*, um condensador de acoplamento, com um valor conhecido, é ligado em série com a impedância de deteção conectada através do objeto de teste. Este circuito, é posteriormente energizado a partir de uma fonte alternada de alta tensão. Já no modo *online*, a camada interior da travessia é usada como um condensador e uma bobina é ligada à terra através da camada exterior da travessia a ser ligada à terra. O circuito genérico para a medição de descargas parciais encontra-se representado na figura 2.13.

Caso se verifique uma descarga parcial, o vazio comporta-se como condensador e a sua tensão irá aumentar continuamente até ao momento da descarga [7].

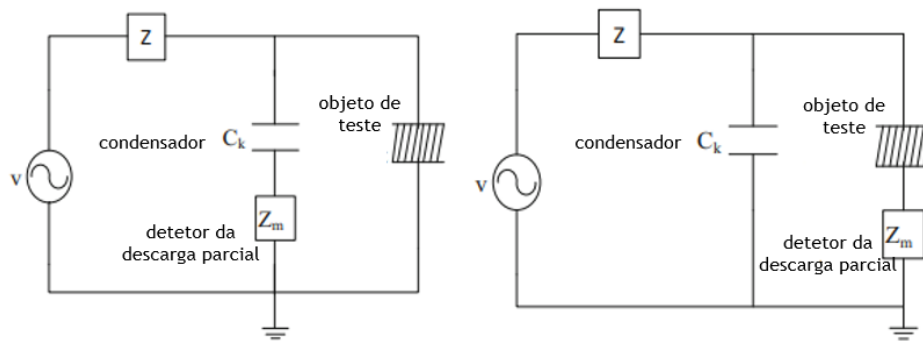


Figura 2.13: Circuito genérico utilizado na identificação de descargas parciais [7]

- **Deteção Acústica**

Este método permite a deteção e localização do ponto onde ocorreu a descarga, através da medição da amplitude e atraso da fase do sinal acústico por ela produzido. Para detetar o sinal produzido são colocados vários sensores (como microfones, acelerómetros, sensores de resistências sonora e fibra, sensores acústicos ópticos) espalhados pela parte exterior da cuba do transformador. A deteção da origem da PD e a gravidade do defeito causado no isolamento são avaliadas através da triangulação dos tempos de viagem a que o sinal chega aos múltiplos sensores. A complexidade de medição e o extenso processamento de dados são fatores limitativos deste método [7]. Além disso, outros fatores de interferência causados pela estrutura interna do transformador como a refração, reflexão e difração do sinal, podem causar erros nos dados obtidos, o que põe em causa a precisão deste método [35].

- **Deteção recorrendo a Ultra-Alta-Frequência (UHF)**

Esta técnica de monitorização contínua de descargas parciais no TP, é capaz de detetar e localizar este fenómeno, através a medição da ressonância elétrica entre as gamas de frequência 100 MHz e 2GHz. Neste sentido, são colocados vários sensores equipados com antenas de banda larga de alta sensibilidade são instalados no interior da cuba do TP. Aplicando métodos de triangulação aos dados medidos, amplitude e tempos de viagem do sinal, é possível detetar e localizar a origem da descarga [7].

- **Deteção ótica**

A detecção ótica constitui uma das mais recentes tecnologias utilizadas na identificação e localização de descargas parciais em transformadores. Durante a DP, devido aos vários processos de ionização excitação e recombinação são irradiados espectros de luz, designadamente, ultravioleta, visível e infravermelhos, que contêm informação sobre o nível de energia da descarga. Para medir estes níveis de energia são utilizados sensores de fibra-ótica que se encontram imersos no óleo isolante o TP. A partir desta informação é possível detetar e saber a origem do fenómeno [7].

- **Instalação de transformador de corrente de alta frequência (HFCT)**

Este método de monitorização online consiste na utilização de um sensor de acoplamento indutivo como um transformador de corrente de alta frequência, ligado no lado BT, ao lado da travessia, diretamente à terra. Se ocorrer uma descarga, será gerado um impulso eletromagnético de alta frequência, que será captado pelo HFCT. Algumas limitações desta técnica são a suscetibilidade ao ruído, a reduzida magnitude do sinal detetado e a baixa sensibilidade [7].

- **Análise da função de transferência**

Esta técnica utiliza a função de transferência de alta frequência dos enrolamentos do TP para detetar e localizar a descarga parcial. Quando este fenómeno ocorre ao longo dos enrolamentos num local desconhecido, um sinal propagar-se-á pelas travessias e terminais neutros, sofrendo distorção durante esse percurso. Sabendo a função de transferência da secção do enrolamento, calcula-se a forma de um sinal PD em múltiplos pontos do enrolamento desde a travessia até ao terminal neutro. Através da comparação dos sinais calculados com as observações práticas é possível detetar a origem da PD.

Uma das limitações deste método é a sua vulnerabilidade a ruído [7].

2.4.7 Análise da resposta dielétrica

Esta análise é utilizada para avaliar o teor de água presente nos isolamentos sólido e líquido, produzido devido a reações químicas. A taxa de produção de humidade é afetada por vários fatores, nomeadamente pelo teor de oxigénio, temperatura ambiente, gases e ácidos orgânicos. Existem vários métodos que permitem determinar o teor de humidade e o seu impacto na resposta dielétrica, de modo a avaliar o envelhecimento do isolamento. Alguns desses não destrutivos são a medição das correntes de polarização e despolarização, a medição da tensão de recuperação e a resposta dielétrica de frequência:

A medição das correntes de polarização e despolarização é usada para medir a condutividade do fluído isolante, bem como o teor de água presente nos isolamentos e componentes do transformador, a partir dos quais é também possível avaliar a condição do isolamento sólido e líquido (papel e óleo). Para avaliar o estado de envelhecimento do isolamento, é aplicada uma tensão em todo o óleo-papel, durante um dado período de tempo, e procede-se à medição da corrente de polarização nesse intervalo [7].

A medição da tensão de recuperação é realizada recorrendo a uma fonte de tensão DC, que carrega eletricamente a estrutura dielétrica do isolante, e criando, de seguida, um curto-circuito através de uma impedância externa [7][15]. O sinal de tensão obtido quando a impedância de descarga é removida permite caracterizar a condição do sistema de isolamento [21].

A necessidade de colocar o transformador fora de serviço e a dificuldade na interpretação dos resultados constituem duas das principais limitações destes métodos [21].

2.4.8 Termografia

Esta atividade permite a detecção e quantificação de eventuais sobreaquecimentos nos vários componentes do equipamento, que se devem a vários fatores, como por exemplo, uma deficiente ligação nos terminais das travessias, um bloqueio do circuito de refrigeração e fugas de óleo[16]. As elevadas temperaturas no transformador contribuem para um aumento da taxa de envelhecimento do isolamento.

Para identificar as falhas, a radiação infravermelha da superfície alvo é convertida em imagens padrão codificadas por cores, sendo as áreas com as cores branco e vermelho associadas aos pontos mais quentes e as áreas pretas e azuis correspondentes às zonas mais frias [10]. O resultado do teste pode ser verificado comparando com registos anteriores ou com um teste DGA efetuado aos TP em questão [7]. Embora possa ser utilizado como um método inicial para a detecção de falhas, não é capaz de aferir a temperatura interna da cuba do transformador.

A classificação de severidade do aquecimento baseada na termografia encontra-se resumida na tabela 2.9, na qual o aumento de temperatura é definido como sendo a diferença entre um ponto de referência do transformador com temperatura normal (65-100°C) e o ponto de maior temperatura [7]

Tabela 2.9: Classificação da severidade do aumento de temperatura[10]

Aumento de Temperatura °C	Classificação
0 - 9	atenção
10 - 20	intermédio
21 - 49	sério
50	crítico

2.4.9 Inspeção Visual

Esta atividade traduz-se numa análise exterior ao transformador, no qual são analisadas questões físicas dos componentes, no sentido de identificar eventuais defeitos. Nas inspeções visuais é possível avaliar a condição da cuba através da detecção de fugas de óleo e corrosão. Além disso, analisa-se a condição das travessias, através da detecção de eventuais fissuras e o funcionamento do sistema de refrigeração, por exemplo com a análise da condição das pás dos ventiladores.

Esta inspeção é ainda aplicada ao comutador em carga, efetuando-se a avaliação ao armário de comando deste componente, e a verificação da presença de vestígios de desgaste e possíveis fugas de óleo [4].

2.4.10 Análise da Resposta em Frequência

A análise da resposta em frequência permite a detecção de eventuais movimentos e deformações nos enrolamentos, em resultado da sua exposição a tensões mecânicas muito elevadas. Estas deformações geralmente conduzem a mudanças no comportamento eletromagnético interno, que podem ser distinguidas através da análise da resposta em frequência. A extensão dos danos nos enrolamentos é avaliada através da sua comparação com uma referência previamente obtida [15] [5].

Uma das limitações deste método é o facto de só poder ser aplicado com o transformador fora de serviço.

2.4.11 Análise das Vibrações

As vibrações do transformador provêm do núcleo, induzidas pela mudança de forma do material ferromagnético devido à alteração do campo magnético, dos enrolamentos, pela ação de forças eletromagnéticas e do comutador de tensão em carga [5] [36]. Essas vibrações propagam-se, através do óleo do isolante, até à cuba do TP, onde podem ser detetadas por vários sensores de vibração. Os sinais obtidos por estes sensores permitem aferir a condição do núcleo magnético do equipamento [5]. Além disso, a monitorização de vibrações é uma técnica eficaz que pode ser usada para avaliar a condição do comutador de tensão em carga de forma não invasiva [37].

2.4.12 Fator de Potência

O fator de potência tem como objetivo avaliar a condição do transformador e das travessias, sendo este teste realizado com o transformador fora de serviço. Geralmente, é recomendado para a detecção de humidade e outras impurezas presentes nas travessias, nos enrolamentos e no fluído isolante do TP. Na figura 2.14 apresenta-se o circuito genérico para o cálculo do fator de potência. O fator de potência é interpretado matematicamente como o quociente entre a corrente da componente resistiva e a total, representado na expressão 2.10. A tabela 2.10 fornece o estado do isolamento consoante o fator de potência [3].

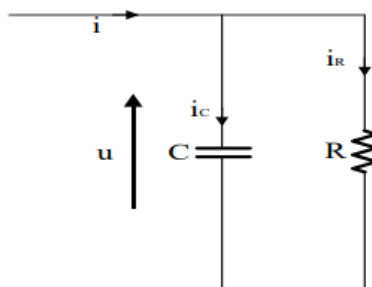


Figura 2.14: Circuito genérico para o cálculo do FP [3]

$$\cos\theta = \frac{i_R}{i} \quad (2.10)$$

Tabela 2.10: Condição do isolamento consoante o fator de potência [3]

Fator de Potência	Condição do Isolamento
1%	Boa
1-2%	Questionável
2%	Necessita de intervenção

2.4.13 Resistência do Enrolamento

Sabendo que a temperatura faz variar a resistência do enrolamento, é possível aferir, através destes dados, qual a temperatura média dos enrolamentos. Qualquer alteração no valor da resistência relativamente à informação presente na chapa de características pode indicar a presença de um curto circuito ou de uma fissura no enrolamento. Além disso, uma má ligação no comutador de tensão pode também inferir uma alteração nestes valores de resistência. Para medir a resistência dos enrolamentos podem ser usados dois métodos, consoante a corrente contínua aplicada: o Método Voltímetro- Amperímetro quando a corrente é superior a 1A e o método de ponte no caso contrário [3].

2.4.14 Temperatura

A condição térmica interna do transformador é uma das principais causas do seu envelhecimento. O calor produzido devido a um aumento da temperatura contribui para a deterioração do isolamento do enrolamento, que constitui uma das fontes de falhas mais recorrentes. A medição do ponto quente, que se encontra no topo do transformador, pode ser feita recorrente a métodos diretos, tais como, dispositivos termopares, resistências térmicas e sensores de fibra ótica, que permitem medir diretamente a temperatura do ponto quente dos enrolamentos [38]. O melhor método de deteção e monitorização do ponto quente é através do sensor de fibra ótica, instalado diretamente dentro do revestimento do enrolamento do TP. No entanto, este método obriga à interrupção do fornecimento de energia dos transformadores já em serviço [5] [3]. Existem ainda métodos indiretos, nomeadamente, o modelo térmico, no qual é necessário efetuar alguns cálculos para obter a medida de temperatura, sendo por isso menos preciso comparativamente aos referidos anteriormente [5].

2.5 Defeitos de Fabrico

Na secção 2.3 foram enumeradas as falhas provocadas pelos diversos componentes do TP. No entanto, estas podem também ser induzidas por erros humanos durante as fases de conceção, fabrico, transporte e instalação do equipamento. Assim, define-se defeito de fabrico como sendo a ocorrência de erros no processo de produção de um transformador provocados por vários fatores, tais como, a utilização de materiais defeituosos, mão-de-obra e testes inadequados ou medidas de controlo de qualidade insuficientes. O facto destes defeitos, muitas vezes, se manifestarem apenas quando o equipamento se encontra em regime de operação não permite a sua identificação durante a etapa ensaios de fábrica ou nos testes realizados após a sua instalação. Neste sentido, a sua caracterização requer a recolha e análise de dados das fases relativas ao seu processo de fabrico e de montagem. Concluída a pesquisa bibliográfica sobre este tema, não foi possível encontrar informação relativa aos defeitos de fabrico mais comuns observados nos transformadores de potência. [39]

Capítulo 3

Metodologia Proposta

Com a realização da pesquisa bibliográfica, cujo propósito era aprofundar o conhecimento do equipamento em estudo e dos diversos métodos utilizados para diagnosticar a sua condição, obteve-se a base teórica necessária para a análise dos dados e consequente desenvolvimento da metodologia, tal como está enunciada no presente capítulo. Este inicia-se com uma breve caracterização do universo de transformadores da empresa, focando nos TP considerados problemáticos, seguida da apresentação da orientação metodológica, na qual se expõem as diversas fases do processo de análise dos dados fornecidos.

3.1 Caracterização de Transformadores da E-REDES

Esta secção foi desenvolvida para caracterizar o universo dos transformadores detidos pela E-REDES, primeiro dando conta do número total de TP AT/MT, e, posteriormente, apresentando a sua distribuição em função da idade e índice de saúde. Em 3.1.2 é feita então a caracterização acima descrita, mas apenas dos transformadores produzidos pelo fabricante em questão, uma vez que são estes o foco do estudo.

3.1.1 Universo de Transformadores da E-REDES

A E-REDES detém cerca de 780 transformadores AT/MT, distribuídos por 430 subestações, que abrangem 18 distritos do país. No anexo A.1 consta o mapa da distribuição geográfica dos transformadores AT/MT pelas várias subestações.

No gráfico da figura 3.1, onde se apresenta a distribuição da totalidade dos transformadores por idade, é possível verificar que aproximadamente 50% deles estão situados na faixa etária entre os 36 e 51 anos, o que significa que número de instalações realizadas entre 1971 e 1986 foi consideravelmente superior às de outros períodos. Embora nos últimos anos se tenha tomado medidas no sentido de baixar a idade média dos transformadores, a verdade é que ela ronda ainda os 35 anos. Tendo em conta que a E-REDES situa entre os 50 e 60 anos o tempo de vida expectável dos seus TP, por observação do gráfico, é possível concluir que cerca de metade deles estão na fase de vida denominada velhice.

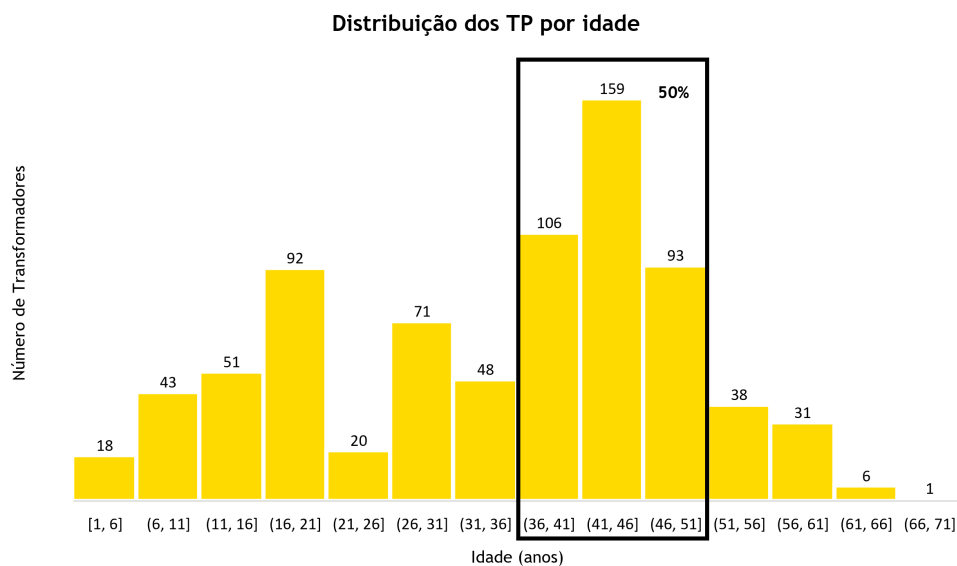


Figura 3.1: Distribuição dos transformadores por idade

Ainda que a idade do transformador, numa primeira análise, possa fornecer informações relativas ao seu estado, existe um fator denominado índice de saúde, que permite aferir a sua condição atual, índice esse que fornece informações importantes a ter em consideração na execução do planeamento de manutenção, investimento e substituição dos equipamentos em causa [40] [41]. O gráfico da figura 3.2 mostra que o índice de saúde médio do ativo ronda os 65%, o que é considerado um bom indicador.

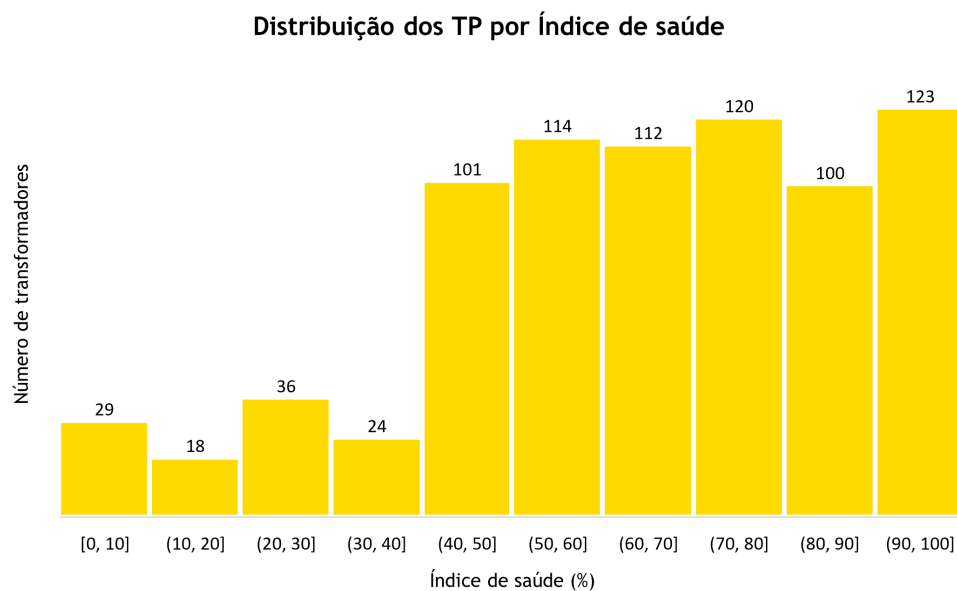


Figura 3.2: Distribuição dos transformadores por índice de saúde

3.1.2 Conjunto de Transformadores considerados problemáticos

O transformador de potência é considerado um dos equipamentos mais importantes e valiosos da rede elétrica e, como tal, a sua condição técnica é verificada anualmente, através de várias ações de manutenção, sendo uma das mais relevantes a avaliação do estado do óleo isolante, com recurso à técnica DGA (*dissolved gas analysis*). Este método, exposto em 2.4, baseia-se na análise dos gases presentes no fluido isolante e das suas proporções, a partir das quais se efetua o diagnóstico da condição interna do ativo. Na figura 3.3 consta o resultado de uma análise DGA ao óleo isolante de um transformador.

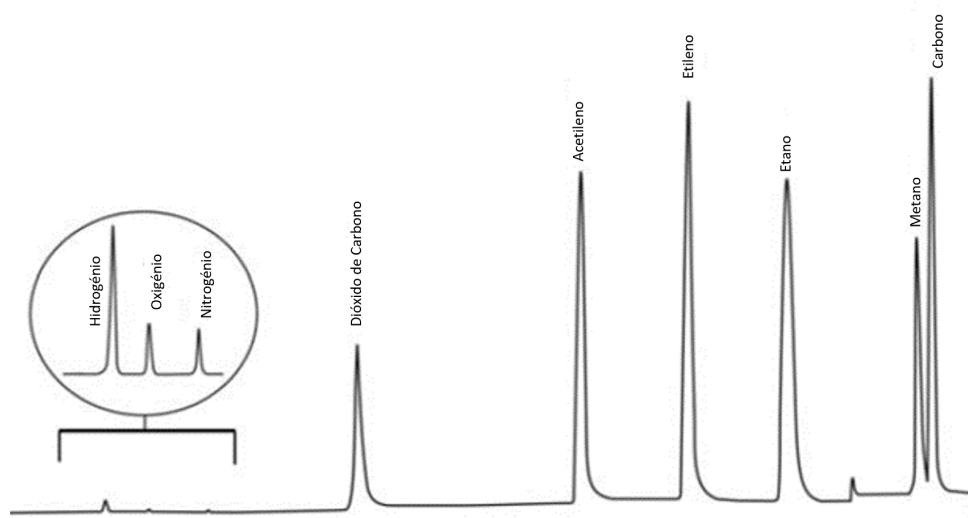


Figura 3.3: Resultado de uma análise DGA ao óleo

As análises realizadas anualmente ao óleo deste equipamento evidenciaram uma elevada concentração do gás etano (C_2H_6) no isolante líquido da cuba principal do transformador, em resultado da sua exposição a temperaturas próximas de $200^{\circ}C$, algo que não é comum acontecer no referido componente do equipamento. A presença de elevadas quantidades desse gás está associada a um defeito térmico de baixa temperatura. Da inspeção realizada identificou-se um conjunto de 94 transformadores considerados problemáticos, todos fabricados depois de 2003 por um determinado fabricante, dos quais 56 apresentaram o defeito assinalado, como é possível verificar na figura 3.5. A diferença do nível concentração de etano nestes TP considerados problemáticos relativamente aos restantes está patente no gráfico 3.4. Na figura 3.6 apresenta-se a distribuição dos transformadores produzidos por outros fabricantes de acordo com a presença ou ausência do defeito identificado, evidenciando a discrepância de comportamento dos TP produzidos pelo fabricante em estudo em relação aos restantes. A alta incidência do defeito identificado no conjunto de transformadores produzidos pela empresa em questão levanta uma preocupação para a E-REDES, que pretende compreender a razão que leva este conjunto de TP a comportarem-se de forma diferente face aos restantes.

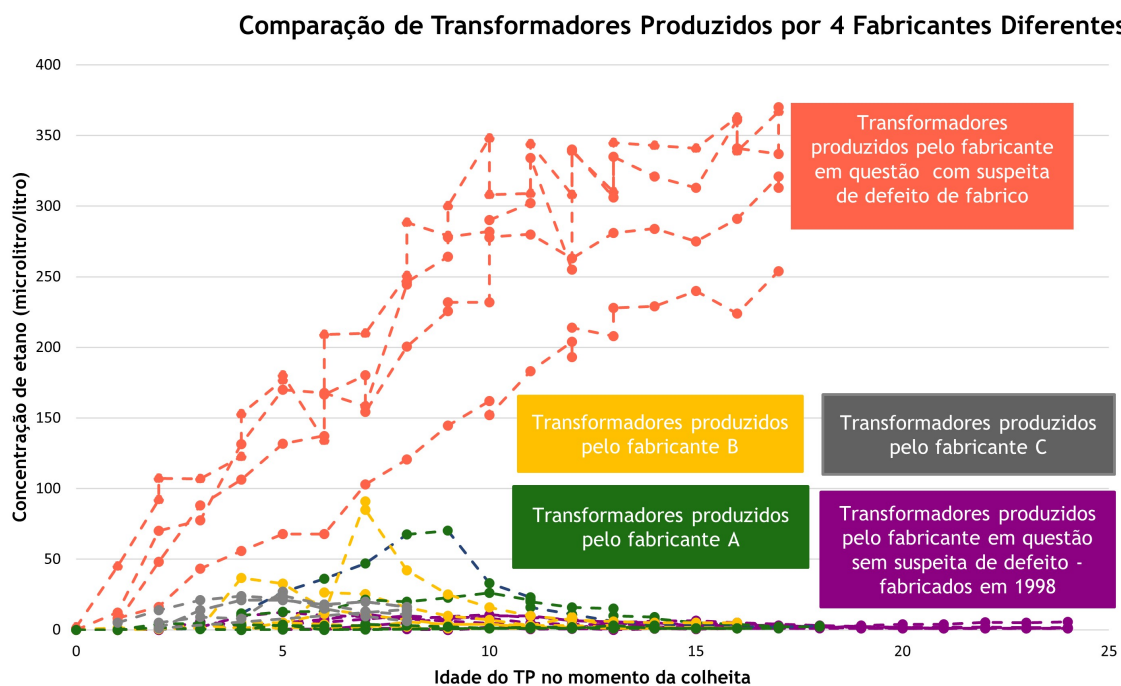


Figura 3.4: Comparação de 4 conjuntos de transformadores produzidos por diferentes fabricantes

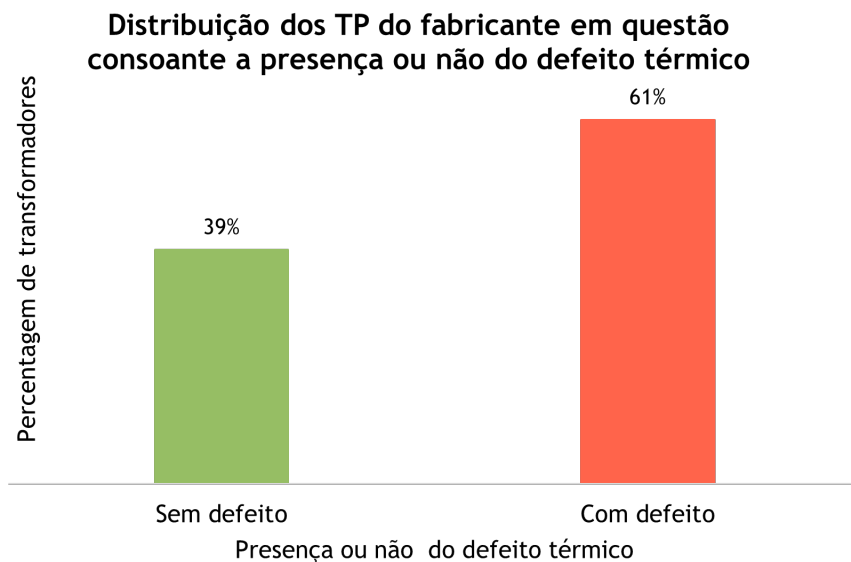


Figura 3.5: Distribuição dos Transformadores do fabricante em questão de acordo com a presença ou não de defeito, adquiridos após 2003

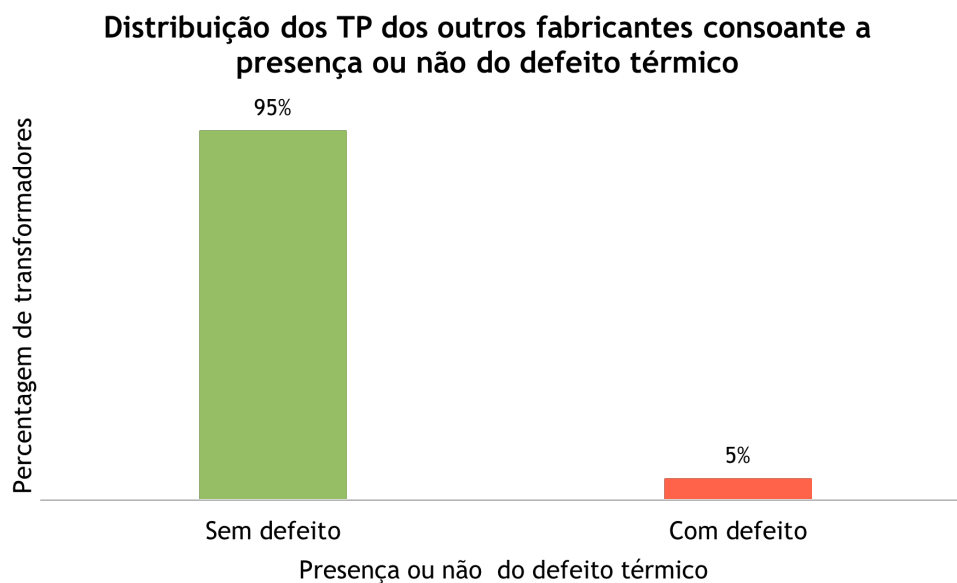


Figura 3.6: Distribuição dos Transformadores dos outros fabricantes de acordo com a presença ou não de defeito

A partir da análise dos gráficos 3.7 e 3.8, que expressam a distribuição dos TP problemáticos por idade e índice de saúde, respetivamente, retira-se que 70% destes equipamentos estão no sua fase de vida útil, com um índice de saúde relativamente bom, o que contrasta com a presença, em quantidades elevadas, dos gás etano.

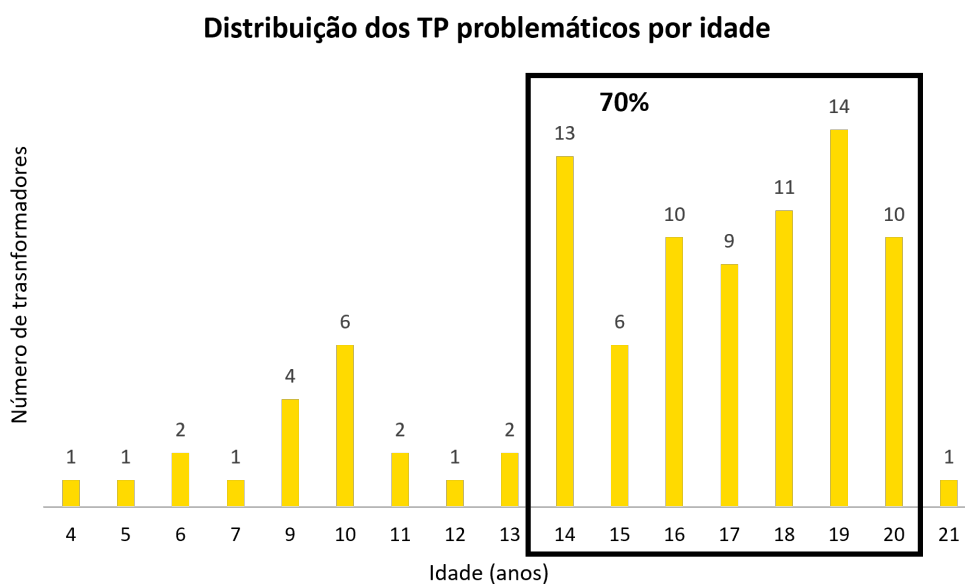


Figura 3.7: Distribuição dos transformadores considerados problemáticos por idade

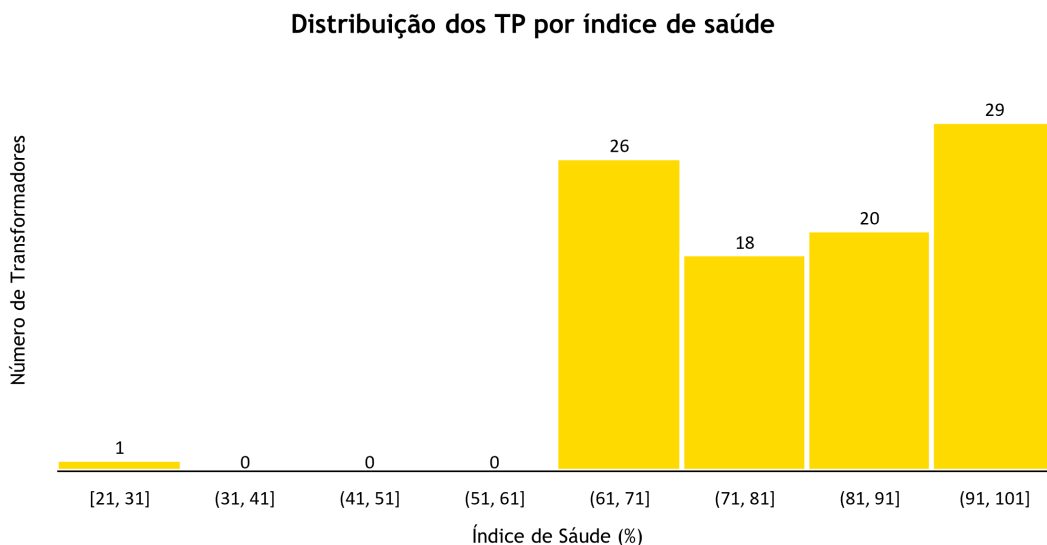


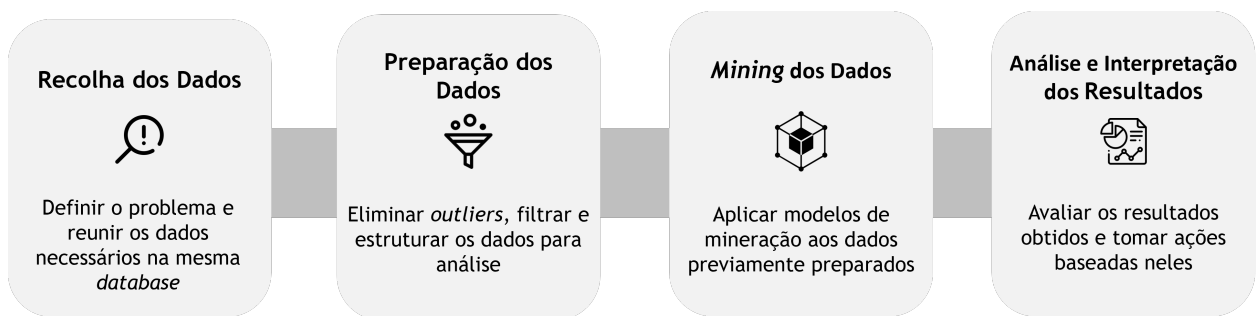
Figura 3.8: Distribuição dos transformadores considerados problemáticos por índice de saúde

A disparidade comportamental entre 94 transformadores considerados problemáticos e os restantes, aliada ao facto de serem equipamentos na fase intermédia da sua vida útil, suscita a suspeita de se tratar de um defeito interno de fabrico que possa ter ocorrido no processo de produção e é precisamente esta questão que se pretende avaliar com a metodologia descrita na secção seguinte (3.2).

3.2 Metodologia Concebida

Para dar resposta ao desafio inicialmente enunciado, foi elaborada a proposta de metodologia esquematizada na figura 3.10, através da qual foram tratados os dados disponibilizados pela empresa, no sentido de tentar estabelecer uma relação causa-efeito entre os fabricantes dos vários componentes e o aparecimento do defeito térmico de baixa temperatura provocado pelo aumento da concentração do gás etano (C_2H_6).

O volume de dados fornecidos pela empresa, designadamente, fabricantes dos vários componentes constituintes do equipamento, constituiu um problema no processo de análise dos dados, uma vez que inviabilizou o seu tratamento de uma forma manual. Assim, recorreu-se a uma técnica denominada *data mining*, que permite a identificação de padrões, anteriormente desconhecidos, em conjuntos complexos de dados [42]. Este processo divide-se essencialmente em quatro etapas expressas na figura 3.9 [43].

Figura 3.9: Quatro fases dos processo de *data mining*

De modo a identificar os potenciais fatores que podem estar na origem do tipo de defeito detetado, devem ser recolhidas informações consideradas relevantes sobre o equipamento em questão, para saber em concreto quais os fabricantes dos vários componentes que o integram, qual a localização onde operam e qual a carga a que se encontra submetido. No entanto, a relativamente frequente negligência humana na colheita e registo dos dados, conduz à ausência de informações em certos campos e também à existência de inconsistências ou contradições no tipo de informação, pelo que é recomendável a sua submissão a um pré-processamento, com integração dos dados provenientes de origens diferentes numa mesma *database*. Depois, eliminam-se as informações inconsistentes ou duplicadas, faz-se uma padronização dos formatos de dados e procede-se à criação de variáveis que sejam relevantes para a análise a ser efetuada [44].

Concluída a organização de todos os dados, segue-se a seleção das potenciais variáveis alvo, ou seja, que influenciam o aparecimento do defeito, de forma a prevenir a incorporação de variáveis irrelevantes no modelo a ser desenvolvido posteriormente. Para tal, neste caso concreto, recorreu-se à aplicação de métodos estatísticos, apresentados em 3.2.1, com o intuito de testar a existência de uma relação entre cada variável e a ocorrência do defeito.

Finalmente, implementou-se uma técnica de *data mining*, denominada regras de associação, com o objetivo de encontrar regras relevantes entre as diversas variáveis selecionadas e o aparecimento do defeito.

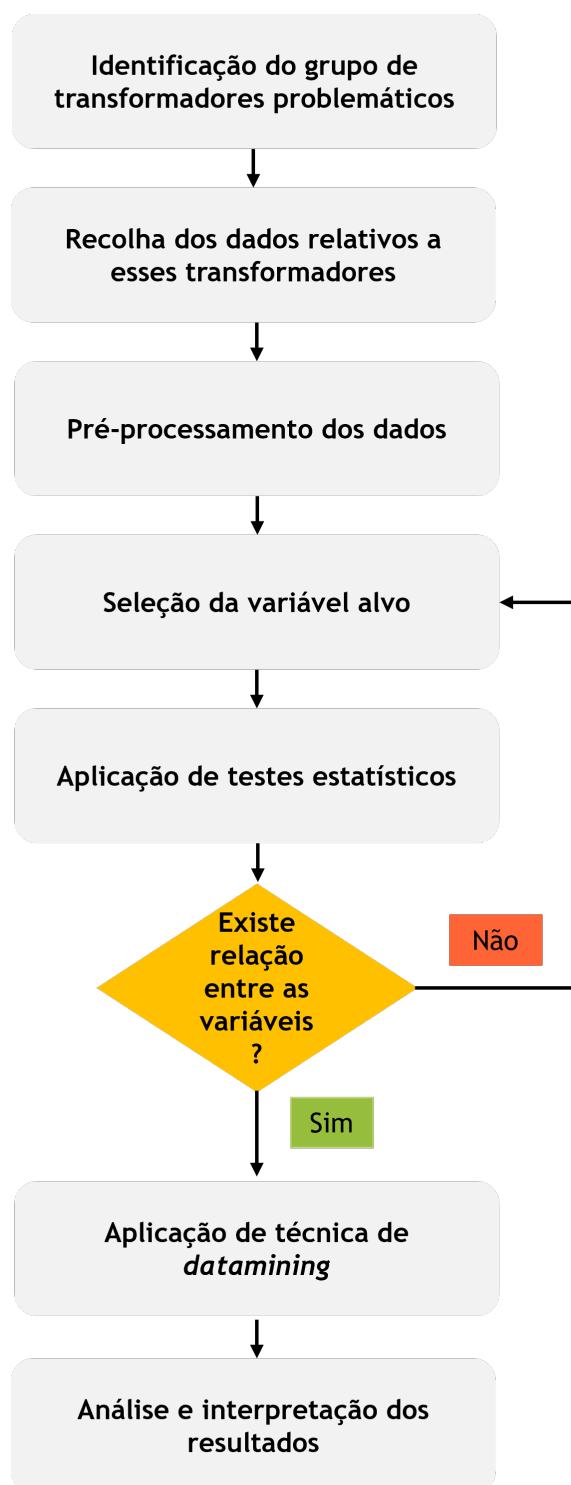


Figura 3.10: Fluxograma relativo à metodologia desenvolvida

3.2.1 Métodos estatísticos

3.2.1.1 Teste *Chi-Square*

Desenvolvido para avaliar a independência ou associação entre duas variáveis categóricas de uma mesma amostra, este teste baseia-se no cálculo do parâmetro *chi-square* (χ^2) com base nos dados observados e esperados, que seriam os resultados obtidos se as variáveis não tivessem qualquer tipo de relação. A equação que determina este parâmetro está expressa em 3.1.

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{Observado} - \text{Esperado})^2}{\text{Esperado}} \quad (3.1)$$

Neste teste são definidas duas hipóteses: a hipótese nula (H_0), onde se assume que as duas variáveis em análise são independentes, e a alternativa (H_1), na qual se considera que existe uma associação entre elas. Geralmente, os dados estão organizados numa tabela de contingência, semelhante à do exemplo apresentado em 3.11, a partir da qual se calcula o valor esperado (3.2). No exemplo em questão, é representada a relação entre uma variável com duas classes, x e y, e a presença ou ausência do defeito térmico. No próximo capítulo (4), realiza-se um procedimento semelhante ao do exemplo apresentado, no qual se faz o cruzamento desta última variável com todas as outras relativas aos componentes/características do TP e aos seus modos de operação.

		Estado do defeito		
		Com Defeito	Sem Defeito	
Variável 1	X	A	B	$n_1 = A + B$
	Y	C	D	$n_2 = C + D$
				$n = n_1 + n_2$

Figura 3.11: Exemplo para aplicação do teste *chi-square*

onde,

A = número de casos que pertencem à classe x da variável 1 e que apresentam defeito;

B = número de casos que pertencem à classe x da variável 1 e que não apresentam defeito;

C = número de casos que pertencem à classe y da variável 1 e que apresentam defeito;

D = número de casos que pertencem à classe y da variável 1 e que não apresentam defeito;

n_1 = número de casos pertencentes à classe x da variável 1;

n_2 = número de casos pertencentes à classe y da variável 1;

n = número total de casos

$$\text{ValorEsperado} = \frac{(\text{TotalLinha}) \times (\text{TotalColuna})}{(\text{Total})} \quad (3.2)$$

$$\text{ValorEsperado}(A) = \frac{(A+C) \times (n_1)}{n} \quad (3.3)$$

$$\text{ValorEsperado}(B) = \frac{(B+D) \times (n_1)}{n} \quad (3.4)$$

$$\text{ValorEsperado}(C) = \frac{(A+C) \times (n_2)}{n} \quad (3.5)$$

$$\text{ValorEsperado}(D) = \frac{(B+D) \times (n_2)}{n} \quad (3.6)$$

Determinado o χ^2 , é necessário encontrar a distribuição que a ele se associa com os graus de liberdade apropriados, calculados através da expressão 3.7. Deste modo, é possível obter o p -value, parâmetro que indica a probabilidade do desvio relativamente ao resultado esperado ser aleatório.

$$\text{GrausdeLiberdade} = (\text{NumeroLinhas} - 1) \times (\text{NumeroColunas} - 1) \quad (3.7)$$

Para aferir se variáveis são independentes procede-se à comparação desse valor com o nível de significância, denotado como α . Por exemplo, um nível de significância de 0,05, frequentemente utilizado, indica um fator de risco de 5% de se concluir que existe uma associação entre as variáveis quando não existe uma associação real, ou seja, a probabilidade de se verificar um falso positivo.

Quando o valor p calculado no teste for menor do que um nível de significância pré-definido (geralmente 0,05), a H_0 é rejeitada, indicando que as variáveis são dependentes e há uma associação significativa entre elas. Caso contrário, se o valor p for superior ao nível de significância, a hipótese nula é aceite, sugerindo que as variáveis são independentes [44][45]. Na tabela 3.1 apresenta-se um resumo da interpretação do teste descrito.

Tabela 3.1: Síntese do teste *chi-square*

Condição	Conclusão
se $p < \alpha$	verifica-se uma dependência entre as duas variáveis em análise
se $p > \alpha$	as duas variáveis são aparentemente independentes

3.2.1.2 Índices de Causalidade

Os índices de causalidade, criados especificamente para este estudo, são usados para auxiliar na avaliação da influência das variáveis, designadamente o índice de causalidade da classe (ICC) e o índice de causalidade da variável (ICV). Com o primeiro indicador calcula-se a diferença entre a percentagem de casos observados e esperados para cada classe. Se houver indícios de influência

da classe no resultado, a percentagem de casos observados será superior à frequência independente esperada, resultando num valor positivo para o índice. Este pode ser calculado através da expressão 3.8

Já o índice de causalidade da variável, obtido a partir de 3.9, representa o somatório das influências das diversas classes. Quanto maior o valor desse índice, maior será a potencial causalidade da variável em relação ao resultado. Esse valor representa a percentagem de casos acima do valor esperado para uma variável sem influência significativa.

Neste estudo, o que se pretende é analisar a causalidade entre cada uma das classes das variáveis relativas aos componentes/caraterísticas do transformador e a presença do defeito, no sentido de se perceber se existe alguma relação causa-efeito entre elas.

$$I_{cc} = \max(\%observado - \%esperado, 0) \quad (3.8)$$

$$I_{cv} = \sum(I_{cc}) \quad (3.9)$$

Para melhor compreender estes índices, é crucial aplicá-los a um exemplo concreto. Nesse sentido e tendo por base a tabela apresentada na figura 3.11, é possível exemplificar e compreender de que forma estes índices são calculados e interpretados. O índice de causalidade da classe é calculado através da expressão 3.8, tendo por base os dados observados e os dados esperados. Os valores esperados representam os resultados que seriam obtidos caso as variáveis em análise não apresentassem qualquer tipo de relação, ou seja, se a variável 1 não influenciasse o aparecimento do defeito, e podem ser calculados através da equação expressa em 3.2. Com os valores esperados, obtidos nas equações 3.3-3.5, é possível determinar a percentagem esperada de transformadores com e sem defeito associada a cada classe da variável 1. Este cálculo pode ser realizado simplesmente dividindo cada valor esperado pelo total (n), como está patente nas equações 3.10 e 3.11. Recorde-se que neste caso concreto pretende-se apenas averiguar a relação de causalidade entre a variável 1 e a presença do defeito.

$$\%ValorEsperado(A) = \frac{(A + C) \times (n_1)}{n^2} \quad (3.10)$$

$$\%ValorEsperado(C) = \frac{(A + C) \times (n_2)}{n^2} \quad (3.11)$$

$$I_{cc}(X) = \max\left(\frac{A}{n} - \%ValorEsperado(A), 0\right) \quad (3.12)$$

$$I_{cc}(Y) = \max\left(\frac{C}{n} - \%ValorEsperado(C), 0\right) \quad (3.13)$$

$$I_{cv} = I_{cc}(X) + I_{cc}(Y) \quad (3.14)$$

As equações 3.12 e 3.13 quantificam o impacto de cada uma das classes da variável 1 na ocorrência do defeito. Através da análise destes indicadores, é possível determinar o grau de influência de cada classe na presença do defeito, o que viabiliza a identificação das classes da

variável 1 que possuem maior impacto ou contribuição na sua manifestação. Essa avaliação da causalidade, recorrendo também ao ICV (3.14), ajuda a compreender quais as variáveis relativas aos componentes/caraterísticas do TP que estão associadas ao surgimento do defeito.

3.2.1.3 Teste T

À semelhança do método anterior, este teste é usado para determinar se existe uma diferença significativa entre os dois grupos, recorrendo ao cálculo da média de cada um deles. Existem diferentes versões deste teste aplicadas de acordo com o que se pretende avaliar, sendo que nesta secção é abordado apenas o t-test para duas amostras, considerando a possibilidade de diferenças tanto positivas quanto negativas (*two-tailed*).

Para tratar o problema estabelece-se uma hipótese nula, na qual as médias das duas amostras são iguais ($H_0 : u_1 = u_2$), e uma hipótese alternativa que contradiz a anterior ($H_1 : u_1 \neq u_2$). Posteriormente define-se um nível de significância (α), tipicamente 5%, e calculam-se os graus de liberdade através da expressão apresentada em 3.15, onde n_1 e n_2 correspondem aos tamanhos das duas amostras.

$$\text{Graus de Liberdade} = n_1 + n_2 - 2 \quad (3.15)$$

Com esses dois parâmetros é possível proceder ao cálculo do valor crítico, através de um *software* estatístico ou da tabela de distribuição t, que define o limite a partir do qual se rejeita a hipótese nula. Segue-se depois o cálculo do valor do teste estatístico (t), calculado a partir da equação 3.16, que mede a diferença entre a média dos dois grupos considerando a variabilidade entre eles (3.17).

$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}} \quad (3.16)$$

onde,

$\overline{X}_1, \overline{X}_2$ = média das amostras 1 e 2, respetivamente

s_1, s_2 = desvio das amostras 1 e 2, respetivamente

n_1, n_2 = tamanho das amostras 1 e 2, respetivamente

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - u)^2 \quad (3.17)$$

onde,

u = média da amostra

n = tamanho da amostra

A comparação entre o valor crítico e o teste estatístico (t) permite determinar se a diferença observada é estatisticamente relevante, levando à rejeição ou não da hipótese nula. O primeiro caso acontece quando o parâmetro t, calculado a partir dos dados fornecidos, é inferior ao valor crítico. Em suma, a não aceitação da hipótese nula implica a existência de uma relação entre as variáveis em análise [46].

3.2.2 Mining dos Dados

Esta secção foca-se nos conceitos que estão na base das regras de associação, a usar na metodologia proposta. A seguir, apresenta-se ainda o algoritmo Apriori utilizado na identificação de relações entre os *itemsets* presentes no conjunto de dados fornecidos, que satisfazem um limite mínimo estabelecido em três indicadores: suporte, confiança e lift. [47]

3.2.2.1 Regras de Associação

As regras de associação permitem avaliar a possibilidade de existir uma relação causa-efeito entre um conjunto de itens de uma base de dados e assim encontrar padrões associativos entre eles. Estas são compostas por dois conjuntos de itens: um antecedente e um consequente, sendo representadas da forma antecedente $\implies$ consequente, interpretando-se como “se antecedente então consequente”. Cada um dos conjuntos é designado por *itemset*, cujo tamanho é referenciado como *k-itemset*.

As medidas de avaliação têm um papel fundamental na análise da qualidade das regras geradas com os vários algoritmos, pelo que é importante clarificar estes conceitos. As métricas mais utilizadas são o suporte, a confiança e o lift [48] [47]:

- **Suporte**

O suporte é uma medida de incidência utilizada para definir o conjunto de regras com maior significado. Assim, considerando uma determinada associação $\{X\} \implies \{Y\}$, o suporte é interpretado como sendo a percentagem de transações que contêm os conjuntos de itens $\{X\}$ e $\{Y\}$, calculado a partir da expressão 3.18, onde o numerador se refere ao número de transações na qual X e Y ocorrem simultaneamente e o denominador ao total de transações da base de dados.

$$Suporte(X \implies Y) = \frac{Frequencia(X \cap Y)}{Total} \quad (3.18)$$

- **Confiança**

Esta métrica indica a probabilidade condicionada de se verificar o conjunto Y, sabendo que ocorreu X. Para o cálculo da confiança utiliza-se a equação 3.19, onde o numerador se refere à número de vezes em que X e Y ocorrem simultaneamente e o denominador à quantidade de transações em que o item X acontece.

$$Confianca(X \implies Y) = \frac{Suporte(X \cup Y)}{Suporte(X)} \quad (3.19)$$

• **Lift**

O Lift, cuja expressão está patente em 3.20, é utilizado para avaliar a dependência entre o antecedente e o conseqüente de uma associação, no sentido de determinar a sua fiabilidade. Esta métrica varia entre zero e infinito, sendo que quanto maior for a medida, mais interessante é a regra, já que há uma maior dependência entre os itens que a constituem.

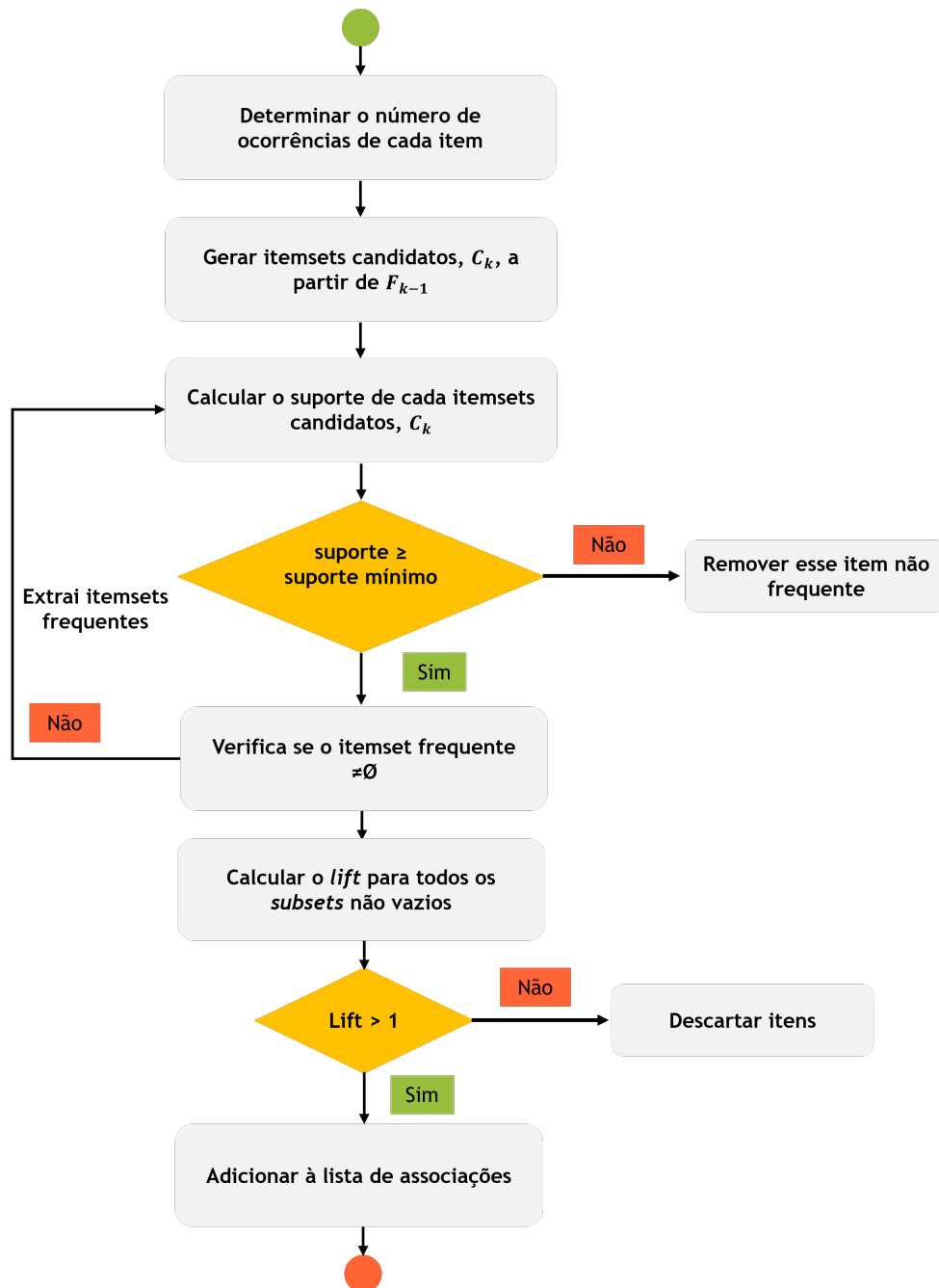
Em suma, se o lift assumir o valor 1, significa que não existe dependência entre os conjuntos X e Y. Por outro lado, se for superior à unidade verifica-se uma relação positiva entre os dois conjuntos, pelo que se considera que a regra é relevante.

$$Lift(X \implies Y) = \frac{Confianca(X \implies Y)}{Suporte(y)} \quad (3.20)$$

A identificação de regras de associação pode ser feita recorrendo a vários algoritmos, contudo neste estudo recorreu-se ao algoritmo apriori, esquematizado na figura 3.12, muito utilizado na extração de regras em grandes *databases*. A construção da regras é feita através de uma pesquisa de conjuntos de itens numa direcção horizontal, explorando $(k + 1)$ -*itemset* a partir da combinação de k -*itemsets*. Assim, com a junção desses conjuntos geram-se os *itemsets* candidatos (C_k). O suporte deste conjunto C_k deve ser superior ao limite mínimo pré-definido pelo utilizador, sendo que os que satisfazem este critério passam a designar-se por conjunto de itens frequentes F_k [48].

O Apriori é executado da seguinte forma:

- Inicialmente determina-se o suporte para cada item individualmente, e posteriormente são escolhidos os considerados frequentes, ou seja, que apresentam um suporte igual ou superior ao definido previamente pelo utilizador. Estão, assim, encontrados os conjuntos-de-1-item frequentes.
- Na segunda iteração, são gerados os candidatos a conjuntos-de-2-itens, que resultam da junção dos conjuntos-de-1-item identificados como frequentes na iteração anterior. Calculados os seus suportes, seleccionam-se aqueles cujo suporte é superior ao mínimo estabelecido, surgindo assim os conjuntos-de-2-itens frequentes. Este grupo de itens frequentes irá depois iniciar a iteração seguinte. O algoritmo prossegue iterativamente, até que o conjunto-de-k-itens encontrado seja um conjunto vazio.
- Numa segunda fase, o algoritmo gera as associações derivadas dos *itemsets* frequentes, considerando apenas as que apresentam um *lift* superior a 1.

Figura 3.12: Fluxograma relativo ao algoritmo *apriori* [8]

Capítulo 4

Aplicação da Metodologia ao Caso de Estudo

Concluída a exposição dos conceitos teóricos apresentados em [3](#), fase em que se aprofundou o conhecimento necessário para o desenvolvimento da metodologia adequada ao caso de estudo em questão, segue-se agora o capítulo relativo à aplicação das técnicas e dos processos discutidos anteriormente, tendo em vista a obtenção de respostas relevantes à problemática em foco. O processo de metodológico concebido foi dividido essencialmente em 4 etapas, designadamente as seguintes:

- Recolha e preparação dos dados
- Seleção das variáveis alvo, recorrendo a testes estatísticos
- Aplicação de regras de associação
- Avaliação e interpretação dos resultados

4.1 Recolha e Preparação dos Dados

Depois de identificados os transformadores considerados problemáticos pela E-REDES, procedeu-se à recolha de informações consideradas pertinentes para a avaliação pretendida, nomeadamente dados de produção e operacionais. Essas informações, fornecidas pelo fabricante, estavam armazenadas em diferentes ficheiros, sendo que cada um continha dados específicos sobre os referidos equipamentos.

Para consolidar e organizar esses dados, os arquivos foram compilados numa estrutura de metadados, patente no anexo [A.2](#), de modo a obter-se uma visão integrada e geral de todas as informações recolhidas.

Além disso, foram adotadas práticas de limpeza e padronização dos dados, incluindo a remoção de informações duplicadas, o preenchimento de lacunas e a uniformização de formatos,

garantindo-se assim a consistência e a qualidade dos dados consolidados, ao mesmo tempo que se reduziu a possibilidade de ocorrência de erros e ambiguidades na análise.

Todos os transformadores da E-REDES possuem uma chave única, a designada SAP ID, com a qual é possível aceder a um conjunto alargado de atributos nos sistemas da empresa, sistemas esses que por sua vez permitem obter um vasto leque de informações relativas ao do ativo. Esta extração de características é realizada através do sistema de cadastro de ativos SAP JUMP e envolve atributos como o Local de Instalação, o Ano de Fabrico, o Centro de Trabalho e o Nível de Tensão, entre outros. [49]

O primeiro passo consistiu na extração do conjunto de equipamentos identificados do sistema SAP JUMP, tendo-se recorrido a funções de sincronização e extração de dados, o que permitiu encontrar as informações relativas aos TP pretendidos, tendo por base o seu ID.

Posteriormente, através do cruzamento dos IDs dos ativos presentes num ficheiro, com as características de fabrico com os IDs correspondentes no arquivo de dados consolidado, foi possível adicionar as informações relevantes aos transformadores específicos, enriquecendo assim o conjunto de dados disponíveis. As novas informações obtidas referem-se aos fabricantes dos componentes do equipamento e às suas características de operação, incluindo correntes nas fases e condutância.

Por fim, adicionou-se a informação sobre o tempo de operação de cada transformador em diferentes níveis de carga. A partir desses dados, foram criadas duas variáveis adicionais no ficheiro consolidado: uma que indica o nível de carga predominante em cada transformador, outra que identifica os transformadores submetidos a cargas superiores a 80%, durante mais de 20% do tempo. Com essa análise foi possível identificar os transformadores a atuar em condições de carga elevadas e que poderiam estar sujeitos a um maior desgaste.

Completada a fase de preparação dos dados, na qual foram compiladas todas as informações relevantes relativas aos ativos considerados problemáticos, obteve-se o ficheiro apresentado em 4.1, composto por 89 registos (linhas) relativos aos TP em estudo e 28 campos (colunas) correspondentes às variáveis em análise.

Ficheiro														Comentários		Partilha																	
Inserir Equações da Página														Fórmulas		Dados		Rever		Ver		Automatizar		Ajuda		Power Pivot							
C														D		E		F		G		H		I		J		K		L		M	
Nr Série	SAP ID - TP	Código Localização	Subestação (SE)	Conselho da SE	Presença de Defeito?	Ano de Fabrico	Potência (MVA)	Relação de Transformação (kV)	Grupo	Indução	Exp. Chapa	Tipo de óleo	Carga kV																				
C-0010A	280210081	ED-1507-SE-60-000600-CTP0002	SE Montijo	Montijo	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd11	1,6447	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0025A	280210305	ED-1308-SE-60-007000-CTP0003	SE Cutilhas	Matosinhos	Sem Defeito	2003	40	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,6899	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0025B	280210306	ED-1308-SE-60-007000-CTP0001	SE Cutilhas	Matosinhos	Com defeito	2003	40	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,6899	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0028	280226433	ED-1513-SE-60-054800-CTP0002	SE Monte Felo	Sines	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 31,5 / 15,75 kV	YNd11	1,695	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0034A	280190012	ED-1506-SE-60-031400-CTP0001	SE Moita	Moita	Sem Defeito	2003	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd11	1,6447	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0035A	280190007	ED-1511-SE-60-020800-CTP0001	SE Quinta do Conde	Saizelara	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 31,5 kV	YNd11	1,6447	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0038A	280182280	ED-1501-SE-60-335200-CTP0001	SE Vale do Tejo	Alenquer	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 31,5 kV	YNd11	1,6447	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0039A	280179024	ED-1512-SE-60-031200-CTP0001	SE Sado	Sertalgal	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 31,5 kV	YNd11	1,6957	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0040A	280178978	ED-1516-SE-60-002000-CTP0002	SE São Bento	Santarém	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 31,5 / 15,75 kV	YNd11	1,695	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0041A	280008529	ED-1114-SE-60-192200-CTP0004	SE Póvoa	Vila Franca de Xira	Com defeito	2003	31,5	60 OLTG / 31,5 / 15,75 kV	YNd11	1,695	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0049A	280123139	ED-1504-SE-60-072000-CTP0002	SE Cadaval	Estalhal	Com defeito	2004	20	60 OLTG / 31,5 kV	YNd11	1,708	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0050A	280123886	ED-0605-SE-60-005800-CTP0001	SE Gala	Figueira da Foz	Com defeito	2004	20	60 OLTG / 31,5 kV	YNd5	1,7093	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0077A	280226432	ED-1513-SE-60-054800-CTP0001	SE Monte Felo	Sines	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 31,5 / 15,75 kV	YNd11	1,695	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0078A	280217417	ED-1506-SE-60-031400-CTP0002	SE Moita	Moita	Com defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd11	1,6447	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0079A	280226430	ED-0505-SE-60-005100-CTP0002	SE Aveiro	Aveiro	Com defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,6447	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0080A	280214118	ED-1512-SE-60-031200-CTP0002	SE Sado	Sertalgal	Com defeito	2004	31,5	60 OLTG / 31,5 kV	YNd11	1,6957	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0085A	280211744	ED-0509-SE-60-010000-CTP0001	SE São João da Madeira	Santa Maria da Feira	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0085B	280211755	ED-0509-SE-60-010000-CTP0002	SE São João da Madeira	Santa Maria da Feira	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0095	280157556	ED-0303-SE-60-020700-CTP0001	SE Lamas	Braga	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0095D	280155962	ED-1118-SE-60-020300-CTP0002	SE Muro	Trofa	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0095E	28015757	ED-0303-SE-60-020700-CTP0002	SE Lamas	Braga	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0097A	280157555	ED-1823-SE-60-004000-CTP0002	SE Ourense	Viana	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd11	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0098A	280179404	ED-1510-SE-60-000800-CTP0001	SE Alcobaca	SE Alcobaca	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 31,5 kV	YNd5	1,6939	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0108A	280215758	ED-1510-SE-60-000800-CTP0001	SE Lousada	Paradise	Com defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0111A	280212827	ED-0515-SE-60-008100-CTP0001	SE Ovar	Ovar	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0111B	280217228	ED-0510-SE-60-004000-CTP0002	SE Gafanha	Bhavo	Sem Defeito	2004	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,7071	0,23	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0120A	280212589	ED-0512-SE-60-001200-CTP0001	SE CAVANCO	Vila Nova de Famalicão	Com defeito	2005	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,58	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				
C-0120B	280217230	ED-0513-SE-60-008000-CTP0002	SE Oliveira de Azeméis	Oliveira de Azeméis	Com defeito	2005	31,5	60 OLTG / 15,75 kV	YNd5	1,58	0,3	Nitro 11 EN	terrossa																				

Figura 4.1: Consolidação dos dados relativos aos transformadores considerados problemáticos

Antes de avançar para a próxima fase do processo, é necessário clarificar quais as informações disponíveis, que servirão de base para todo o estudo. Para tal, e com o objetivo de facilitar a análise e interpretação dos resultados foi desenvolvida a tabela 4.1, que descreve as variáveis utilizadas na análise.

Tabela 4.1: Descrição das variáveis utilizadas na análise

Variáveis alvo	Descrição
Número de Série	Identificador único atribuído ao TP durante o seu processo de fabrico
SAP ID	Chave única atribuída ao TP, que dá acesso a informações relativas ao seu cadastro
Presença de Defeito	Indica se o transformador em questão apresenta o defeito térmico
Subestação (SE)	Subestação onde o TP está instalado
Concelho da SE	Localização da subestação
Ano de Fabrico	Ano em que o TP foi fabricado
Potência (MVA)	Potência nominal do TP
Relação de Transformação (kV)	Relação entre a tensão do primário e do secundário do TP
Grupo de ligação	Configuração específica dos terminais do comutador de tensão utilizado no TP
Espessura da Chapa (mm)	Espessura da chapa magnética utilizada no núcleo do TP
Tipo de Óleo	Tipo de óleo isolante utilizado no TP
Fabricante Chapa Magnética	Fabricante da chapa magnética do núcleo do TP
Fabricante da Barra de Cobre	Fabricante das barras de cobre utilizadas no fabrico TP
Fabricante do Cabo Transposto	Fabricante do cabo transposto utilizado nos enrolamentos do TP
Fabricante do OLTC	Fabricante do comutador de tensão em carga

Fabricante dos Toros	Fabricante dos toros (transformadores de corrente)
Fabricantes das Travessias	Fabricante as travessias do TP
Fábrica responsável pela soldagem do TP	Fábrica que faz a soldagem do TP
Fabricante das <i>Shunts</i>	Fabricante das shunts (dispositivos utilizados para medir a corrente no circuito secundário do TP)
Fabricante do Balão	Fabricante do reservatório de óleo do TP
Tinta Interior	Marca da tinta utilizada no interior do TP
Indução	Refere-se à transferência de energia elétrica, por meio do fenómeno de indução entre os dois enrolamentos
Condutância (%)	Refere-se à medida da facilidade com que a corrente flui no TP
Corrente em vazio I_v	Refere-se à corrente que passa no primário do TP quando o secundário está em circuito aberto
Corrente nominal I_1 (A)	Corrente nominal no primário
Corrente nominal I_2 (A)	Corrente nominal no secundário
Patamar de Carga (%)	Nível de carga na qual o TP opera durante um maior número de horas
Patamar de Carga (%) superior a 80%	Identifica os TP submetidos a cargas superiores a 80%, durante mais de 20% do tempo

4.2 Seleção das variáveis alvo

O passo seguinte consistiu na seleção das variáveis alvo, ou seja, aquelas que se consideram com potencial influência no aparecimento do defeito. Com esse propósito, aplicaram-se dois testes estatísticos, o teste qui-quadrado e o teste t, o primeiro para identificar as variáveis categóricas, o segundo para identificar as variáveis numéricas. A partir deles foi possível avaliar se existe uma relação estatisticamente significativa entre as várias classes e o resultado em questão.

4.2.1 Teste *Chi-Square*

Na aplicação deste teste, criou-se uma tabela específica para cada uma das variáveis consideradas, tabela essa que apresenta uma análise cruzada das suas classes com a sinalização da presença ou não do defeito. Cada tabela é composta por quatro colunas, sendo as duas primeiras referentes aos dados observados e as duas últimas aos esperados. O *p-value* foi calculado com base na relação entre o número de transformadores observados e o número dos esperados, como está exposto na secção 3.2.1.1 e foi a partir desse cálculo que se identificaram as variáveis passíveis de exercerem influência no aparecimento do defeito. Escolheu-se um nível de significância de 5%, o que significa que quando o *p-value* for inferior a essa percentagem, há uma dependência entre as variáveis, pelo que a variável alvo é selecionada para análises subsequentes.

Com a aplicação deste teste pretende-se identificar, no conjunto de variáveis categóricas apresentadas na tabela 4.1, aquelas que possam ter uma relação estatisticamente significativa com o aparecimento do defeito térmico, ou seja, as que possam estar na origem desse defeito. Esta abordagem visa evitar a inclusão de variáveis irrelevantes em estudos posteriores. A partir da aplicação do teste, foram selecionadas as variáveis relativas aos fabricantes das travessias, cabo transposto e barra de cobre, a espessura da chapa magnética, a fábrica responsável pela soldagem do TP e o ano de fabrico, as quais são explicadas mais detalhadamente adiante.

Antes de prosseguir com a análise dos resultados obtidos, é importante fazer notar que, embora os dados fornecidos abrangessem os transformadores produzidos entre 2003 e 2019, foram excluídos os produzidos depois de 2014, decisão tomada conjuntamente com a equipa na qual este estudo foi realizado. A exclusão baseou-se no facto de os transformadores com data de fabrico posterior a esse ano serem demasiado recentes para terem desenvolvido o defeito térmico em questão. Assim, o universo de análise foi reduzido para um total de 88 transformadores.

4.2.1.1 Interpretação dos resultados

A seguir apresentam-se as tabelas que serviram de base ao cálculo do teste estatístico, bem como os gráficos que mostram a relação entre cada variável selecionada e a presença ou ausência do defeito.

Antes de prosseguir com a análise dos resultados obtidos, é crucial esclarecer como foi criada cada uma das tabelas apresentadas e de que forma elas se interpretam. Tomando como exemplo a variável "ano de fabrico", a tabela correspondente (4.2), que representa a distribuição dos TP pelo seu ano de fabrico, de acordo com a sinalização da presença ou não do defeito térmico, é composta por quatro colunas: as duas primeiras referentes aos dados observados e as duas últimas aos esperados. Cada registo da tabela (linha) representa uma classe específica da variável, neste caso, correspondendo a cada ano de fabrico dos transformadores.

- A primeira coluna indica o número de TP observados com ou sem o defeito para cada classe. Por exemplo, considerando o primeiro registo da tabela, verifica-se que dos TP fabricados em 2003, foram identificados 8 transformadores com o defeito térmico.

- A segunda coluna refere-se à percentagem de transformadores observada, calculada dividindo o número de TP observados em cada célula pelo total. Retomando o exemplo anterior, ao dividir os 8 transformadores observados pelos 88, determina-se que 9% dos transformadores em análise, foram fabricados em 2003 e apresentam defeito.
- A terceira coluna relativa aos dados esperados, representa a previsão teórica para a distribuição dos transformadores com base nos anos de fabrico. Voltando ao exemplo anterior, se não existisse qualquer tipo de relação entre a variável em análise ("ano de fabrico") e a presença ou ausência do defeito térmico, seria esperado que o número de TP com defeito fabricados em 2003 fosse 6 (4.1). Os dados esperados são uma estimativa teórica do que seria esperado ocorrer na ausência de qualquer associação entre a variável "Ano de Fabrico" e a ocorrência do defeito térmico, e podem ser calculados recorrendo às expressões expostas na secção 3.2.1.1.

$$NumeroTP(esperado) = \frac{TotalLinha(2003) \times TotalColuna(ComDefeito)}{(Total)} \quad (4.1)$$

- A última coluna da tabela refere-se à percentagem de transformadores expectável do cruzamento da variável em análise com o resultado, obtida através da divisão do valor esperado (obtido na coluna anterior) pelo total de transformadores (88). Considerando o exemplo dado, determina-se que, pela previsão teórica baseada na distribuição dos TP por ano de fabrico e pela presença/ausência do defeito, 7% do total de transformadores seriam fabricados em 2003 e apresentariam defeito.

Além dos quatro campos descritos anteriormente, a tabela também possui um campo adicional relativo ao índice de causalidade da classe, criado com o objetivo de avaliar quais as classes de uma variável que têm maior influência no aparecimento do defeito térmico. Considerando o exemplo em questão, com este índice pretende-se aferir em que anos se fabricaram mais transformadores com o defeito térmico. O cálculo desse índice pode ser realizado utilizando a expressão 4.3. Calculado este parâmetro para todas as classes, obtém-se o índice de causalidade da variável (4.4), que consiste no somatório dos I_{cc} calculados para cada classe, sendo que quanto maior for este indicador, maior será a influência dessa variável no problema em estudo.

$$I_{cc} = \max(\%observado - \%esperado, 0) \quad (4.2)$$

$$I_{cc} = \max(9\% - 7\%, 0) = 2\% \quad (4.3)$$

$$I_{cv} = \sum(I_{cc}) \quad (4.4)$$

A variável "ano de fabrico" não se refere apenas ao ano em que um transformador foi produzido, mas também engloba a possibilidade de diferentes fabricantes serem responsáveis pela produção dos componentes utilizados em cada transformador, dependendo do momento em que este foi fabricado. Cada empresa pode ter abordagens distintas em relação ao projeto, seleção de materiais, processos de fabricação e controlo de qualidade, o que pode conduzir a diferenças nas características e no desempenho dos componentes do transformador. Deste modo, existe a possibilidade de que o ano em que o equipamento foi fabricado tenha algum tipo de influência no aparecimento do defeito. Para compreender até que ponto esta relação existe, foi crucial realizar uma análise estatística detalhada, a fim de investigar se há evidências estatísticas que relacionem o ano de fabrico com a ocorrência de defeitos.

Nas figuras 4.2 e 4.3, que mostram o cruzamento entre o ano de fabrico e a ocorrência do defeito, é possível observar que em dois dos anos - 2005 e 2006 -, se registou uma incidência de defeitos superior à dos restantes. Esta constatação é reforçada pelo índice de causalidade da classe (I_{cc}), o qual confirma que os transformadores produzidos nesse período são mais suscetíveis ao desenvolvimento do defeito térmico em questão. Por fim, verificou-se que o p -value calculado (4%) é inferior ao nível de significância estabelecido, o que sugere que essa variável possui uma potencial influência no problema, tendo por isso sido selecionada para a análise subsequente.

Em suma, existem indícios que sustentam a hipótese de que a variável em análise, o ano de fabrico do transformador de potência, influencia o desenvolvimento do defeito térmico no equipamento. No entanto, para compreender a extensão dessa relação, é necessário realizar mais investigações.

Variável alvo		Ano de Fabrico							
Ano de Fabrico	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	
2003	2	8	2%	9%	4	6	4%	7%	1,9%
2004	10	6	11%	7%	6	10	7%	12%	0,0%
2005	0	10	0%	11%	4	6	4%	7%	4,1%
2006	0	9	0%	10%	3	6	4%	7%	3,7%
2007	2	7	2%	8%	3	6	4%	7%	1,4%
2008	4	3	5%	3%	3	4	3%	5%	0,0%
2009	5	7	6%	8%	4	8	5%	9%	0,0%
2010	1	2	1%	2%	1	2	1%	2%	0,1%
2012	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%
2013	5	2	6%	2%	3	4	3%	5%	0,0%
2014	3	1	3%	1%	1	3	2%	3%	0,0%
Total	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	12%
		88	100%		88		100%		

ICV	Teste Chi-square p-value
11,7%	0,0039

Figura 4.2: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o ano de fabrico, por aplicação do teste qui-quadrado

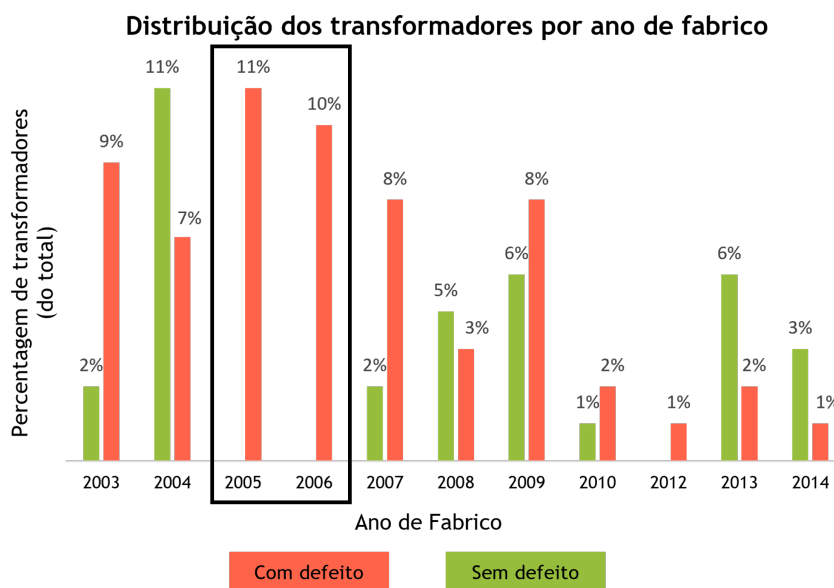


Figura 4.3: Distribuição dos transformadores por ano de fabrico

A empresa Thyssenkrupp Ele é responsável pelo fabrico da chapa magnética de todos os transformadores em análise, exceto de um na qual se recorreu ao fabricante Orb Electical S, o que significa que o fabricante deste componente não influencia a ocorrência do defeito. No entanto, é importante destacar que a espessura da chapa pode ter implicações significativas, nomeadamente na sua capacidade de suportar correntes magnéticas e dissipar o calor gerado durante o funcionamento do equipamento e na sua resistência mecânica. Tendo em conta que o defeito térmico ocorre devido a um sobreaquecimento no interior do TP e que a dimensão deste componente pode afetar a dissipação do calor, há a possibilidade de haver uma relação causa-efeito entre as duas variáveis. Para determinar a sua extensão, foi essencial realizar uma análise estatística abrangente que investigue se existe uma correlação estatisticamente significativa entre a espessura da chapa magnética e a incidência do defeito.

No que diz respeito à chapa magnética, constatou-se que mais de 50% dos defeitos identificados nos transformadores ocorreram naqueles em que essa componente tinha a espessura de 0,3mm, o que aponta para a existência de uma relação de causalidade, confirmada pelo parâmetro I_{cc} . Em contraponto, é muito reduzida a percentagem de ativos com defeito nos que possuem chapa magnética com espessura de 0,23mm. As conclusões obtidas a partir do teste estatístico aplicado, evidenciam a relevância desta variável para a análise do problema em estudo. O gráfico e a tabela relativos à análise desta variável encontram-se em 4.4 e 4.5, respetivamente.

Ao realizar a análise estatística, o teste demonstrou que há uma relação significativa entre as duas variáveis. Os resultados da análise estatística revelaram que a espessura de 0,3mm tem uma influência mais significativa no problema em questão. Esta constatação pode ser justificada pelo facto de que todos os transformadores de potência fabricados em 2005 e 2006, anos nos quais se verifica uma maior incidência do defeito, apresentarem esta espessura de chapa específica.

Variável alvo		Espessura da Chapa							
Espessura	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
0,23 mm	17	7	19%	8%	9	15	10%	17%	0,0%
0,3 mm	15	49	17%	56%	23	41	26%	46%	9,4%
Total	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	9,4%
	88		100%		88		100%		

ICV	Teste Chi-square p-value
9,4%	0,0000

Figura 4.4: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a espessura da chapa, por aplicação do teste qui-quadrado

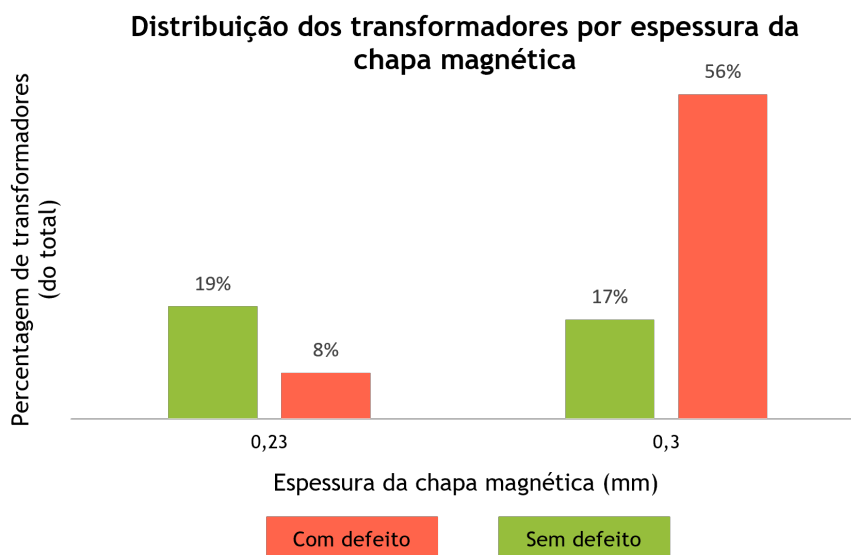


Figura 4.5: Distribuição dos transformadores por espessura da chapa magnética

Existem três fabricantes responsáveis pela produção das barras de cobre utilizadas nos enrolamentos do transformador de potência, sendo que cada um deles possui suas próprias especificações e processos de fabricação para este componente. Assim, diferenças nas características físicas e químicas das barras de cobre podem conduzir a uma maior suscetibilidade a defeitos, nomeadamente à libertação do gás etano no óleo isolante do transformador, característica de um defeito térmico de baixa temperatura. Para aferir se de facto existe alguma relação entre as diferentes barras de cobre e a presença ou não do defeito foi necessário analisar estatisticamente os dados disponibilizados, no sentido de perceber se há evidências para tal hipótese.

A relação entre os diferentes fabricantes da barra de cobre e a ocorrência do defeito está patente nas figuras 4.6 e 4.7, a partir das quais se verificou que os transformadores que possuem esse componente produzido pelas empresas Electromecanicas e Vicente Torns S. têm uma maior propensão para desenvolver o problema em questão. É de notar que o primeiro mencionado destaca-se

como sendo o mais problemático, uma vez que 13 transformadores de um total de 14 constituídos por esta barra apresentam o defeito térmico em questão.

Concluindo, o teste qui-quadrado revelou um *p-value* inferior ao nível de significância estabelecido, o que sugere que a variável em análise possui uma influência potencialmente significativa no resultado do estudo, pelo que será alvo de mais investigações.

Variável alvo		Fabricante da Barra de Cobre							
	Número de Transformadores (Observado)		% de Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% de Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com defeito	Sem Defeito	Com defeito	Sem Defeito	Com defeito	Sem Defeito	Com defeito	
Fabricante BC									
ABIEGA	5	2	6%	2%	3	4	3%	5%	0,0%
ELECTROMECHANICAS	1	13	1%	15%	5	9	6%	11%	5,0%
VICENTE TORN S.	25	38	30%	45%	23	40	28%	47%	0,0%
Total	31	53	37%	63%	31	53	37%	63%	5%
	84		100%		84		100%		

ICV	Teste Chi-Square
5,0%	p-value
	0,0105

Figura 4.6: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante da barra de cobre, por aplicação do teste qui-quadrado

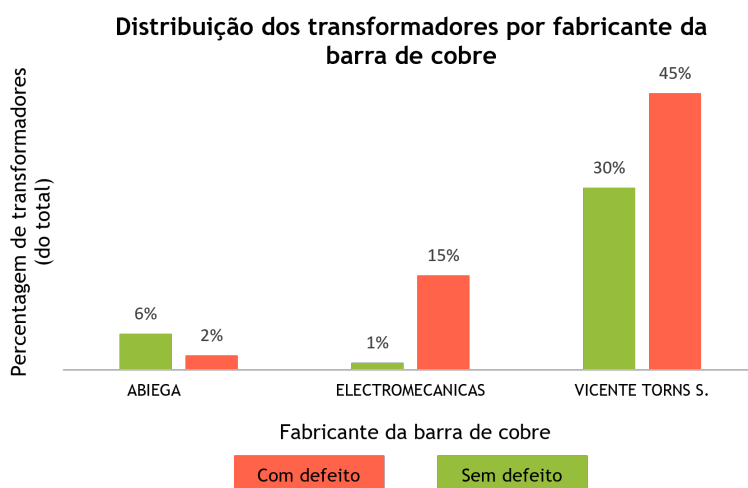


Figura 4.7: Distribuição dos transformadores por fabricante da barra de cobre

As travessias asseguram o isolamento entre a passagem dos condutores exteriores para os interiores de ligação aos enrolamento, sendo projetadas de forma a garantir o isolamento adequado entre os condutores e o óleo isolante. O problema identificado consiste num aumento da concentração de etano no óleo isolante, que está associado a um defeito térmico de baixa temperatura. Tendo em conta que existe um isolamento entre esse componente e o óleo e após consultar especialistas da área, considerou-se pouco provável que os fabricantes das travessias influenciem o defeito. No entanto, para uma avaliação mais precisa desta hipótese, foi necessário realizar testes estatísticos para determinar se existe uma correlação estatisticamente significativa entre o componente em questão e o defeito térmico.

Da análise dos dados referentes aos fabricantes das travessias, constatou-se que 80% dos transformadores possuem esse componente produzido pela empresa Trench France. Do conjunto referido, 60% apresentam o defeito térmico, o que conduziu à formulação da hipótese de uma possível relação entre essa variável e o problema. Para confirmar a tal possibilidade, foi aplicado um teste estatístico que indicou que há uma potencial associação entre essa variável em análise e o defeito identificado. Com base nesses resultados, a variável relativa aos fabricantes das travessias foi selecionada para uma análise mais aprofundada, a fim de investigar sua influência no desenvolvimento do defeito térmico. O estudo referido foi feito tendo por base as figuras 4.8 e 4.9.

Embora em termos construtivos não pareça haver grande relação entre as travessias e o óleo isolante que possam causar o problema identificado, o teste estatístico revelou que há uma relação significativa entre as duas variáveis. Apesar desta associação poder ser uma mera coincidência, decidiu-se seleccionar esta variável para estudos subsequentes.

Variável alvo		Fabricante das Travessias							
Fabricante das trav.	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	
ABB	8	5	9%	6%	5	8	5%	9%	0,0%
TRENCH FRANCE S.	24	51	27%	58%	27	48	31%	54%	3,7%
Total	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	3,7%
	88		100%		88		100%		

ICV	Teste Chi-square p-value
3,7%	0,0410

Figura 4.8: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante das travessias, por aplicação do teste qui-quadrado

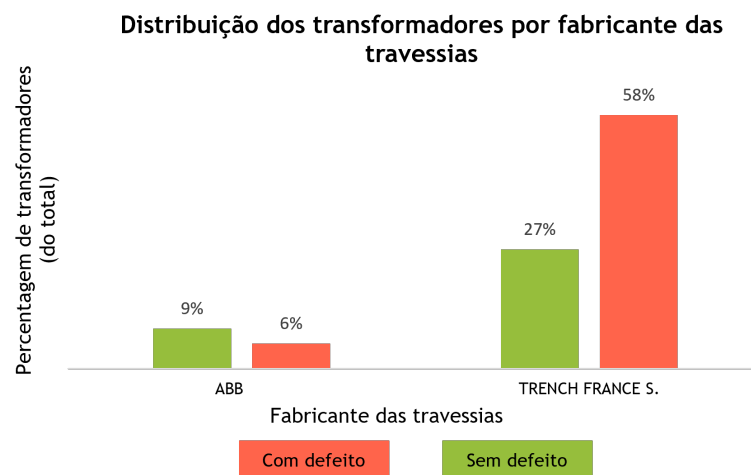


Figura 4.9: Distribuição dos transformadores por fabricante das travessias

O cabo transposto, composto por condutores interligados, pode ser fabricado por diversas empresas o que pode provocar diferenças nas características deste componente, que possivelmente afetam a condutividade elétrica, o isolamento e a resistência ao aquecimento. Além disso, a instalação inadequada do cabo transposto podem provocar pontos de alta resistência elétrica, resultando num aumento localizado da temperatura e um potencial defeito térmico de baixa temperatura.

Após a construção da tabela e dos gráficos (4.10 e 4.11) que cruzam a variável relativa aos fabricantes do cabo transposto com a presença ou ausência do defeito nos transformadores de potência (TP), foi observado que as empresas Essex Germany GM e Lacroix & Kress são responsáveis, conjuntamente, pela produção de aproximadamente 50% desses componentes. Dentre os transformadores com componentes por elas produzidos, cerca de 40% apresentam o problema em causa. Este facto pode ser verificado pelo índice de causalidade (ICC), que evidência uma influência positiva dessas classes no aparecimento do defeito. Adicionalmente, ao realizar o teste qui-quadrado, constatou-se que a variável em estudo poderá influenciar o resultado, sendo por isso selecionada para as análises que se seguem.

Tendo em conta toda a análise efetuada, considerou-se que esta variável poderá estar na origem do defeito, e por isso será alvo de investigações posteriores.

Variável alvo		Fabricante do Cabo Transposto							
Fabricante CT	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	
DRAAD NIJMEGEN B	12	8	15%	10%	7	13	9%	16%	0,0%
ESSEX GERMANY GM	4	15	5%	19%	7	12	9%	15%	3,8%
ESSEX ITALY S.P.	8	8	10%	10%	6	10	7%	13%	0,0%
LACROIX & KRESS	4	15	5%	19%	7	12	9%	15%	3,8%
SAM DONG INC.	1	4	1%	5%	2	3	2%	4%	1,1%
Total	29	50	37%	63%	29	50	37%	63%	8,6%
	79		100%		79		100%		

ICV	Teste Chi-square p-value
8,6%	0,0328

Figura 4.10: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante do cabo transposto, por aplicação do teste qui-quadrado

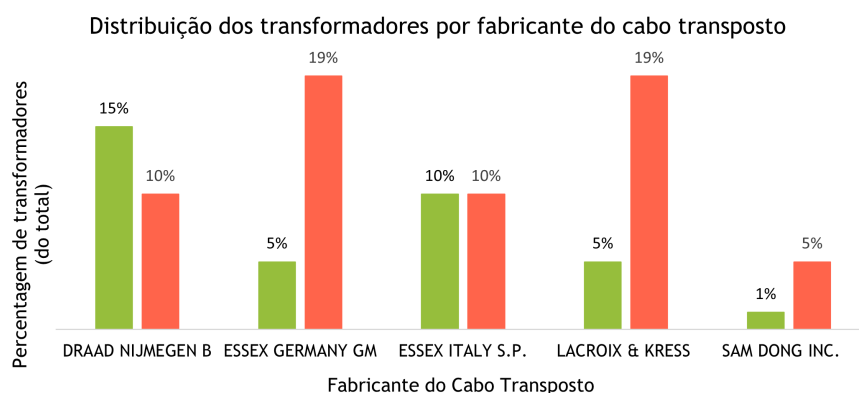


Figura 4.11: Distribuição dos transformadores por fabricante do cabo transposto

Um processo de soldagem deficiente pode causar contaminação do óleo isolante com impurezas, designadamente partículas metálicas ou resíduos de solda. Essas impurezas podem potenciar a degradação do óleo e contribuir para a formação de gases, incluindo o etano. Deste modo, caso alguma das fábricas responsável pela soldagem do TP não siga os procedimentos adequados do processo, poderá existir uma contaminação do óleo isolante e portanto foi importante analisar se de facto existe algum tipo de relação entre esta variável e o aparecimento do defeito.

O elevado número de classes constituintes da variável "fábrica responsável pela soldagem" dificultou a criação de um gráfico que fizesse a relação desta com problema em questão, pelo que o foco da análise recaiu sobre o índice de causalidade da classe (ICC), patente na tabela da figura 4.12. Durante o estudo, destacaram-se três classes, denominadas Caravela e Filhos, Mecver Mecanica e Metalongo-Metalú, por apresentarem uma percentagem de defeitos superior às restantes. Esta observação sugere que os transformadores de potência soldados por essas empresas específicas possuem uma maior incidência de defeitos térmicos.

Finalmente, o *p-value* obtido de 1% reforça a ideia de uma possível relação entre a fábrica responsável pela soldagem e a ocorrência do defeito, que deverá ser aprofundada com novos estudos.

Variável alvo		Fábrica Soldagem							
Fábrica	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	
CARAVELA & FILHO	0	6	0%	7%	2	4	3%	5%	2,6%
CERTISATA LDA	2	1	2%	1%	1	2	1%	2%	0,0%
F. M. CONDE, CON	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%
MECANIDRAULICA -	10	4	12%	5%	5	9	6%	11%	0,0%
MECANIDRAULICA I	1	2	1%	2%	1	2	1%	2%	0,1%
MECVER AMBIENTE,	3	7	4%	8%	4	6	4%	8%	0,8%
MECVER-MECANICA	1	9	1%	11%	4	6	4%	8%	3,2%
METALONGO-METALÚ	0	4	0%	5%	1	3	2%	3%	1,8%
METALURGICA PALM	4	0	5%	0%	1	3	2%	3%	0,0%
METLÓBAJOUCA-CON	2	2	2%	2%	1	3	2%	3%	0,0%
MONTALMAIA-MONTA	2	6	2%	7%	3	5	4%	6%	1,1%
ONIRAM-IND METAL	1	1	1%	1%	1	1	1%	2%	0,0%
PENIEL-METALOMECÂ	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%
PROZINCO-CONSTRU	2	5	2%	6%	3	4	3%	5%	0,7%
SERRALHARIA FONT	2	2	2%	2%	1	3	2%	3%	0,0%
STEELVER, LDA	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%
TEGOPI	0	2	0%	2%	1	1	1%	2%	0,9%
Total	31	53	37%	63%	31,00	53,00	37%	63%	12,1%
		84	100%		84	100%			

ICV	Teste Chi-square p-value
12,1%	0,0190

Figura 4.12: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a fábrica responsável pela soldagem, por aplicação do teste qui-quadrado

As variáveis analisadas nesta secção, designadamente as relativas aos fabricantes das travesias, cabo transposto e barra de cobre, a espessura da chapa magnética, a fábrica responsável pela soldagem do TP e o ano de fabrico, foram identificadas como relevantes para estudos subseqüentes, em particular para a aplicação da técnica de *datamining*, com o objetivo de explorar as associações entre as classes das seis variáveis selecionadas. Com esta análise, pretende-se averiguar se a combinação das variáveis referidas pode ter uma influência maior no resultado do que cada variável individualmente considerada.

Por outro lado, com a aplicação do teste estatístico e tendo por base os conceitos apresentados em 3.2 verificou-se que um conjunto de variáveis categóricas apresentava um *p-value* superior

ao nível de significância estabelecido (5%), o que indica que as variáveis em questão não possuem uma relação estatisticamente significativa com a presença/ausência do defeito. Além disso, algumas das variáveis, designadamente "fabricantes da chapa magnética" e "tinta interior", eram constituídas apenas por uma classe, pelo que não tinham qualquer tipo de influência no problema em questão.

Por essas razões, as variáveis apresentadas em 4.2 foram descartadas, não sendo consideradas na análise posterior. Ao eliminar estes fatores do conjunto de dados, o foco do estudo passa a incidir nas variáveis que apresentam um impacto estatisticamente relevante, permitindo uma análise mais precisa e direcionada aos fatores que realmente influenciam o resultado em questão.

As tabelas e gráficos sobre as variáveis que não foram selecionadas como potencialmente influentes podem ser consultadas no anexo A.3.

Tabela 4.2: Resumo da seleção as variáveis categóricas

Variáveis Categóricas Descartadas	Variáveis Categóricas Selecionadas
Subestação (SE)	Ano de fabrico
Concelho da SE	Fabricante do cabo transposto
Potência	Fabricante da barra de cobre
Relação de transformação	Espessura da chapa magnética
Tipo de óleo	Fábrica responsável pela soldagem
Grupo de ligação	Fabricante das travessias
Fabricante da chapa magnética	
Fabricante do OLTC	
Fabricante dos Toros	
Fabricante das shunts	
Fabricante do balão	
Tinta interior	
Condutância (%)	
Patamar de carga	
Patamar de carga superior a 80%	

4.2.2 Teste T

No sentido de determinar se alguma das variáveis numéricas tinha potencial influência no defeito em questão, procedeu-se à aplicação do método estatístico *T-Test*. Para tal, criou-se uma tabela com o cruzamento de cada uma das variáveis com a presença ou ausência do defeito, tendo em vista o cálculo do valor do teste estatístico. Considerando um limite para o valor crítico de 5%, constatou-se que o resultado do teste, calculado por meio da função T.TEST foi sempre superior ao critério definido, o que indica que não existe uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis em estudo e o defeito analisado. Em suma, não foram encontradas evidências estatísticas que sugiram uma influência das variáveis numéricas apresentadas na tabela 4.1 no aparecimento do defeito. A aplicação e resultados do método podem ser encontrados no anexo A.4 para consulta.

Tabela 4.3: Variáveis numéricas em análise

Variáveis numéricas	Resultado do teste (<i>p-value</i>)
Indução	11%
Corrente no vazio	18%
Corrente nominal I1	75%
Corrente nominal I2	73%

4.3 Aplicação de regras de associação

Após a identificação das variáveis alvo selecionadas a partir do teste *chi-square*, foi necessário proceder-se à eliminação de nove TP, que não possuíam todas as informações para a análise. Esse processo resultou num conjunto final de 79 transformadores, nos quais todas as células estavam completas. Esta fase de limpeza dos dados foi fundamental para garantir a qualidade e a consistência dos dados utilizados na análise subsequente. Na tabela 4.4, apresenta-se uma síntese das variáveis selecionadas.

Para a aplicação deste método às variáveis alvo previamente escolhidas, foi utilizada a linguagem de programação *Python* e o software Visual Studio Code como ambiente de desenvolvimento.

A implementação do algoritmo, patente no anexo A.5, foi realizada com o auxílio da biblioteca MLxtend, que fornece funcionalidades adicionais, facilitando não só a análise, mas também a execução do código. Para isso, bastou instalar o pacote necessário por meio do comando "pip install mlxtend" e importar os módulos pertinentes para o projeto. Esta abordagem permitiu a identificação de padrões e relações relevantes entre as variáveis estudadas.

Tabela 4.4: Tabela síntese das variáveis alvo selecionadas e respetivas classes

Variáveis Selecionadas	Classes de cada variável
Espessura da chapa magnética	0,23 mm 0,3mm
Fabricante da Barra de Cobre	Abiega Electromecanicas Vicente Torns S.
Fabricante do Cabo Transposto	Draad Nijmegen B Essex Germany GM Essx Italy S.P Lacroix Kress Sam Dong Inc.
Fabricante das Travessias	ABB. Trench France S.
Fábrica responsável pela soldagem do TP	Caravela Filho Certisata Lda F.M. Conde, COM Mecanidraulica I Mecanidraulica Mecver Ambiente Mecver Mecanica Metalongo- Metalú Metalúrgica Palm Metlóbajouca-Com Montalmaia-Monta Oniram-Ind Metal Pemel-Metalomecã Prozinco-Constru Serralharia Font Steelver, Lda Tegopi

Tal como foi explicado no capítulo anterior, para a execução do algoritmo é necessário a definir um suporte mínimo. Para o caso de estudo em questão, estabeleceu-se um limite de 5%, o que significa que as combinações de itens que aparecem com uma frequência inferior a 5% do total observações do conjunto de dados, não são consideradas relevantes e portanto são descartadas. Além disso, definiu-se ainda um *lift* mínimo de 1, que garante a seleção de associações relevantes e significativas entre os itens em análise. Com a definição destes dois limites, o algoritmo gerou um total de 170 associações, as quais são apresentadas no anexo A.5.

Considerando que o foco do caso de estudo é investigar se existe uma correlação entre os componentes do transformador e o defeito térmico identificado, o objetivo é identificar regras que sejam verificadas um número significativo de vezes na base de dados e que apresentem uma probabilidade relativamente alta, ou seja, o que se pretende é identificar padrões recorrentes e consistentes, que possam indicar uma relação robusta entre os componentes e o defeito térmico. Nesse sentido, foi estabelecida uma confiança mínima de 70%, o que significa que a probabilidade de ocorrer ou não o defeito, considerando a combinação das variáveis, deve pelo menos atingir essa

percentagem. Definiu-se ainda um critério adicional, em que foram consideradas apenas as regras que ocorressem em pelo menos 20% dos casos analisados. Esta restrição foi aplicada para garantir que as regras selecionadas fossem frequentes o suficiente para serem consideradas relevantes.

Tendo estes critérios em consideração, foram selecionadas as sete regras apresentadas na tabela 4.5, que serão analisadas na próxima secção.

Tabela 4.5: Resumo das regras de associação selecionadas

Regra	Antecedente	Consequente	Confiança	Suporte	Lift
1	(ESSEX GERMANY GM)	(Com defeito)	79%	19%	1.26
2	(ESSEX GERMANY GM, 0,3mm)	(Com defeito)	79%	19%	1.26
3	(ESSEX GERMANY GM, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	79%	19%	1.26
4	(ESSEX GERMANY GM, 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	79%	19%	1.26
5	(0,3mm)	(Com defeito)	75%	55%	1.20
6	(0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	75%	55%	1.20
7	(0,23mm)	(Sem defeito)	71%	19%	1.92

Antes de prosseguir com a análise das regras apresentadas na tabela, é importante esclarecer de que forma estas são interpretadas. Cada linha da tabela representa uma regra de associação, composta pelo antecedente (os itens ou condições iniciais) e o consequente (o resultado esperado). A partir do suporte, confiança e lift podemos obter informações relativas à frequência das combinações, à probabilidade condicional e à força da associação entre os elementos.

Assim, apresenta-se um breve exemplo explicativo para ilustrar o modo como se interpreta uma regra:

- **Regra 1** - A probabilidade de ocorrer um defeito térmico nos transformadores com o cabo transposto produzido por Essex Germany GM é de 79%, sendo que a associação entre as duas situações ocorre em 19% dos dados analisados. O lift de 1,26 revela que a consequência verificada é cerca de 1,26 vezes mais provável com este fabricante comparativamente com o ocorrência geral desse resultado no conjunto de dados.

4.4 Avaliação e interpretação dos resultados

Com esta análise pretendia-se identificar as regras com maior prevalência nos dados e as que tivessem uma elevada probabilidade de ocorrência, a fim de avaliar até que ponto o defeito térmico poderia estar associado aos/a certos fabricantes dos componentes internos do transformador. Ou seja, se com o cruzamento dos dois critérios fosse possível estabelecer uma correlação entre os fabricantes e o defeito, então surgiria a suspeita de existir algum tipo de problema no processo de fabrico do transformador.

Após a execução do processo descrito ao longo do capítulo, foi possível extrair um conjunto de sete regras nos termos dos critérios definidos, mas somente duas delas demonstraram uma frequência e probabilidade relativamente altas. Observou-se que quando a espessura da chapa magnética era de 0,3mm, ou quando esta estava associada ao fabricante das travessias Trench France, havia uma probabilidade de 75% de ocorrer o defeito térmico, associação que foi constatada em aproximadamente 55% dos dados analisados.

Tendo por base estas métricas, não há evidências suficientemente fortes para afirmar a existência de uma relação causa-efeito que justifique o problema em questão. Isto porque, embora se tivesse verificado a probabilidade de 75% de ocorrência de defeito térmico nos transformadores com chapa magnética de 0,3mm, tenham estes ou não travessias produzidas pelo fabricante Trench France, a verdade é que a associação entre as duas situações ocorreu em apenas cerca de 55% dos dados analisados. Esta constatação sugere uma possível tendência, mas não fornece uma base sólida o suficiente para afirmar categoricamente que o defeito térmico decorre da referida associação.

Em suma constatou-se que os dados disponibilizados pelo fabricante dos transformadores problemáticos não permitem concluir uma relação direta destes com o defeito interno. A falta de padrões claros e consistentes indica que, eventualmente, outras variáveis ou fatores não considerados podem concorrer para a ocorrência deste problema.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Correspondendo ao culminar do processo de pesquisa, o presente capítulo contém as respostas às questões de investigação enunciadas no início do projeto e o grau de concretização dos objetivos estipulados. Por outro lado, inclui ainda uma explicação sobre a utilidade do estudo realizado para a empresa com a qual foi desenvolvido, enfatizando a sua relevância prática e o seu impacto nas atividades organizacionais.

5.1 Resposta às questões de investigação

O ponto de partida do projeto são as questões formuladas no capítulo 1, cujas respostas foram obtidas com o desenvolvimento da investigação para se avaliar se o defeito térmico identificado num conjunto de transformadores AT/MT, produzidos por um determinado fabricante, advém de um problema de fabrico ou de fatores externos em contexto de funcionamento. São essas questões e respetivas respostas que a seguir se enunciam.

- **Quais as ferramentas, métodos e algoritmos de análise mais adequados para identificar padrões e relações entre as características dos transformadores e o defeito térmico?**

O primeiro passo consistiu em adquirir conhecimento teórico detalhado sobre o tipo de equipamento em avaliação, seguido da recolha de todos os dados relevantes dos transformadores que foram o foco do projeto. Posteriormente, passou-se à fase de elaboração da metodologia mais adequada para a análise da origem do defeito térmico.

Nessa metodologia, utiliza-se um processo de *data mining* para efetuar o tratamento do elevado volume de dados que normalmente é necessário considerar em estudos com muitas variáveis. Para identificar padrões e relações entre essas variáveis, aplicam-se testes estatísticos, como o *chi-square* e o teste T, com os quais é possível reconhecer as que, individualmente, têm relevância estatística no resultado, cuja fiabilidade pode ainda ser reforçada com a aplicação de indicadores de causalidade, pois estes favorecem a avaliação da influência das

variáveis equacionadas. Por outro lado, as regras de associação, baseadas no algoritmo *apriori*, permitem agrupar as diversas variáveis e compreender se, em conjunto, elas exercem alguma influência nos problemas identificados.

Esta abordagem favorece uma análise abrangente e sistemática dos dados, facilitando efetivamente a identificação de padrões e relações significativas entre as características dos transformadores e o defeito térmico.

- **Qual a aplicabilidade da metodologia proposta a diferentes contextos industriais?**

A aplicação da metodologia anteriormente descrita no estudo de situações em diversos ambientes industriais coloca exigências específicas, em função das tais situações e das características desses ambientes. As referidas exigências passam pelo conhecimento do contexto industrial específico e pela compreensão do problema sobre a qual incide a análise, pela identificação das variáveis relevantes, através de testes estatísticos e índices de causalidade e pela aplicação das regras de associação. No entanto, é importante considerar as características e os dados pertinentes em cada situação concreta, realizando os ajustes necessários para garantir a eficácia e aplicabilidade da metodologia.

- **É possível afirmar que o defeito identificado advém de um defeito no fabrico dos transformadores?**

Tendo em conta que 55% dos transformadores produzidos por este fabricante entre 2003 e 2014 apresentam índices anormais do defeito térmico, ainda que tenham sido instalados e operados da mesma forma que os transformadores de outros fabricantes, pode-se afirmar com elevada certeza que a origem do problema é um defeito de fabrico. No entanto, a análise das variáveis disponíveis não permitiu estabelecer uma relação causa-efeito entre as mesmas e o defeito em questão. A conclusão mais fidedigna aponta que o defeito foi especialmente incidente nos transformadores produzidos em 2005 e 2006, anos em que todos os transformadores exibiram anormalidades nos índices de análise de óleo.

- **Caso não se consiga confirmar a hipótese levantada pela E-REDES, quais são os próximos passos a serem levados a cabo pela empresa com base nos resultados e descobertas desta pesquisa?**

Embora não tenha sido possível comprovar uma relação clara e unívoca entre as características do transformador de potência fornecidas pelo fabricante e o defeito identificado, ter chegado a essa conclusão é igualmente importante, pois elimina a hipótese de uma relação entre os dados disponibilizados e o defeito térmico. Não sendo possível confirmar essa hipótese, um caminho a considerar é a realização de estudos adicionais, solicitando ao fabricante dados adicionais relativos a este conjunto de ativos e/ou recolha e análise de outras categorias de dados.

Em todo o caso, não se pode excluir totalmente a possibilidade de não se conseguir obter uma explicação definitiva para o defeito térmico dos transformadores em estudo. Se

isso acontecer, é importante analisar como lidar com esta questão, ou seja, como mitigar o problema e controlar sua progressão. O objetivo é tomar medidas para minimizar as consequências que esse defeito possa ter para rede elétrica e para a base de ativos da E-REDES, mesmo sem uma compreensão absoluta da sua causa.

5.2 Satisfação dos Objetivos

Conforme se referiu anteriormente, os transformadores AT/MT são ativos essenciais na rede de distribuição elétrica e como tal, requerem uma vigilância regular, nomeadamente através de ensaios elétricos e inspeções visuais. Dada a dificuldade de transporte destes ativos para manutenção em fábricas, pela sua grande dimensão, é muito preocupante que um grupo de transformadores do mesmo fabricante apresente o mesmo defeito, como acontece no caso em estudo na E-REDES. Daí a necessidade de determinar se esse problema decorre de um defeito de fabrico ou se existem outros fatores envolvidos, pois tal facto é essencial à adoção das medidas adequadas para garantir a fiabilidade daqueles ativos.

O principal objetivo da presente dissertação consiste no desenvolvimento de uma metodologia *data driven* para tratar os dados relativos a um grupo de transformadores considerados problemáticos pela empresa, com o intuito de estabelecer uma relação causa-efeito entre os seus componentes/características e o aparecimento do defeito térmico de baixa temperatura causado pelo aumento da concentração de gás etano no óleo isolante. O comportamento deste gás no grupo de transformadores identificados é substancialmente diferente em comparação com os restantes, e portanto pretende-se avaliar se esta subida da concentração do etano se deve a uma reação entre os componentes do interior do TP com o seu isolante líquido, ou se poderá de facto existir um defeito elétrico no seu interior, situação esta bastante mais preocupante para a E-REDES.

Para atingir o objetivo central da tese, foi essencial conhecer aprofundadamente o ativo em estudo e sua função na rede de distribuição elétrica, conhecimento esse que foi consolidado com visitas a subestações e à empresa responsável pelo fabrico do grupo de transformadores problemáticos. Durante essas visitas, foi possível observar o processo de produção destes equipamentos, observá-los em funcionamento e compreender a forma como operam na rede elétrica. Adicionalmente, foi conduzido um estudo sobre os modos de falha mais recorrentes neste género de equipamentos e foram ainda revistos os métodos mais utilizados no diagnóstico a sua condição. Este conhecimento teórico, patente no capítulo 2, foi fundamental para a posterior caracterização e análise dos transformadores da empresa, com foco especial nos considerados problemáticos. Com o conhecimento adquirido através da pesquisa bibliográfica, foi possível avançar para o desenvolvimento da metodologia, que foi dividida essencialmente em quatro fases: recolha dos dados, seleção das variáveis alvo, aplicação da técnica de *datamining* e análise dos resultados. Primeiramente, foram recolhidas as informações relevantes sobre o equipamento em questão, as quais passaram por um pré-processamento. Este processo incluiu a integração de dados de diferentes fontes numa única base de dados, a limpeza de informações inconsistentes ou duplicadas, bem como a padronização dos formatos de dados e a criação de variáveis relevantes para a análise subsequente.

Com a organização dos dados concluída, selecionaram-se então as potenciais variáveis-alvo, ou seja, aquelas que têm influência no aparecimento do defeito, a fim de evitar a incorporação de variáveis irrelevantes no modelo a ser desenvolvido posteriormente. A seleção foi realizada por meio da aplicação de métodos estatísticos, com o objetivo de testar a existência de uma relação entre cada variável e a ocorrência do defeito. Por fim, implementou-se uma técnica de *data mining*, designada regras de associação, com o intuito de encontrar associações relevantes entre as variáveis selecionadas previamente e o aparecimento do defeito. Todo este processo está descrito no capítulo 3.

Após aplicação da metodologia concebida, selecionaram-se 6 variáveis alvo relativas aos fabricantes das travessias, barra de cobre e cabo transposto, à espessura da chapa magnética, à fábrica responsável pela soldagem do transformador e ao seu ano de fabrico. Estas foram escolhidas com base nos resultados dos testes estatísticos, os quais apresentaram um *p-value*, medida que indica a probabilidade da relação entre duas variáveis ser aleatória, inferior ao nível de significância definido (5%). Essa constatação indicou a existência de uma possível relação entre essas variáveis e o resultado analisado, justificando a sua inclusão no estudo. Com as regras de associação, formuladas com base o algoritmo desenvolvido em *python*, pretendia-se identificar as regras mais frequentes nos dados e aquelas com alta probabilidade de ocorrência, a fim de investigar uma possível correlação entre fabricantes de componentes internos do transformador e o defeito térmico. Apesar de duas das regras demonstrarem frequência e probabilidade relativamente altas, indicando associações entre a espessura da chapa magnética de 0,3mm e o fabricante Trench France com o defeito térmico, a análise dos dados não forneceu evidências suficientemente fortes para afirmar uma relação causa-efeito. Essa constatação sugere uma possível tendência, mas a falta de padrões claros e consistentes indica que outros fatores construtivos, não detetáveis com a informação disponível, poderão ser a causa da anomalia.

Em suma, os dados analisados não permitiram afirmar a existência e uma relação direta entre os fabricantes de componentes e o defeito interno, deixando margem para se considerar a influência de outros fatores não identificados. Recorde-se que, durante o desenvolvimento do estudo, foram também estudadas variáveis relativas ao regime de operação do transformador, nomeadamente a indução, a corrente nominal e o seu regime de carga nos últimos oito anos. No entanto, estas foram descartadas na segunda fase da metodologia concebida, por não apresentarem relevância estatística. Esta conclusão assume uma importância significativa para a E-REDES, que pode agora descartar a hipótese inicialmente levantada e desbloquear recursos para investigações adicionais.

5.3 Utilidade do Trabalho Realizado

O processo de investigação, tal como está exposto e documentado nesta dissertação, tornou evidente que embora haja uma associação das componentes/características e regime de carga dos transformadores, concretamente produzidos pela empresa em questão, com o defeito térmico identificado, não é possível provar que a causa advém dos componentes analisados. Efetivamente, o estudo revelou que, o defeito aconteceu com maior incidência nos anos 2005 e 2006, porém, com

os dados disponibilizado pelo fabricante em causa, não é possível encontrar padrões claros e consistentes que provem que a causa do problema esteja num dos componentes estudados. Esta constatação indica que, possivelmente, outros fatores não considerados podem estar a contribuir para a ocorrência do problema em questão, talvez até em conjugação com aqueles em que incidiram as variáveis da investigação.

Durante o desenvolvimento deste estudo, a equipa de estratégia de gestão de ativos desempenhou um papel fundamental no processo de análise, cujo resultado permitiu desencadear ações adicionais no sentido de identificar a origem do problema verificado nos transformadores produzidos pela empresa em causa. Uma das medidas a ser adotada pela E-REDES consiste na extração do etano do óleo isolante do transformador, seguida da aditivação deste isolante líquido, com o objetivo de inibir a produção deste gás. Esta ação será contratualizada à Labelec, empresa responsável, entre outras funções, pela inspeção dos ativos do setor elétrico. Após a implementação desta medida, a equipa pretende estabelecer um programa de vigilância intensivo ao óleo, a fim de avaliar até que ponto se eliminou a produção do gás em questão. No caso de não se verificar uma reincidência do etano, a equipa irá avaliar as ações a serem realizadas relativamente aos restantes transformadores problemáticos. Se por outro lado, o problema se manifestar novamente, será necessário continuar com investigações adicionais a fim de compreender a origem do problema e adotar as medidas necessárias para garantir a eficiência e a fiabilidade destes ativos. Além disso, pode-se considerar também a solicitação de informações adicionais ao fabricante sobre estes transformadores em análise, nomeadamente especificações técnicas mais detalhadas, histórico de produção e testes realizados. Estas ações conduzirão certamente a um melhor entendimento do problema ou pelo menos à despistagem de mais alguns fatores passíveis de serem considerados causas do defeito térmico.

Em conjunto com a equipa que promoveu a presente dissertação foi possível compreender que a análise efetuada foi fundamental para desbloquear o processo de decisão sobre as ações futuras a realizar neste conjunto de transformadores. Na realidade, o facto de estar estatisticamente demonstrada a não causalidade entre as características/componentes dos TP fornecidas pelo fabricante e a subida anormal do gás etano contribui de forma decisiva para suportar a decisão de prosseguir com as investigações, e disponibilizar os recursos financeiros e humanos necessários para o efeito.

A metodologia desenvolvida para o tratamento dos dados neste projeto pode ser adaptada e aplicada a outras situações semelhantes, constituindo por isso uma vantagem estratégica para a empresa na investigação de problemas análogos ao que foi objeto deste estudo. Ao estabelecer uma abordagem *data driven*, que facilita a exploração de relações e padrões anteriormente desconhecidos em grandes conjuntos de dados, a metodologia é um processo sólido e fiável para processamento e análise de dados na avaliação de problemas em diversos contextos industriais. A sua adaptabilidade permite que seja eficaz na deteção e prevenção de situações idênticas ao desta investigação em outros equipamentos ou processos.

Anexo A

Anexos

A.1 Anexo 1 - Distribuição geográfica dos transformadores AT/MT

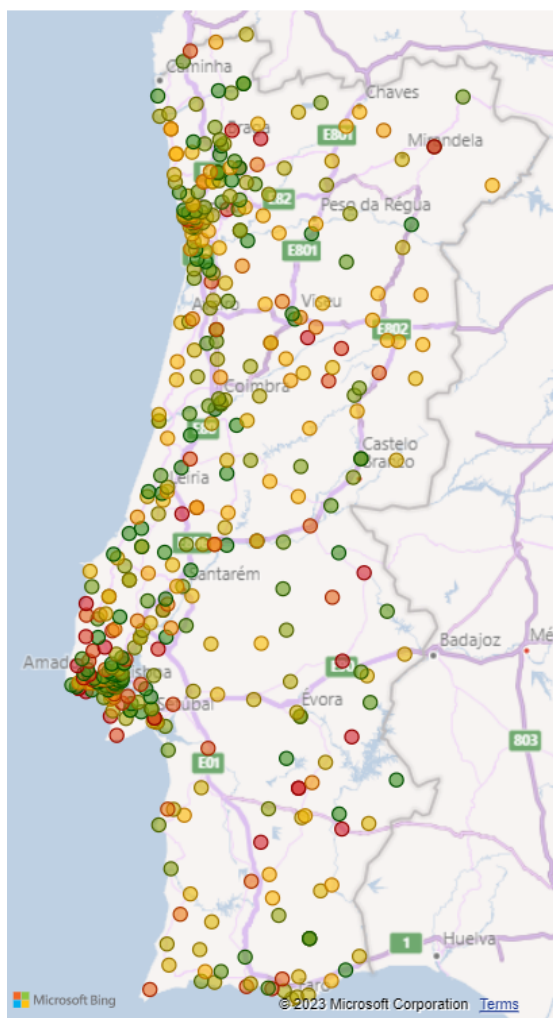


Figura A.1: Mapa da distribuição geográfica dos transformadores AT/MT

A.2 Anexo 2 - Estrutura de Metadados

Variáveis alvo	Descrição	Tipo de dados	Classes	Ficheiro
Número de Série	Identificador único atribuído ao TP durante o seu processo de fabrico	alfa numérico	múltiplas (ex: C 002 A)	
SAP ID	Chave única atribuída ao TP, que dá acesso a informações relativas ao seu cadastro	numérico	múltiplas	
Presença de Defeito	Indica se o transformador em questão apresenta o defeito térmico	texto	Com defeito Sem defeito	
Subestação (SE)	Subestação onde o TP está instalado	texto	múltiplas	
Conceito da SE	Localização da subestação	texto	múltiplas	
Ano de Fabrico	Ano em que o TP foi produzido	numérico	2003-2019	
Potência (MVA)	Potência nominal do TP	numérico	20 25 30 31.5 40 (MVA) 60 15,75kV 60 31,5/10,5kV 60 31,5/15,75kV 60 31,5 kV	
Relação de Transformação (kV)	Relação entre a tensão do primário e do secundário do TP	numérico		
Grupo de ligação	Configuração específica dos terminais do condutor de tensão utilizado no TP	texto	YNd YNd11 YNd5 YNy0-d YNy0d11	
Espessura da Chapa Magnética (mm)	Espessura da chapa magnética utilizada no núcleo do TP	numérico	0,23mm 0,3mm	
Tipo de óleo	Tipo de óleo isolante utilizado no TP	texto	Nyro Taurus Nyro 11 EN	
Fabricante Chapa Magnética	Fabricante da chapa magnética do núcleo do TP	texto	THYSSENVORP ELE ON8 Electrical S	
Fabricante da Barra de Cobre	Fabricante das barras de cobre utilizadas no fabrico TP	texto	Abrega Eletronadinas Vicente Tora S Asia Elektrodan Driad Nunegen B Essex Germany Gd Essex Italy S.p. Lacroix & Jress Sam Dong Inc.	Características Fabrico
Fabricante do Cabo Transporte	Fabricante do cabo transporte utilizado nos enrolamentos do TP	texto	Maschinenfabrik Reinhausen Luxem Shanghai	
Fabricante do OLTC	Fabricante do condutor de tensão em carga	texto	Huang	
Fabricante dos Toros	Fabricante dos toros (transformadores de corrente)	texto	Eleg B.V. ITL Weidmann Electri	
Fabricantes das Travesseiras	Fabricante as travesseiras do TP	texto	ABB Trench France S.	
Fábrica responsável pela soldagem do TP	Fábrica que faz a soldagem do TP	texto	múltiplas classes	
Fabricante das Shunts	Fabricante das shunts (dispositivos utilizados para medir a corrente no circuito secundário do TP)	texto	COMEP - EQUIPAM COMEP - MOIDES	
Fabricante do Balão	Fabricante do reservatório de óleo do TP	texto	Musthare SA Pronal S.A	
Tinta Interior	Tinta utilizada no interior do TP	texto		
Indução	refere-se a transferência de energia elétrica, por meio do fenómeno de indução entre os dois enrolamentos	numérico	CIN 25-208-0501 CIN 7h-750-0501 HEMPEL	
Condutância (S)	Refere-se à medida da facilidade com que a corrente flui no TP	numérico	múltiplas classes (17)	
Corrente em vazio Iv (A)	Refere-se à corrente que passa no primário do TP quando o secundário está em circuito aberto	numérico	0,1 0,2 0,3	
Corrente nominal I (A)	Corrente nominal no primário	numérico	múltiplas multiplik	

Figura A.2: Estrutura de metadados criada

Variáveis alvo	Descrição	Tipo de dados	Classes	
Corrente em vazio Iv (A)	Refere-se à corrente que passa no primário do TP quando o secundário está em circuito aberto	numérico	múltiplas	
Corrente nominal I1 (A)	Corrente nominal no primário	numérico	múltiplas	dados_carga
Corrente nominal I2 (A)	Corrente nominal no secundário	numérico	múltiplas	
Palamar de Carga (%)	Nível de carga na qual o TP opera durante um maior número de horas	numérico	[0-10], [10-20], [20-30], [30-40], [40-50]	
%Gás	porcentagem de gás presente no óleo	numérico	múltiplas	
H2	concentração de hidrogênio no óleo	numérico	múltiplas	
CH4	concentração de metano no óleo	numérico	múltiplas	
C2H4	concentração de etileno no óleo	numérico	múltiplas	
C2H6	concentração de etano no óleo	numérico	múltiplas	
C2H2	concentração de acetileno no óleo	numérico	múltiplas	
CO	concentração de monóxido de carbono no óleo	numérico	múltiplas	DGA-vigilância_óleo
CO2	concentração de dióxido de carbono no óleo	numérico	múltiplas	
O2	concentração de oxigênio no óleo	numérico	múltiplas	
N2	concentração de nitrogênio no óleo	numérico	múltiplas	
Temp Óleo (°C)	Temperatura do óleo isolante	numérico	múltiplas	
Data da última regeneração do óleo	-	numérico	1998-2022	

Figura A.3: Estrutura de metadados criada - continuação

A.3 Anexo 3 - Aplicação do teste *chi-square* às variáveis categóricas não selecionadas

Variável alvo		Grupo de ligação								
Grupo de ligação	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC	
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito	
	YNd11	4	15	5%	17%	7	12	8%	14%	3,3%
	YNd5	20	28	23%	32%	17	31	20%	35%	0,0%
	YNyn0+d	5	6	6%	7%	4	7	5%	8%	0,0%
	YNyn0d11	3	7	3%	8%	4	6	4%	7%	0,7%
	Total	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	4,0%
	88		100%		88		100%			
				ICV	Teste Chi-square p-value					
				4,0%	0,3801					

Figura A.4: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o grupo de ligação, por aplicação do teste qui-quadrado

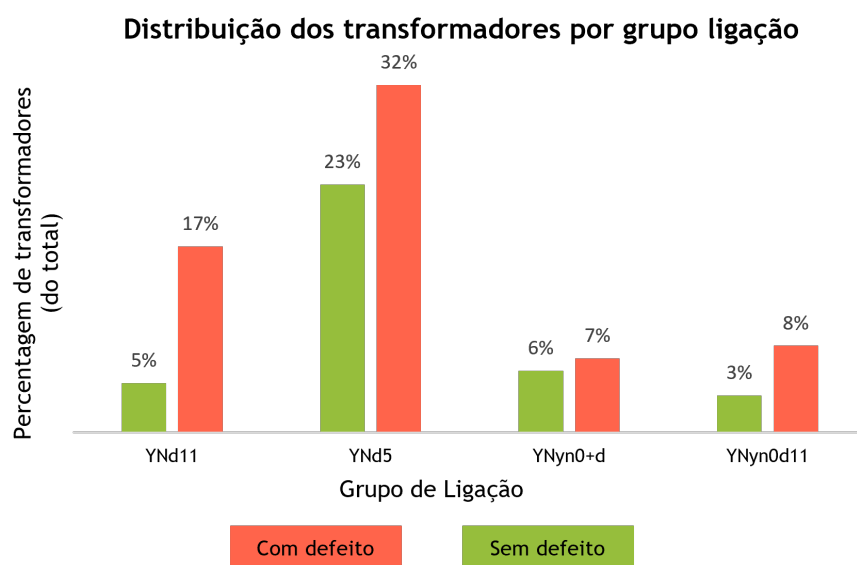


Figura A.5: Distribuição dos transformadores por grupo de ligação

Variável alvo		Potência							
Potência	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
	2	3	2%	3%	2	3	2%	4%	0,0%
	27	51	31%	58%	28	50	32%	56%	1,5%
	3	2	3%	2%	2	3	2%	4%	0,0%
	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	1,5%
	88		100%		88		100%		
		ICV		Teste Chi-square p-value					
		1,5%		0,5120					

Figura A.6: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a potência, por aplicação do teste qui-quadrado

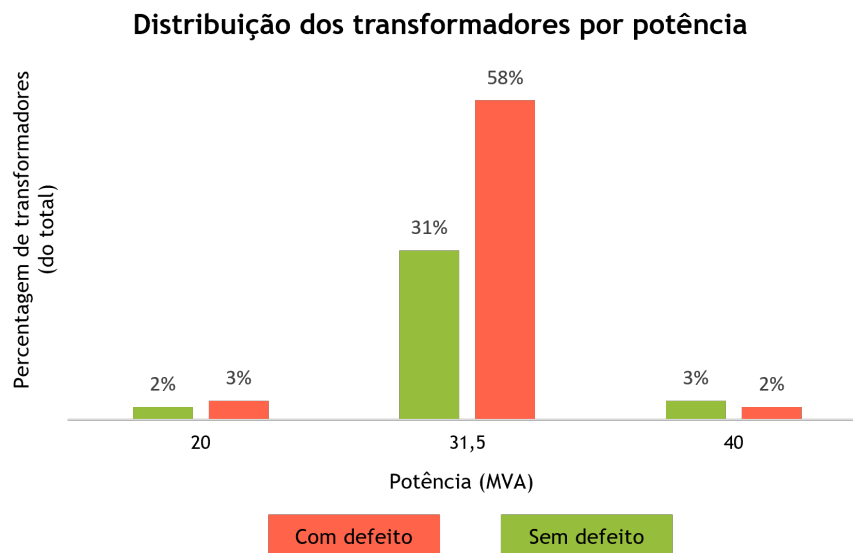


Figura A.7: Distribuição dos transformadores por potência

Variável alvo	Relação de Transformação								
Relação	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
60 OLTC / 15,75 kV	20	41	23%	47%	22	39	25%	44%	2,5%
60 OLTC / 31,5 / 10,5 kV	6	4	7%	5%	4	6	4%	7%	0,0%
60 OLTC / 31,5 / 15,75 kV	2	5	2%	6%	3	4	3%	5%	0,6%
60 OLTC / 31,5 kV	4	6	5%	7%	4	6	4%	7%	0,0%
Total	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	3,1%
	88		100%		88		100%		
	ICV				Teste Chi-square p-value				
	8,1%				0,3928				

Figura A.8: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a relação de transformação, por aplicação do teste qui-quadrado

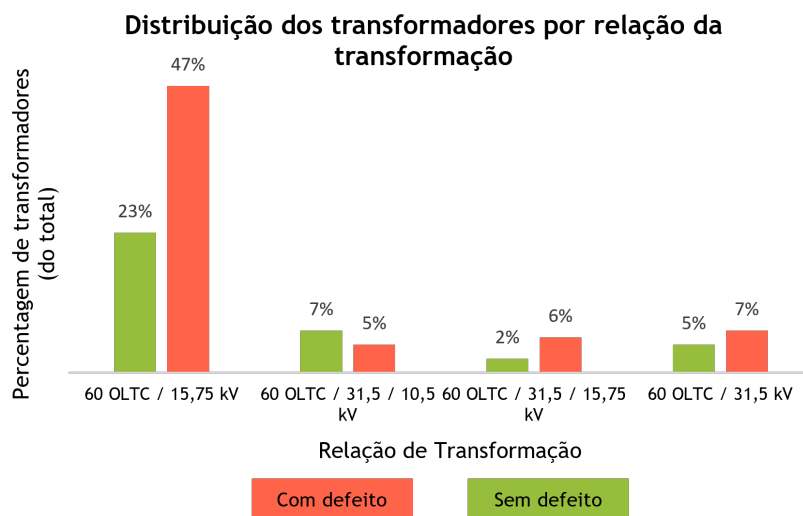


Figura A.9: Distribuição dos transformadores por relação de transformação

Variável alvo		Tipo de Óleo							
Tipo de Óleo	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
	15	36	17%	41%	19	32	21%	37%	4,0%
	17	20	19%	23%	13	24	15%	27%	0,0%
	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	4,0%
	88		100%		88		100%		

Variável alvo		Fabricante da Chapa Magnética							
Fabricante CM ORB ELECTRICAL S THYSSENKRUPP ELE Total	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%
	32	55	36%	63%	32	55	36%	63%	0,0%
	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	0,4%
88		100%		88		100%			
				ICV		Teste Chi-square p-value			
				0,4%		0,4471			

Figura A.12: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante da chapa magnética, por aplicação do teste qui-quadrado

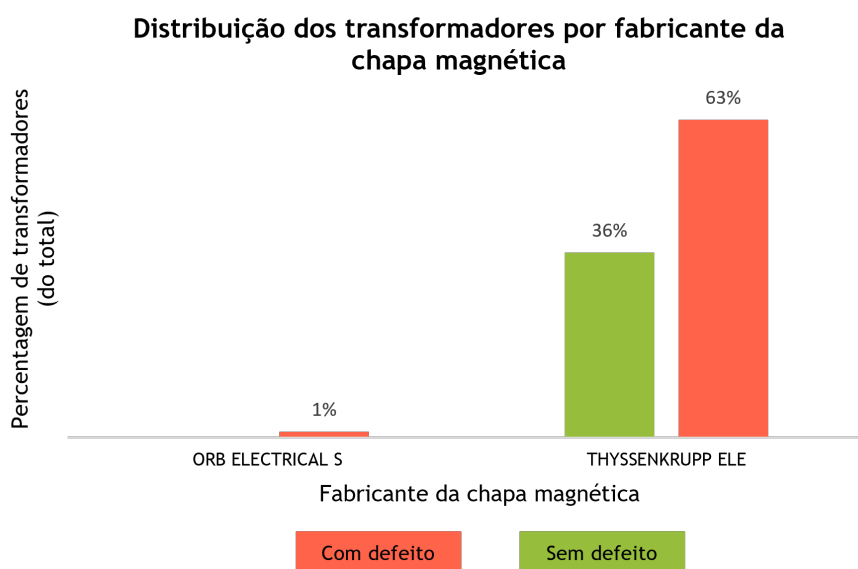


Figura A.13: Distribuição dos transformadores por fabricante da chapa magnética

Variável alvo		Fabricante do OLTC (Comutador de Tensão em Carga)							
Fabricante do OLTC	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
MASCHINENFABRIK	23	47	27%	56%	26	44	31%	53%	3,4%
REINHAUSEN LUXEM	8	5	10%	6%	5	8	6%	10%	0,0%
SHANGHAI HUAMING	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%
Total	31	53	37%	63%	31	53	37%	63%	3,8%
	84		100%		84		100%		

	ICV	Teste Chi-square p-value
	3,8%	0,1072

Figura A.14: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante do comutador de tensão em carga (OLTC), por aplicação do teste qui-quadrado

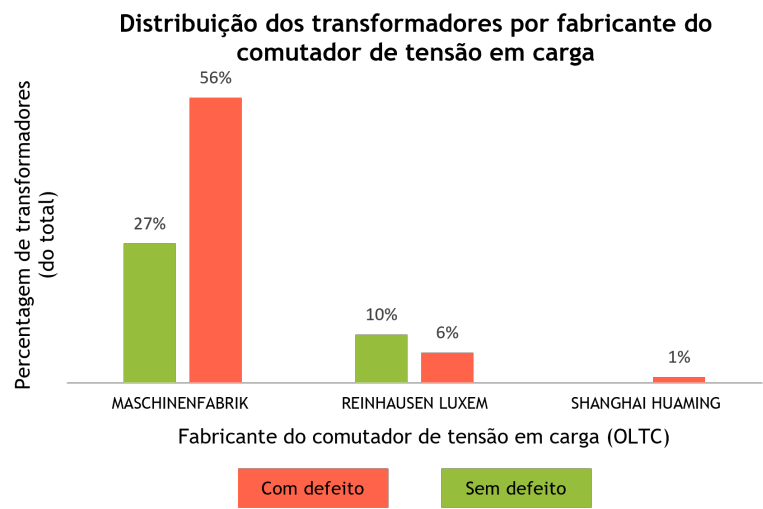


Figura A.15: Distribuição dos transformadores por fabricante do comutador de tensão em carga (OLTC)

Variável alvo	Fabricante das Shunts								
Fabricante Sunts COMEIP - EQUIPAM COMEIP - MOLDES Total	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
	5	3	6%	4%	3	5	4%	7%	0,0%
	23	47	29%	60%	25	45	32%	58%	2,7%
	28	50	36%	64%	28	50	36%	64%	2,7%
	78		100%		78		100%		
			ICV		Teste Chi-square				
			2,7%		p-value				
					0,0978				

Figura A.16: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e o fabricante das shunts, por aplicação do teste qui-quadrado

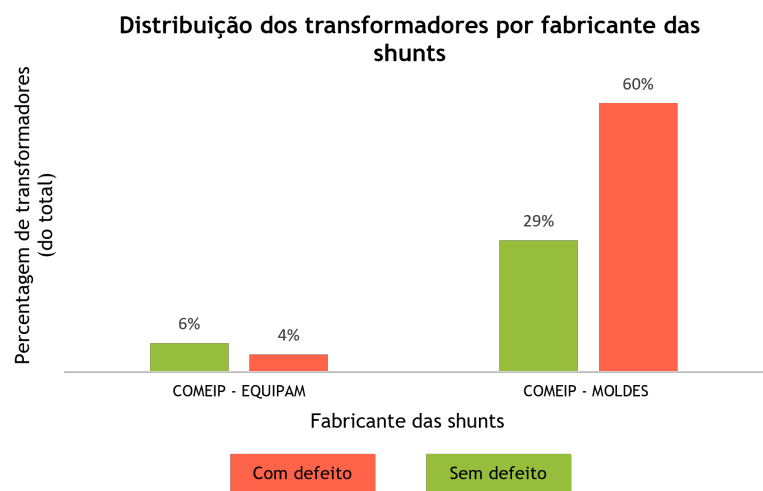


Figura A.17: Distribuição dos transformadores por fabricante das shunts

Variável alvo	Fabricante Toros								
Fabricante Toros ELEQ B.V. ITL WEIDMANN ELECTRI Total	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
	5	7	6%	8%	4	8	5%	9%	0,0%
	25	40	30%	48%	24	41	29%	49%	0,0%
	1	6	1%	7%	3	4	3%	5%	1,9%
	31	53	37%	63%	31	53	37%	63%	1,9%
	84		100%		84		100%		

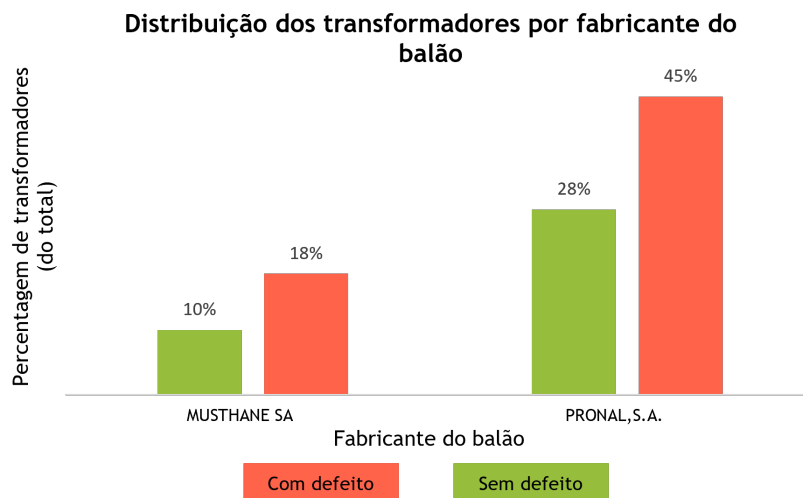


Figura A.21: Distribuição dos transformadores por fabricante do balão

Variável alvo		Tinta Interior								
Tinta	CIN 25-208-0501	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
		Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Com Defeito
		32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	0,0%
Total		32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	0,0%
		88		100%		88		100%		

Variável alvo		Condutância							
Condutância	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	
0,01	15	28	17%	32%	16	27	18%	31%	0,7%
0,02	17	27	19%	31%	16	28	18%	32%	0,0%
0,03	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%
Total	32	56	36%	64%	32	56	36%	64%	1,1%
		88			100%			88	100%
				ICV	Teste Chi-square		p-value		
				1,1%			0,7011		

Figura A.24: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e a condutância, por aplicação do teste qui-quadrado

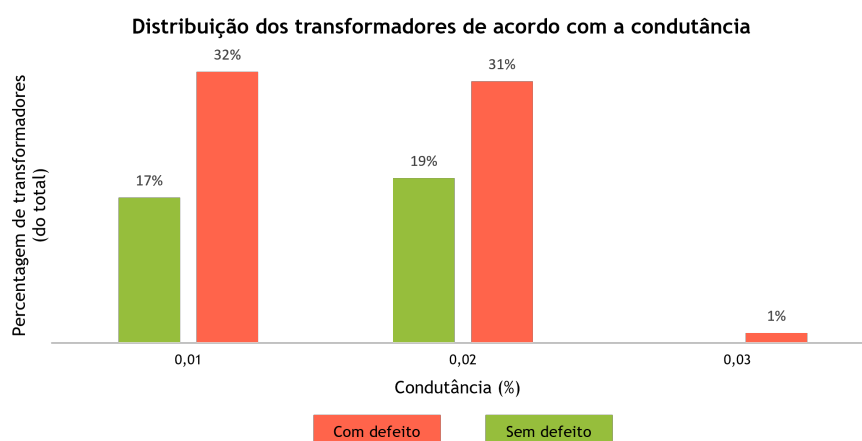


Figura A.25: Distribuição dos transformadores de acordo com a condutância

Variável alvo		Patamar de carga							
Patamar	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC
	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	
[0-10]	1	3	1%	4%	1	3	2%	3%	0,5%
[10-20]	11	19	13%	23%	10	20	12%	23%	0,0%
[20-30]	14	22	17%	26%	12	24	15%	28%	0,0%
[30-40]	3	8	4%	10%	4	7	5%	9%	0,9%
[40-50]	0	3	0%	4%	1	2	1%	2%	1,2%
Total	29	55	35%	65%	29	55	35%	65%	3%
		168			100%				
				ICV	Teste Chi-square		p-value		
				2,6%			0,6694		

Figura A.26: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e carga à qual o TP se encontra submetido um maior número de horas, por aplicação do teste qui-quadrado

Variável alvo	Concelho onde está localizada a subestação									
	Número de Transformadores (Observado)		% Transformadores (Observado)		Número de Transformadores (Esperado)		% Transformadores (Esperado)		ICC	
Concelhos	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito	Sem Defeito	Com Defeito
Albufeira	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Alcobaga	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Alenquer	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Almada	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Aveiro	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Barcelos	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Batalha	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Braga	2	0	2%	0%	1	1	1%	1%	0,0%	
Cartaxo	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Coimbra	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Evora	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Faro	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Felgueiras	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Figueira da Foz	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Ilhavo	2	0	2%	0%	1	1	1%	1%	0,0%	
Lagos	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Leiria	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Loulé	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Loures	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Lousada	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Marinha Grande	3	0	3%	0%	1	2	1%	2%	0,0%	
Matosinhos	3	1	3%	1%	1	3	2%	3%	0,0%	
Miranda do Corvo	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Mirandela	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Moimenta da Beira	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Moita	1	1	1%	1%	1	1	1%	1%	0,0%	
Montijo	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Oliveira de Azeméis	0	3	0%	3%	1	2	1%	2%	1,2%	
Óvar	1	2	1%	2%	1	2	1%	2%	0,1%	
Paços de Ferreira	1	1	1%	1%	1	1	1%	1%	0,0%	
Paredes	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Penafiel	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Portimão	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Santa Maria da Feira	4	0	5%	0%	1	3	2%	3%	0,0%	
Santarém	1	1	1%	1%	1	1	1%	1%	0,0%	
Serpa	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Sesimbra	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Setúbal	1	3	1%	3%	1	3	2%	3%	0,5%	
Sines	1	1	1%	1%	1	1	1%	1%	0,0%	
Tondela	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Trofa	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Valongo	0	3	0%	3%	1	2	1%	2%	1,2%	
Viana do Alentejo	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Viana do Castelo	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Vila do Conde	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Vila Franca de Xira	1	1	1%	1%	1	1	1%	1%	0,0%	
Vila Nova de Famalicão	1	2	1%	2%	1	2	1%	2%	0,1%	
Vila Nova de Gaia	0	2	0%	2%	1	1	1%	1%	0,8%	
Vila Real	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Vila Verde	0	1	0%	1%	0	1	0%	1%	0,4%	
Viseu	1	0	1%	0%	0	1	0%	1%	0,0%	
Total	31	56	36%	64%	31	56	36%	64%	18,3%	
	87		100%		87		100%			

ICV	Teste Chi-square
18,3%	p-value
	0,1010

Figura A.29: Avaliação da relação entre a ocorrência do defeito e concelho da subestação onde o TP está instalado, por aplicação do teste qui-quadrado

A.4 Anexo 4 - Aplicação do teste T às variáveis numéricas

Variáveis em análise							
Indução		Corrente no vazio		Corrente nominal I1		Corrente nominal I2	
TP com defeito	TP sem defeito	TP com defeito	TP sem defeito	TP com defeito	TP sem defeito	TP com defeito	TP sem defeito
1,6447	1,6839	0,69	1,34	303	386	1466	1466
1,6839	1,6447	1,34	2,12	386	303	577,3	1155
1,635	1,635	2,1	2,1	303,1	303,1	1155	577,3
1,6927	1,7071	2,12	1,32	303	303	577,4	1155
1,635	1,7071	1,8	1,24	303,1	303	577,4	1155
1,635	1,7071	0,4	0,32	303,1	303	577,3	1155
1,708	1,7071	1,08	1,03	303,1	303	579	1155
1,7033	1,7071	4,25	0,32	303,1	303	366,6	1155
1,6447	1,7071	0,86	1,15	192,3	303	366	1155
1,6447	1,6339	0,38	0,78	134,8	302,9	1155	577,4
1,6927	1,7071	2,12	3,4	303	303	1155	1155
1,7071	1,7071	1,39	1,28	303	303	577,4	1155
1,58	1,6185	0,42	1,08	303,1	303,1	1155	577,3
1,58	1,58	0,32	1,12	303	303,1	1155	1155
1,58	1,5321	0,69	1,5	303	303,2	1155	577,4
1,58	1,5321	1,06	2,4	303	303,2	1155	577,4
1,58	1,5321	0,64	1,8	303	303,2	1155	577,4
1,58	1,58	1,19	2,1	303	303	1155	1180
1,58	1,58	1,23	1,28	303	303,1	1155	1155
1,58	1,5119	1,3	0,35	303	303,1	1155	577,4
1,58	1,6839	3,4	1,03	303	384,9	1155	1466
1,58	1,6839	2,5	1,03	303	384,9	1155	1466
1,6185	1,7173	1,04	1,7	303	303,1	1155	1100
1,6185	1,5119	1,04	1,4	303	303,1	577,3	577,4
1,58	1,5751	1,18	0,38	303,1	303,1	577,3	1155
1,635	1,5751	1,16	0,38	303,1	303,1	1155	1155
1,58	1,5751	2,8	0,77	330	303,1	577,3	1155
1,58	1,5751	1,68	0,71	303,1	303,1	1155	1155
1,58	1,5751	0,7	0,68	303,1	303,1	1155	577
1,58	1,686	1,8	0,38	303,1	192,5	1155	343,7
1,58	1,686	1,04	0,38	303	134,7	1155	256,6
1,58	1,686	0,06	0,38	303	303,1	1155	577,4
1,58	1,4803	2,04	2,5	303	303,1	1155	1155
1,58	1,6235	0,64	0,38	303,1	303,1	1150	1155
1,58	1,714	1,3	1,38	303	303,1	1155	1155
1,58	1,6705	1,8	1,38	303,1	303,1	1155	1155
1,58		1,2		303,1		1155	
1,58		0,32		303		1155	
1,58		1,38		303,1		1155	
1,58		1,4		303,1		1155	
1,58		2,1		303,1		1155	
1,58		1,87		303,1		1155	
1,58		1,84		303,1		1155	
1,58		0,18		303,1		1155	
1,58		0,18		303,1		1155	
1,58		18,19		303,1		1155	
1,58		18,19		303,1		1155	
1,6839		0,65		303,1		1155	
1,5146		1,38		303,1		1466	
1,5146		1,15		384,9		577,4	
1,58		0,38		303,1		577,4	
1,5751		0,44		303,1		1155	
1,5751		0,38		303,1		1155	
1,7071		0,66		303,1		1155	
1,7071		2,04		303,1		367	
1,7071		1,23		192,5		367	

Figura A.30: Tabela construída para a aplicação do teste T

	Resultado do teste para cada variável			
	Indução	Corrente no vazio	Corrente nominal I1	Corrente nominal I2
<i>p-value</i>	11%	18%	75%	73%

Figura A.31: Resultado da aplicação do teste *T*

A.5 Anexo 5 - Aplicação das Regras de Associação

```
# Importa a biblioteca pandas, com o nome pd
import pandas as pd

# Importa a função TransactionEncoder da biblioteca mlxtend - módulo preprocessing
from mlxtend.preprocessing import TransactionEncoder

# Importa as funções apriori e association rules da biblioteca mlxtend - frequent_patterns
from mlxtend.frequent_patterns import apriori, association_rules

# Lê o ficheiro de dados
data = pd.read_excel('C:/Users/Asus/OneDrive - Universidade do Porto/5ºANO/E-REDES/Estágio/AssociationRules/VariáveisAlvo/Dados.xlsx', dtype='category')

# Converte a tabela de dados no formato correto (lista de listas)
data = data.values.tolist()
for row in data:
    print(row)

# Converte os dados numa matriz booleana
te = TransactionEncoder()
data = te.fit_transform(data)
data = pd.DataFrame(data, columns=te.columns_)
print(data)

# Extrai itemsets frequentes com um dado o suporte mínimo definido e calcula o suporte de cada itemset
frequent_itemsets_named = apriori(data, min_support=0.05, use_colnames=True)
print(frequent_itemsets_named)

# Gera regras de associação a partir dos conjuntos itemsets criados(frequent_itemsets_named) e calcula os parâmetros para análise
rules = association_rules(frequent_itemsets_named, metric='lift', min_threshold=1)
rules_str = rules.to_string()

# Escreve as regras de associação finais no ficheiro de texto Regras.txt
with open('Regras.txt', 'w') as file:
    file.write(rules_str)
```

Figura A.32: Implementação do algoritmo que permitiu a extração das regras de associação

	Antecedente	Consequente	Confiança	Suporte	Lift
1					
2	(ELECTROMECHANICAS, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	15%	1,59
3	(ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S., 0,3mm)	(Com defeito)	100%	15%	1,59
4	(LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	13%	1,59
5	(LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S., 0,3mm)	(Com defeito)	100%	13%	1,59
6	(0,23mm, MECANIDRAULICA -, VICENTE TORNS S.)	(Sem defeito)	100%	10%	2,69
7	(0,23mm, MECANIDRAULICA -, TRENCH FRANCE S., VICENTE TORNS S.)	(Sem defeito)	100%	10%	2,69
8	(CARAVELA & FILHO)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
9	(CARAVELA & FILHO, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
10	(CARAVELA & FILHO, ELECTROMECHANICAS)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
11	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
12	(CARAVELA & FILHO, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
13	(0,23mm, VICENTE TORNS S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	100%	8%	2,69
14	(CARAVELA & FILHO, ELECTROMECHANICAS, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
15	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
16	(CARAVELA & FILHO, 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
17	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
18	(CARAVELA & FILHO, ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
19	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
20	(VICENTE TORNS S., MECANIDRAULICA -, ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	100%	8%	2,69
21	(0,23mm, MECANIDRAULICA -, VICENTE TORNS S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	100%	8%	2,69
22	(0,23mm, TRENCH FRANCE S., VICENTE TORNS S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	100%	8%	2,69
23	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
24	(CARAVELA & FILHO, ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S., 0,3mm)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
25	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS, 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
26	(CARAVELA & FILHO, LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
27	(VICENTE TORNS S., MECANIDRAULICA -, TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	100%	8%	2,69
28	(MECANIDRAULICA -, 0,23mm, ESSEX ITALY S.P., TRENCH FRANCE S., VICENTE TORNS S.)	(Sem defeito)	100%	8%	2,69
29	(LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S., CARAVELA & FILHO, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	8%	1,59
30	(METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
31	(METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
32	(0,23mm, METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
33	(0,3mm, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
34	(ABB, METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
35	(ABIEGA, METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
36	(ELECTROMECHANICAS, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
37	(LACROIX & KRESS, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
38	(TRENCH FRANCE S., METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
39	(METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
40	(0,23mm, ABB, METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
41	(0,23mm, ABIEGA, METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
42	(0,23mm, METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
43	(ELECTROMECHANICAS, METALONGO-METALÚ, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
44	(LACROIX & KRESS, 0,3mm, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
45	(0,3mm, TRENCH FRANCE S., METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
46	(ABIEGA, ABB, METALÚRGICA PALM)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
47	(ABB, METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
48	(ABIEGA, METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
49	(LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
50	(ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S., METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
51	(LACROIX & KRESS, TRENCH FRANCE S., METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
52	(0,23mm, ABB, METALÚRGICA PALM, ABIEGA)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
53	(0,23mm, ABB, METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
54	(0,23mm, ABIEGA, METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
55	(LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, METALONGO-METALÚ, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
56	(TRENCH FRANCE S., ELECTROMECHANICAS, METALONGO-METALÚ, 0,3mm)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
57	(TRENCH FRANCE S., LACROIX & KRESS, 0,3mm, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59
58	(ABIEGA, ABB, METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
59	(TRENCH FRANCE S., LACROIX & KRESS, ELECTROMECHANICAS, METALONGO-METALÚ)	(Com defeito)	100%	5%	1,59

60	(ABB , 0,23mm, ABIEGA , METALÚRGICA PALM, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	100%	5%	2,69
61	METALONGO-METALÚ, LACROIX & KRESS , ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S., 0,3mm	(Com defeito)	100%	5%	1,59
62	(LACROIX & KRESS , 0,3mm)	(Com defeito)	93%	18%	1,49
63	(LACROIX & KRESS , 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	93%	18%	1,49
64	(ELECTROMECHANICAS)	(Com defeito)	93%	17%	1,48
65	(ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	93%	17%	1,48
66	(LACROIX & KRESS , ELECTROMECHANICAS)	(Com defeito)	91%	13%	1,45
67	(LACROIX & KRESS , ELECTROMECHANICAS, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	91%	13%	1,45
68	(0,23mm, MECANIDRAULICA -)	(Sem defeito)	89%	10%	2,39
69	(0,23mm, MECANIDRAULICA , TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	89%	10%	2,39
70	(MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
71	(0,3mm, MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
72	(TRENCH FRANCE S., MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
73	(VICENTE TORNS S., MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
74	(0,3mm, TRENCH FRANCE S., MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
75	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
76	(VICENTE TORNS S., TRENCH FRANCE S., MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
77	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, TRENCH FRANCE S., MECVER-MECANICA)	(Com defeito)	88%	9%	1,39
78	(0,23mm, ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	86%	8%	2,31
79	(MECANIDRAULICA , ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	86%	8%	2,31
80	(0,23mm, MECANIDRAULICA - ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	86%	8%	2,31
81	(0,23mm, TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	86%	8%	2,31
82	(MECANIDRAULICA , TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	86%	8%	2,31
83	(0,23mm, MECANIDRAULICA , TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	86%	8%	2,31
84	(0,3mm, MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	83%	6%	1,33
85	(VICENTE TORNS S., MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	83%	6%	1,33
86	(0,3mm, TRENCH FRANCE S., MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	83%	6%	1,33
87	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	83%	6%	1,33
88	(VICENTE TORNS S., TRENCH FRANCE S., MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	83%	6%	1,33
89	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, TRENCH FRANCE S., MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	83%	6%	1,33
90	(SAM DONG INC.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
91	(ESSEX GERMANY GM, PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
92	(TRENCH FRANCE S., SAM DONG INC.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
93	(VICENTE TORNS S., SAM DONG INC.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
94	(ESSEX GERMANY GM, 0,3mm, PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
95	(VICENTE TORNS S., LACROIX & KRESS , 0,3mm)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
96	(ESSEX GERMANY GM, PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
97	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM, PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
98	(VICENTE TORNS S., TRENCH FRANCE S., SAM DONG INC.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
99	(ESSEX GERMANY GM, 0,3mm, PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
100	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM, 0,3mm, PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
101	(VICENTE TORNS S., LACROIX & KRESS , 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
102	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM, PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
103	(PROZINCO-CONSTRU, ESSEX GERMANY GM, TRENCH FRANCE S., VICENTE TORNS S., 0,3mm)	(Com defeito)	80%	5%	1,27
104	(ESSEX GERMANY GM)	(Com defeito)	79%	19%	1,26
105	(ESSEX GERMANY GM, 0,3mm)	(Com defeito)	79%	19%	1,26
106	(ESSEX GERMANY GM, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	79%	19%	1,26
107	(ESSEX GERMANY GM, 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	79%	19%	1,26
108	(LACROIX & KRESS)	(Com defeito)	78%	18%	1,24
109	(LACROIX & KRESS , TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	78%	18%	1,24
110	(0,3mm, ESSEX ITALY S.P.)	(Com defeito)	78%	9%	1,24
111	(0,3mm, TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Com defeito)	78%	9%	1,24
112	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, ESSEX ITALY S.P.)	(Com defeito)	78%	9%	1,24
113	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Com defeito)	78%	9%	1,24
114	(VICENTE TORNS S., MECANIDRAULICA -)	(Sem defeito)	77%	13%	2,07
115	(VICENTE TORNS S., MECANIDRAULICA , TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	77%	13%	2,07
116	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM)	(Com defeito)	76%	17%	1,22

117	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM, 0,3mm)	(Com defeito)	76%	17%	1,22
118	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	76%	17%	1,22
119	(VICENTE TORNS S., ESSEX GERMANY GM, 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	76%	17%	1,22
120	(0,3mm)	(Com defeito)	75%	55%	1,20
121	(0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	75%	55%	1,20
122	(0,23mm, VICENTE TORNS S.)	(Sem defeito)	75%	12%	2,02
123	(AB)	(Sem defeito)	75%	8%	2,02
124	(0,23mm, ABB)	(Sem defeito)	75%	8%	2,02
125	(ABB, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	75%	8%	2,02
126	(0,23mm, ABB, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	75%	8%	2,02
127	(0,23mm, TRENCH FRANCE S., VICENTE TORNS S.)	(Sem defeito)	73%	10%	1,96
128	(0,23mm)	(Sem defeito)	71%	19%	1,92
129	(MECANIDRAULICA -)	(Sem defeito)	71%	13%	1,92
130	(MECANIDRAULICA -, TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	71%	13%	1,92
131	(ABIEGA)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
132	(MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
133	(PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
134	(0,23mm, ABIEGA)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
135	(0,3mm, PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
136	(ABIEGA, ABB)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
137	(ABIEGA, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
138	(TRENCH FRANCE S., MONTALMAIA-MONTA)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
139	(PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
140	(VICENTE TORNS S., PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
141	(0,23mm, ABB, ABIEGA)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
142	(0,23mm, ABIEGA, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
143	(0,3mm, PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
144	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, PROZINCO-CONSTRU)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
145	(ABIEGA, ABB, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
146	(VICENTE TORNS S., PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
147	(0,23mm, ABB, DRAAD NIJMEGEN B, ABIEGA)	(Sem defeito)	71%	6%	1,92
148	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, PROZINCO-CONSTRU, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	71%	6%	1,14
149	(MECVER AMBIENTE)	(Com defeito)	70%	9%	1,11
150	(MECVER AMBIENTE., TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	70%	9%	1,11
151	(VICENTE TORNS S., MECVER AMBIENTE.)	(Com defeito)	70%	9%	1,11
152	(VICENTE TORNS S., TRENCH FRANCE S., MECVER AMBIENTE.)	(Com defeito)	70%	9%	1,11
153	(0,23mm, TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	69%	12%	1,86
154	(VICENTE TORNS S., 0,3mm)	(Com defeito)	69%	40%	1,10
155	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	69%	40%	1,10
156	(TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	67%	60%	1,07
157	(0,23mm, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	67%	8%	1,79
158	(MECVER AMBIENTE., 0,3mm)	(Com defeito)	67%	8%	1,06
159	(MECVER AMBIENTE., 0,3mm, TRENCH FRANCE S.)	(Com defeito)	67%	8%	1,06
160	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, MECVER AMBIENTE.)	(Com defeito)	67%	8%	1,06
161	(MECVER AMBIENTE., 0,3mm, TRENCH FRANCE S., VICENTE TORNS S.)	(Com defeito)	67%	8%	1,06
162	(DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	60%	15%	1,61
163	(0,3mm, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	55%	8%	1,47
164	(0,3mm, TRENCH FRANCE S., DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	55%	8%	1,47
165	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	55%	8%	1,47
166	(VICENTE TORNS S., 0,3mm, TRENCH FRANCE S., DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	55%	8%	1,47
167	(VICENTE TORNS S., DRAAD NIJMEGEN B)	(Sem defeito)	54%	9%	1,45
168	(VICENTE TORNS S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	53%	10%	1,43
169	(VICENTE TORNS S., TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	53%	10%	1,43
170	(ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	50%	10%	1,34
171	(TRENCH FRANCE S., ESSEX ITALY S.P.)	(Sem defeito)	50%	10%	1,34
172	(DRAAD NIJMEGEN B, TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	50%	8%	1,34
173	(VICENTE TORNS S., DRAAD NIJMEGEN B, TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	50%	8%	1,34
174	(VICENTE TORNS S.)	(Sem defeito)	40%	29%	1,09
175	(VICENTE TORNS S., TRENCH FRANCE S.)	(Sem defeito)	39%	28%	1,06

Figura A.33: Lista das regras de associação obtidas a partir do algoritmo apriori

Referências

- [1] Vinício Manuel Azevedo Ribeiro. Desenvolvimento e análise de indicadores de condição de transformadores de potência. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [2] V. Miranda. Fiabilidade em sistemas de potência-uma introdução. *FEUP/INESC*, 2010.
- [3] R. P. Singh, A. V. Sonawane, M. S. Satpute, D. Y. Shirsath, e M. P. Thakre. A review on traditional methods of condition monitoring of transformer. Em *2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, páginas 1144–1152, 2020.
- [4] Antony Manuel Justino Ferreira. Cálculo de Índices de Saúde, Vida Restante e Probabilidade de Falha de Transformadores de Potência AT/MT. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [5] Edwell. T. Mharakurwa. In-service power transformer life time prospects: Review and prospects. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2022:9519032, Oct 2022.
- [6] Patrick Baird, Henryk Herman, G.C. Stevens, e Paul Jarman. Non-destructive measurement of the degradation of transformer insulating paper. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 13:309 – 318, 05 2006.
- [7] Haroldo de Faria, João Gabriel Spir Costa, e Jose Luis Mejia Olivas. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46:201–209, 2015. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001409>.
- [8] Karim Dahdouh, Ahmed Dakkak, Lahcen Oughdir, e Ibriz Abdelali. *Association Rules Mining Method of Big Data for E-Learning Recommendation Engine: Volume 5: Advanced Intelligent Systems for Computing Sciences*, páginas 477–491. 01 2019.
- [9] Md Mominul Islam, Gareth Lee, e Sujeewa Hettiwatte. A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering*, 100:1–25, 06 2018.
- [10] M. Wang, A.J. Vandermaar, e K.D. Srivastava. Review of condition assessment of power transformers in service. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(6):12–25, 2002.
- [11] E-REDES. "E-REDES - Overview". 2022.
- [12] E-REDES. "Estratégia de Gestão de Ativos ". Dezembro 2021.
- [13] E-REDES. "PDIRD-E 2020 Proposta Final". 2020.

- [14] EDP. Testes e ensaios: Inspeção de ativos do setor elétrico. Disponível em <https://www.edp.com/pt-pt/inovacao/labelec/testes-e-ensaios#inspecao-de-ativos-do-setor-eletrico>, acedido a última vez em outubro de 2022.
- [15] Diogo Fernando Ferreira da Silva. Monitorização e Diagnóstico da Condição de Transformadores de Alta Potência para Melhorar a Fiabilidade e Gestão do Respetivo Ciclo de Vida. Tese de mestrado, Instituto Superior da Universidade de Lisboa, 2016.
- [16] Mário André Soares. Elementos para a Gestão do Ciclo de Vida de Transformadores Elétricos de Potência. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [17] E. Aguiar. Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência. Tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais-Engenharia Elétrica, 2007.
- [18] Jonathan Costa, Diogo Silva, e P. Branco. Large-power transformers: Time now for addressing their monitoring and failure investigation techniques. *Energies*, 15:4697, 06 2022.
- [19] WEG. *Transformador a Óleo até 4000kVA*. Catálogo.2010.
- [20] E-REDES. *Manual de Manutenção Subestações, Postos de Corte e Seccionamento*, 2022.
- [21] L.M.R. Oliveira. *Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Proteção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos*. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2013.
- [22] Hongzhi Ding, Richard Heywood, John Lapworth, e Simon Ryder. Why transformers fail. January 2009.
- [23] Raheel Afzal. Transformer Failures, Causes Impact. February 2015.
- [24] K. Pickster. Determination of probability of failure of power transformers using statistical analysis. Tese de mestrado, University of the Witwatersrand.
- [25] M.A.Martins. Gestão da vida útil de transformadores. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 21, 2009.
- [26] Georg Brandtzæg. Health indexing of norwegian power transformers. Tese de mestrado, Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [27] Ena Narang, Er. Shivani Sehgal, e Er. Dimpy Singh. Fault detection techniques for transformer maintenance using dissolved gas analysis. *International journal of engineering research and technology*, 1, 2012.
- [28] M. Augusta G. Martins. Causas e mecanismos de produção e circulação de gases nos transformadores elétricos isolados a óleo. *Eletricidade.Energia.Eletrónica*, outubro 1985.
- [29] Ali Naderian, S. Cress, R. Piercy, F. Wang, e J. Service. An approach to determine the health index of power transformers. páginas 192 – 196, 07 2008.
- [30] Ieee guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers. *IEEE Std C57.104-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991)*, páginas 1–36, 2009.

- [31] Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, e Chao-Ming Huang. A review of dissolved gas analysis in power transformers. *Energy Procedia*, 14:1220–1225, 12 2012.
- [32] Hasmat Malik, Abdul Azeem, e R. Jarial. Application research based on modern-technology for transformer health index estimation. 03 2012.
- [33] Bogdan Gorgan, Petru V. Notingher, Jos M. Wetzer, Harry F. A. Verhaart, Peter A. A. F. Wouters, Arjan van Schijndel, e Gabriel Tanasescu. Calculation of the remaining lifetime of power transformers paper insulation. Em *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, páginas 293–300, 2012.
- [34] Hossein Torkaman e Farzin Karimi. Measurement variations of insulation resistance/polarization index during utilizing time in hv electrical machines – a survey. *Measurement*, 59:21–29, 01 2015.
- [35] Shudong Wang, He Yigang, Yin Baiqiang, Wenbo Zeng, Ying Deng, e Zengchao Hu. A partial discharge localization method in transformers based on linear conversion and density peak clustering. *IEEE Access*, PP:1–1, 01 2021.
- [36] Byeng D. Youn Joung Taek Yoon, Kyung Min Park e Wook-Ryun Lee. Diagnostics of mechanical faults in power transformers - vibration sensor network design under vibration uncertainty. *European Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 2014.
- [37] Patricia Kang e David Birtwhistle. Condition assessment of power transformer onload tap changers using wavelet analysis and self-organizing map: Field evaluation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18, 02 2003.
- [38] Prof. Tyrone Fernando. Analysis of testing methodologies for high voltage transformers. Em *CEED Seminar Proceedings*, 2013.
- [39] Ricardo Bechara. *Análise de Falhas de Transformadores de Potência*. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 2010.
- [40] Hong Guo e Lei Guo. Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data. *Energy Reports*, 8:9038–9045, 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722013075>.
- [41] W.D.A.G. Hillary, K.L.I.M Jayarathna, Lahiruni Ranasinghe, Bhagya Samarakoon, N.M.T.N. Rathnayake, Rohan Lucas, e Rasara Samarasinghe. A tool for estimating remaining life time of a power transformer. páginas 373–378, 05 2017.
- [42] M. Bharati e Bharati Ramageri. Data mining techniques and applications. *Indian Journal of Computer Science and Engineering*, 1, 12 2010.
- [43] TechTarget. Data mining, 2021. URL: <https://www.techtarget.com/searchbusinessanalytics/definition/data-mining>.
- [44] Jrjung Lyu, Chia Wen Liang, e Ping-Shun Chen. A data-driven approach for identifying possible manufacturing processes and production parameters that cause product defects: A thin-film filter company case study. *IEEE Access*, 8:49395–49411, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2974535.
- [45] A Ugoni e Bruce Walker. The chi square test: an introduction. *COMSIG review / COMSIG, Chiropractors and Osteopaths Musculo-Skeletal Interest Group*, 4:61–4, 12 1995.

- [46] Tanwir Khan. Hypothesis testing: 2-tailed test. *Towards Data Science*, 2019. 28-05-2023. URL: <https://towardsdatascience.com/hypothesis-testing-2-tailed-test-42f0d5ef1071>.
- [47] Karim Dahdouh, Ahmed Dakkak, Lahcen Oughdir, e Ibriz Abdelali. *Association Rules Mining Method of Big Data for E-Learning Recommendation Engine: Volume 5: Advanced Intelligent Systems for Computing Sciences*, páginas 477–491. 01 2019.
- [48] Filomena Clara Gouveia Anselmo. Tese de mestrado em modelação, análise de dados e sistemas de apoio à decisão. Tese de mestrado, Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 2017.
- [49] Daniela Filipa Sousa da Costa. Conceção de dashboards para apoio à decisão no âmbito da condição e risco de ativos da edp distribuição. Tese de mestrado, Universidade Católica Portuguesa, 2020.