

Estudos de Fiabilidade em Quadros de Média Tensão

PEDRO JOSÉ GONÇALVES ESPINHO

outubro de 2025

Estudos de Fiabilidade em Quadros de Média Tensão

Pedro José Gonçalves Espinho

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia**

Orientador: Professor Doutor António Augusto Araújo Gomes

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Professor Doutor António Augusto Araújo Gomes, Professor Adjunto, ISEP

Professor Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Professor Coordenador, ISEP

“Os obstáculos são aquelas coisas assustadoras que vemos quando desviamos o foco do nosso objetivo.”

Henry Ford

Resumo

Este relatório traduz o trabalho realizado durante um ano na Área de Alta e Média Tensão (AMT), da EFACEC, no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Os estudos de fiabilidade, no âmbito dos quadros de média tensão (QMT), são fundamentais para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica, com o intuito de minimizar falhas e assegurar a segurança e eficiência de instalações. Com este estudo, pretende-se melhorar o desempenho dos sistemas elétricos e promover uma operação e manutenção mais robusta e sustentável.

Numa fase inicial, foi efetuado um enquadramento teórico ao tema, uma explicação dos objetivos a atingir com a realização do trabalho e uma calendarização das futuras tarefas a desenvolver ao longo do período da dissertação. Após este enquadramento, foi abordado de forma efetiva o trabalho realizado na empresa, com a primeira fase do projeto a passar por entender o processo de montagem dos equipamentos, bem como verificar os vários problemas associados ao mesmo.

De seguida, foi desenvolvida uma descrição do trabalho realizado no departamento em relação ao produto da Área da Alta e Média Tensão, as celas Normacel, nomeadamente as estratégias e equipamentos utilizados para o cálculo da fiabilidade do produto, como a metodologia RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*) e os métodos FMECA (*Failure Mode, Effects and Critical Analysis*) e FTA (*Fault Tree Analysis*).

Por fim, foi apresentada a importância da avaliação da fiabilidade das celas de média tensão, justificando ser um ponto crucial para evitar a ocorrência de defeitos nos componentes, capazes de resultar em interrupções no fornecimento e distribuição de energia elétrica para os consumidores.

Palavras-chave: Fiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, Segurança, falha, FMECA, RAMS, FTA, MTTR

Abstract

This report reflects the work carried out over the course of a year in EFACEC's High and Medium Voltage Area, as part of the Dissertation/Internship course unit of the Master's Degree in Electrical Engineering – Electrical Power Systems, from the Department of Electrical Engineering, of the Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Reliability studies in the field of medium-voltage switchgear are essential to guarantee the continuity of the electricity supply, to minimise failures and ensure the safety and efficiency of installations. The aim of this study is to improve the performance of electrical systems and promote more robust and sustainable operation and maintenance.

At an early stage, a theoretical framework for the subject was provided, along with an explanation of the objectives to be achieved by carrying out the work and a timetable for the future tasks to be carried out over the course of the dissertation. This framework was followed by an effective approach to the work carried out at the company, with the first phase of the project being to understand the process of assembling the equipment, as well as checking the various problems associated with it.

This was followed by a description of the work carried out in the department in relation to the Normacel cubicles, from the High and Medium Voltage product area, namely the strategies and equipment used to calculate product reliability, such as the RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) methodology and the FMECA (Failure Mode, Effects and Critical Analysis) and FTA (Fault Tree Analysis) methods.

Finally, the importance of assessing the reliability of medium-voltage cells was presented, justifying that this is a crucial point for avoiding the occurrence of component defects, which can result in interruptions in the supply and distribution of electricity to consumers.

Keywords: Reliability, Maintainability, Availability, Safety, failure, FMECA, RAMS, FTA, MTTR

Agradecimentos

A concretização deste projeto representa o culminar de um percurso académico que só foi possível graças ao apoio, incentivo e colaboração de várias pessoas e instituições, a quem deixo aqui o meu sincero reconhecimento.

Agradeço aos meus orientadores, o Professor Doutor António Augusto Araújo Gomes e o Eng. Ion Gordiciuc pela orientação atenta, disponibilidade permanente, partilha de conhecimento e sugestões preciosas, que contribuíram decisivamente para o desenvolvimento desta dissertação.

À equipa do departamento AMT (Aparelhagem de Alta e Média Tensão) da EFACEC, deixo o meu agradecimento pela colaboração, transmissão de experiência e de conhecimentos e pela cedência dos meios necessários para a realização deste estudo.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pelos valiosos anos de formação, crescimento pessoal e académico, bem como pelo ambiente de excelência e dedicação que sempre marcaram a minha passagem por esta instituição.

Agradeço a todos os docentes do ISEP que, ao longo do meu percurso académico, partilharam o seu conhecimento, dedicação e exigência, contribuindo de forma significativa para a minha formação técnica, científica e pessoal.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Pedro Moreira, António Santos, Adriano Meneses e Beatriz Gonçalves, agradeço sinceramente pela companhia, pelas noites de estudo e trabalho e por todo o espírito de entajuda que tornaram este percurso inesquecível. Foi uma honra e um privilégio partilhar esta etapa convosco, e espero que a nossa amizade dure por muitos anos.

Por fim e não menos importante, deixo o meu profundo agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, e aos meus amigos, por todo o apoio emocional e pelo constante incentivo à conclusão desta etapa.

Deixo aqui os meus votos de muitos sucessos e boa sorte para todos

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento Teórico.....	1
1.2 Contextualização.....	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Calendarização	3
1.5 Organização da Dissertação.....	4
2 Estudos de Fiabilidade	5
2.1 Origem e Evolução	6
2.2 Metodologia RAMS.....	8
2.2.1 Fiabilidade	11
2.2.2 Disponibilidade	16
2.2.3 Manutenibilidade	20
2.2.4 Segurança Operacional	22
2.3 Análise FMEA/FMECA	23

2.4	Análise FTA.....	30
3	Estudos de Fiabilidade em Quadros de Média Tensão - Estudo de Caso	37
3.1	Distribuição Primária	37
3.2	Celas de Distribuição Primária - Normacel (EFACEC)	39
3.3	Montagem e Ensaios	42
3.4	Manutenção	44
3.5	Estudos de Fiabilidade das Celas Normacel (EFACEC).....	45
3.5.1	Recolha de Dados	45
3.5.2	Tratamento de Dados.....	46
3.5.3	Cálculo da Fiabilidade	50
3.5.3.1	<i>Mean Time Between Failures</i> – NH-64-S-52	51
3.5.3.2	<i>Mean Time Between Failures</i> – NH-64-S-40	56
3.5.3.3	Resultados Globais.....	61
3.5.4	Manutenibilidade	63
3.5.5	Disponibilidade	65
3.5.6	Segurança Funcional	65
3.5.7	FMECA.....	67
3.5.8	FTA	74
3.6	Medidas Propostas.....	86
4	Conclusões.....	89
	Referências	93
	Anexo A: Tabela Especificação NH 64-S-40.....	96
	Anexo B: Tabela Especificação NH 64-S-52	97

Lista de Figuras

Figura 1 - Fatores de Influência no RAMS [11].....	9
Figura 2 - Curva da mortalidade para equipamentos mecânicos [10].....	12
Figura 3 - Distribuição de <i>Weibull</i> [9].....	14
Figura 4 - Distribuição Exponencial Negativa [10]	15
Figura 5 - Associação em série de componentes [16].....	15
Figura 6 - Associação em paralelo de duas componentes redundantes [16]	16
Figura 7 - Representação gráfica do <i>Mean Time Between Failures</i> (dois estados) [3]	18
Figura 8 - Representação gráfica <i>Mean Time Between Failures</i> (três estados) [3].....	18
Figura 9 - Diagrama de Ishikawa ou "Espinha de Peixe" [3]	24
Figura 10 - Formulário FMECA [3]	25
Figura 11 - Diagrama da Árvore de Falhas [25].....	31
Figura 12 - Tipos de funções das celas de média tensão	39
Figura 13 – Vista geral de uma cela de média tensão Normacel da EFACEC [29]	40
Figura 14 - Constituição de uma cela Normacel da EFACEC	41
Figura 15 - Fluxograma de produção das celas Normacel da EFACEC [30].....	42
Figura 16 - Quantidade acumulativa de celas Normacel instaladas	47
Figura 17 - Fiabilidade em função do tempo - falhas internas	51
Figura 18 - Fiabilidade em função do tempo - falha de abertura do interruptor-seccionador ou ST.....	53
Figura 19 – Fiabilidade em função do tempo – falha do indicador de presença de tensão	54
Figura 20 - Fiabilidade em função do tempo - falhas totais (especificação NH 64-S-52)	55
Figura 21 – Fiabilidade em função do tempo – abertura acidental do disjuntor	56
Figura 22 - Fiabilidade em função do tempo - falha de abertura do disjuntor por solicitação .	57
Figura 23 - Fiabilidade em função do tempo - falha de fecho do disjuntor por solicitação	58
Figura 24 - Fiabilidade em função do tempo - falhas internas (incluindo disjuntores)	59
Figura 25 - Fiabilidade em função do tempo - falhas totais (especificação NH 64-S-40)	61
Figura 26 - Falhas que podem provocar a indisponibilidade total da cela	75
Figura 27 - Falhas que provocam a indisponibilidade parcial da cela.....	76

Figura 28 - Diagrama FTA para a falha no barramento geral.....	76
Figura 29 - Diagrama FTA para a falha no seccionador de terra.....	77
Figura 30 - Diagrama FTA para a falha no disjuntor MT	78
Figura 31 - Diagrama FTA para a falha no motor	78
Figura 32 - Diagrama FTA para a falha na bobina de abertura e/ou bobina de fecho	79
Figura 33 - Diagrama FTA para a falha no comando	79
Figura 34 – Diagrama FTA na falha na ampola de corte em vácuo.....	79
Figura 35 - Diagrama FTA para a falha nos indicadores divisores capacitivos.....	80
Figura 36 – Diagrama FTA para a falha nos indicadores de presença de tensão.....	80
Figura 37 - Diagrama FTA para a falha nos bushings	81
Figura 38 - Diagrama FTA para a falha no sistema manual de introdução/extração do disjuntor MT	81
Figura 39 - Diagrama FTA para a falha no encravamento mecânico	82
Figura 40 - Diagrama FTA para a falha no termostato	82
Figura 41 - Diagrama FTA para a falha na resistência de aquecimento.....	83
Figura 42 - Diagrama FTA para a falha nos disjuntores BT	83
Figura 43 - Diagrama FTA para a falha nos transformadores de corrente.....	84
Figura 44 - Diagrama FTA para a falha nos transformadores de tensão	84
Figura 45 - Diagrama FTA para a falha nos fusíveis.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Descrição dos campos das tabelas FMECA.....	25
Tabela 2 - Classificação da probabilidade de ocorrência [3].....	27
Tabela 3 - Classificação do nível de severidade [3].....	28
Tabela 4 - Classificação do nível de detecção [3]	28
Tabela 5 - Símbolos de Evento [20].....	32
Tabela 6 - Símbolos das portas lógicas [20]	32
Tabela 7 - Símbolos de transferência [20]	33
Tabela 8 - Características das celas da gama Normacel.....	41
Tabela 9 - Plano de inspeção das celas Normacel [32]	44
Tabela 10 - Análise e identificação das avarias (tabela-tipo).....	48
Tabela 11 - Quantidade de falhas por cada tipo de avaria	48
Tabela 12 - Tempo de funcionamento (tabela-tipo).....	49
Tabela 13 - Tempo de bom funcionamento (tabela-tipo)	50
Tabela 14 - Lista de tempos das falhas internas	52
Tabela 15 – Lista de tempos da falha de abertura de interruptor-seccionador ou ST	53
Tabela 16 – Lista de tempos da falha do indicador de presença de tensão	54
Tabela 17 - Lista de tempos das falhas totais do produto	55
Tabela 18 - Lista de tempos da abertura acidental do disjuntor	57
Tabela 19 - Lista de tempos de falha da abertura do disjuntor por solicitação.....	58
Tabela 20 - Lista de tempos de falha de fecho do disjuntor por solicitação	59
Tabela 21 - Lista de tempos de falhas internas (incluindo disjuntores)	60
Tabela 22 - Taxa de avaria dos modos de avaria - especificação NH 64-S-52	62
Tabela 23 - Taxa de avarias dos modos de avaria - especificação NH 64-S-40.....	62
Tabela 24 - Cálculo do MTTR.....	64
Tabela 25 - Requisitos de atuação em caso de emergência	66
Tabela 26 - Estrutura funcional - Normacel	67
Tabela 27 - Análise FMECA - tabela 1.....	69
Tabela 28 - Análise FMECA - tabela 2.....	71

Tabela 29 - Lista de medidas propostas..... 86

Acrónimos

Lista de Acrónimos

A-FLR	<i>Accessibility for authorized personnel Front Lateral Rear</i>
AGREE	<i>Advisory Group on the Reliability Electronic Equipment</i>
AIAA	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
AIS	<i>Air Insulated Switchgear</i>
AMT	Aparelhagem de Alta e Média Tensão
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASQC	<i>American Society for Quality Control</i>
AT	Alta Tensão
BG	Barramento Geral
BT	Baixa Tensão
CBT	Compartimento de Baixa Tensão
CCF	<i>Common-Cause Failures</i>
DEE	Departamento de Engenharia Eletrotécnica
DN	<i>Detection Number</i>
EDF	<i>Électricité de France</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>

FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Critical Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
GIS	<i>Gas Insulated Switchgear</i>
IDI	Investigação, Desenvolvimento e Inovação
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
IR	<i>Insulation Resistance</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LRU	<i>Line Replaceable Unit</i>
MP	Matéria-Prima
MT	Média Tensão
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTBM	<i>Mean Time Between Maintenance</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PoF	<i>Physics-of-Failure</i>
PN	<i>Probability Number</i>
PM	<i>Partitioned Metal-enclosed</i>
PTEDE	Preparação para Tese/Dissertação
QAS	Qualidade, Ambiente e Segurança
QMT	Quadro de Média Tensão
RAM	<i>Realiability, Avaliability and Maintainability</i>
RAMS	<i>Realiability, Avaliability, Maintainability and Safety</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SN	<i>Severity Number</i>
SPC	Sistema de Proteção e Controlo
ST	Seccionador de Terra
TBF	Tempo de Bom Funcionamento
TTR	Tempo Técnico de Reparação
TI	Transformadores de Corrente
TT	Transformadores de Tensão
UN	Unidade de Negócio
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VSM	<i>Vector Space Model</i>

1 Introdução

1.1 Enquadramento Teórico

A constante evolução da complexidade dos sistemas elétricos de energia obriga a que os equipamentos, produtos e materiais constituintes do mesmo se encontrem num contínuo desenvolvimento tecnológico.

A fiabilidade é um requisito fundamental para todos os componentes do sistema elétrico de energia, de forma a garantir a segurança e a eficiência na transmissão de energia, especialmente em ambientes industriais e infraestruturas críticas.

O estudo da fiabilidade é de extrema importância para qualquer empresa que aspire prosperar no ambiente competitivo e tecnologicamente avançado atual, pois é essencial compreender o nível de fiabilidade dos seus produtos e ter a capacidade de o gerir de forma eficaz. Neste contexto, este tema torna-se igualmente relevante para a área dos equipamentos de proteção de Alta e Média Tensão (AMT) da EFACEC, desempenhando um papel crítico para o sucesso tanto da Unidade de Negócio (UN) quanto da empresa.

No que diz respeito aos quadros de média tensão (QMT), a avaliação da fiabilidade torna-se particularmente importante, uma vez que as ocorrências de defeitos nestes equipamentos podem resultar em interrupções significativas no fornecimento de energia, comprometendo processos industriais e gerando prejuízos económicos e sociais.

Como tal, é fundamental examinar os fatores que afetam o desempenho dos quadros de média tensão ao longo do tempo e as técnicas destinadas a diminuir a probabilidade de ocorrer defeitos, bem como adotar metodologias de registo de dados de equipamentos em funcionamento para calcular medidas de fiabilidade, comparando-as com normas internacionais, metas internas do fabricante e potenciais melhorias no produto.

Fatores mecânicos, elétricos e ambientais desempenham um papel fundamental na garantia do funcionamento adequado dos quadros de média tensão. Estes fatores podem provocar a ultrapassagem dos valores estipulados pelas normas e pelo projeto, tornando necessária a

interrupção do funcionamento e comprometendo a sua fiabilidade. Por este motivo, na fase de conceção, é essencial a realização de ensaios virtuais, cujo principal objetivo é reduzir o número de testes “reais” na produção, minimizando assim os custos financeiros e o tempo despendido no aperfeiçoamento de novos produtos e protótipos. A simulação computacional dos processos mecânicos ou elétricos exige a consideração simultânea de diversos aspetos, tais como a complexidade da estrutura geométrica, a disponibilidade de diretrizes operacionais, a diversidade dos efeitos mecânicos, as propriedades físicas não lineares dos materiais estruturais, bem como a utilização conjunta de diferentes tipos de aplicações no *hardware*.

O conhecimento do comportamento das falhas permite selecionar o tipo de manutenção mais adequado a cada situação, seja corretiva, preventiva ou preditiva. Na maioria dos casos, é preferível intervir antes da ocorrência da falha, uma vez que os custos associados a uma avaria durante a operação do equipamento são significativamente superiores aos custos de uma substituição antecipada do componente.

A análise da fiabilidade dos quadros de média tensão envolve profissionais de diferentes áreas, como desenvolvimento, projeto, engenharia, montagem, ensaios, expedição e serviços pós-venda. A colaboração entre estes especialistas, aliando teoria e prática, é essencial para o cálculo da fiabilidade.

Esta dissertação aborda conteúdos referentes à aplicação da metodologia RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*) a um produto da unidade de negócio Aparelhagem de Alta e Média Tensão da EFACEC Energia: Normacel (celas modulares de isolamento a ar, pertencentes à distribuição primária de energia).

O presente estudo tem como objetivo demonstrar que a implementação de novas metodologias poderá reduzir os custos de produção e operação, aumentar a capacidade produtiva e gerar valor acrescentado. Isto será possível através da disponibilização de informações úteis sobre o desempenho de componentes, equipamentos e processos.

1.2 Contextualização

Este documento demonstra o trabalho de estudo desenvolvido na EFACEC Energia – Máquinas e Equipamentos Elétricos S.A., na Unidade de Aparelhagem de Alta e Média Tensão (AMT), no âmbito da Unidade Curricular de TEDSEE – Tese/Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Com este trabalho pretende-se sistematizar o conhecimento sobre os estudos de fiabilidade em quadros de média tensão, de forma a permitir o desenvolvimento do trabalho prático focado na aplicação e validação de metodologias que garantam a sua robustez e eficiência.

O trabalho foi acompanhado na EFACEC pelo Eng.º Ion Gordiciuc, e teve orientação científica no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pelo Professor Doutor António Augusto Araújo Gomes.

1.3 Objetivos

O trabalho a desenvolver tem como principal objetivo assegurar o adequado funcionamento de quadros de média tensão, da marca EFACEC, da gama Normacel, bem como garantir a eficácia dos processos de manutenção e identificação de necessidades de melhoria através da obtenção de indicadores efetivos acerca do comportamento do equipamento.

De uma forma mais pormenorizada, o presente trabalho estabelece diversos objetivos a cumprir, nomeadamente a análise e desenvolvimento dos seguintes aspetos:

- Análise de regulamentos e normas acerca da fiabilidade nos quadros de média tensão;
- Identificação e classificação dos modos de defeito;
- Recolha de dados através de livros de avarias da empresa;
- Desenvolvimento de metodologias para avaliar a fiabilidade do produto;
- Definição de processos, requisitos, entre outros pontos para uma eficaz gestão RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*);
- Propostas de melhorias e de estratégias de manutenção preventiva.

Após uma abordagem teórica aprofundada dos diversos temas, será conduzido um estudo de caso prático de aplicação, visando o desenvolvimento de medidas destinadas à correção e eliminação de falhas previamente detetadas.

1.4 Calendarização

Com o estudo da fiabilidade em quadros de média tensão (QMT) sendo a motivação deste trabalho, a sua prossecução conduziu a uma calendarização dividida em dois momentos principais.

A primeira fase consistiu na investigação, pesquisa e estudo aprofundado na problemática em análise, tendo representado uma grande parte do tempo dedicado ao tema, com uma duração de, aproximadamente, 7 meses. Esta etapa envolveu um conjunto de tarefas, nomeadamente uma ação de formação sobre o tema, estudo das diversas normas associadas ao tema, recolha e análise de dados, realização de cálculos, construção de diagramas FTA (*Fault Tree Analysis*), elaboração de tabelas FMECA (*Failure Mode Effects and Criticality Analysis*) e proposta de medidas de melhoria dos processos ou das tarefas identificadas.

A segunda fase correspondeu à integração dos dados obtidos nas diversas etapas da primeira fase, à sua comparação com os métodos analíticos previamente estudados, bem como ao desenvolvimento e redação do relatório final, processo que decorreu ao longo de 4 meses.

1.5 Organização da Dissertação

O presente relatório está organizado da seguinte forma:

- O capítulo 1 realiza um breve enquadramento teórico ao tema a ser abordado nesta dissertação, bem como uma apresentação da contextualização do trabalho, os objetivos a cumprir e a calendarização das tarefas;
- O capítulo 2 desenvolve o estado de arte do trabalho, explicitando as metodologias utilizadas para o estudo de fiabilidade, tais como a metodologia RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), que consiste na implementação de um conjunto de conceitos de engenharia, métodos, ferramentas e técnicas que são aplicados ao longo do ciclo de vida de uma unidade industrial; o conceito FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), que é um procedimento de análise de cada modo de falha num equipamento, e o conceito de FTA (*Fault Tree Analysis*), que analisa os modos de falha de um produto, que podem levar à avaria do produto;
- O capítulo 3 descreve o produto em estudo, através das suas características técnicas, e os tipos de ensaios realizados por parte da produção na fase de manutenção. Ainda neste capítulo, é descrito o caso de estudo, em que se apresenta a recolha e tratamento dos dados obtidos, através das equações dos diversos índices de fiabilidade. De seguida, aplicam-se as metodologias RAMS e FMECA e a análise FTA ao projeto em estudo, com a apresentação dos cálculos dos indicadores MTBF (*Mean Time Between Failures*) e MTTR (*Mean Time to Repair*) e a verificação das condições em relação às normas aplicáveis a este estudo. Em último lugar, são apresentadas e descritas algumas sugestões de melhoria quanto ao processo de fabrico das celas de média tensão Normacel;
- O capítulo 4 apresenta as conclusões do trabalho, nas quais se sintetizam os principais resultados obtidos ao longo da investigação. Neste contexto, destaca-se a relevância da aplicação de técnicas de fiabilidade para assegurar o correto funcionamento dos sistemas elétricos. Além disso, são discutidas as implicações práticas destas técnicas na melhoria da eficiência, minimização de custos e o aumento da vida útil das celas;
- As referências bibliográficas e anexos são os últimos elementos da presente dissertação.

2 Estudos de Fiabilidade

O estudo de fiabilidade aplicado a quadros de média tensão (QMT) envolve a análise de diversas métricas e métodos para quantificar o desempenho e prever o comportamento dos sistemas ou equipamentos ao longo do seu ciclo de vida. Estas análises permitem identificar pontos de fragilidade, propor melhorias técnicas e estabelecer estratégias de manutenção rigorosas e adequadas, de forma a aumentar a vida útil dos equipamentos e reduzir falhas inesperadas.

Este capítulo apresenta as origens do conceito de fiabilidade e a sua evolução ao longo dos anos, as metodologias RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, and Safety*), FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) e FTA (*Fault Tree Analysis*), amplamente reconhecidas e consolidadas nos estudos de fiabilidade, devido à sua aplicabilidade prática e robustez analítica. A escolha destas abordagens é fundamentada na sua capacidade de avaliar de forma eficiente sistemas complexos como os QMTs.

A metodologia RAMS permite uma estrutura abrangente para a análise integrada da confiabilidade e segurança, enquanto a FMECA e a FTA são ferramentas complementares que permitem uma análise mais detalhada e orientada para modos de falha específicos e suas consequências.

A adoção de uma abordagem sistemática, suportada pelas metodologias em questão, não se limita ao cumprimento dos requisitos técnicos e normativos, revelando-se igualmente fundamental para a definição de estratégias que promovam a vida útil e a eficiência operacional dos sistemas em estudo. Este capítulo evidencia, assim, a forma como tais ferramentas se articulam e contribuem com *insights* valiosos no âmbito dos estudos de fiabilidade aplicados a QMTs, estabelecendo uma base consistente para o desenvolvimento e aprofundamento das análises subsequentes.

2.1 Origem e Evolução

O conceito de fiabilidade tem sido tradicionalmente reconhecido como um atributo humano, embora a sua aplicação a sistemas técnicos seja relativamente recente, com pouco mais de 70 anos de desenvolvimento. A fiabilidade ganhou relevância tecnológica apenas após a Segunda Guerra Mundial. Até então, os produtos eram frequentemente constituídos por um elevado número de componentes que, apesar de fabricados com materiais de alta qualidade, não garantiam um desempenho funcional satisfatório [1].

Na sequência do conflito, foi reportado que os primeiros dez mísseis V-1, desenvolvidos na Alemanha durante a guerra, se revelaram um insucesso. Apesar da utilização de peças de elevada qualidade e da cuidadosa atenção aos pormenores, todos os protótipos falharam: explodiram na plataforma de lançamento ou aterraram de forma precoce. Neste contexto, Robert Lusser, um matemático e consultor, foi chamado a analisar o sistema de controlo do míssil. Através da sua investigação, Lusser deduziu a lei da Probabilidade do Produto dos Componentes em Série, a qual estabelece que a fiabilidade global de um sistema corresponde ao produto das fiabilidades dos seus componentes [1].

Na década de 1940, a fiabilidade e a engenharia de fiabilidade ainda não existiam formalmente. Durante a Segunda Guerra Mundial, a introdução de novos produtos eletrónicos como rádios portáteis e radares, relevou problemas sérios no que diz respeito à fiabilidade. Na época, o foco da fiabilidade estava nos ensaios de fadiga, em que se destacaram os trabalhos de M.A. Miner sobre a acumulação de danos por fadiga, em 1945 e de Benjamin Epstein acerca de aspetos estatísticos de problemas de fratura. O maior problema que o exército enfrentou era os tubos a vácuo, essenciais para radares, que revelaram comportamentos instáveis, levando a falhas frequentes [2].

Em 1948, a IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) criou a *Reliability Society*, com Richard Rollman como primeiro presidente. No mesmo ano, Z.W. Birnbaum fundou o Laboratório de Pesquisa Estatística na Universidade de Washington, fortalecendo o uso da estatística na confiabilidade [2].

O início dos anos 50 revelou ser o mais problemático quanto às questões da fiabilidade e foram propostas novas soluções, tanto para aplicações militares quer comerciais. No que se refere à componente militar, foi criado o grupo de estudo, *Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment* (AGREE), que definiu três pontos essenciais na formação de sistemas confiáveis, com o seu primeiro relatório sobre fiabilidade a ser lançado em 1957:

1. Necessidade de desenvolver componentes de melhor qualidade e mais consistentes por parte dos fornecedores;
2. O exército deveria estabelecer requisitos de qualidade e fiabilidade para os fornecedores;
3. Dados reais em terrenos sobre os componentes deveriam ser recolhidos com a finalidade de determinar as principais causas dos problemas [2].

Em 1954, foi realizado o primeiro Simpósio Nacional em Fiabilidade e Controlo de Qualidade, patrocinado pelo IEEE, pela ASQC (*American Society for Quality Control*) e pela IES (*Illuminating Engineering Society*) [3].

Nos anos 60, foi publicado o primeiro livro que combinava a análise estatística e a engenharia de fiabilidade, e a *U.S. Naval Post-Graduate School*, em Monterey, California, tornou-se a primeira instituição de ensaio a lecionar cursos de Engenharia de Fiabilidade. Ainda nesse período, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) passou a adotar uma série de linhas orientadoras para serem seguidas pelos fornecedores, para assegurar a fiabilidade dos equipamentos dos sistemas espaciais [3].

Nos anos 70, a Conferência Anual de Fiabilidade e Manutibilidade do AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*), da SAE (*Society of Automotive Engineers*) e da ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) fundiu-se com o Simpósio Anual em Fiabilidade e Manutibilidade [3].

A década de 80 foi marcada por um rápido crescimento da tecnologia de circuitos integrados, o que impulsionou a engenharia de fiabilidade a adotar metodologias mais sofisticadas de análise e modulação. A crescente complexidade destes circuitos revelou-se um desafio significativo para os modelos tradicionais então utilizados, os quais se baseavam em dados de campo. As *Common-Cause Failures* (CCFs) ou Falhas de Causa Comum emergiram como uma problemática relevante no âmbito da fiabilidade, dado que múltiplos componentes passaram a apresentar falhas originadas por uma mesma causa [4].

Em 1992, o exército e a força aérea norte-americana lançaram a iniciativa *Physics-of-Failure* (PoF), que enfatizava os mecanismos físicos e químicos das falhas para sistemas eletrónicos, a fim de avançar para métodos de fiabilidade científicos e preditivos. Esta iniciativa tornou-se uma estratégia de redução de custos, particularmente importante devido às crescentes restrições orçamentais e à crescente concorrência [4].

Nos anos 2000, a engenharia de fiabilidade entrou numa nova era marcada pela integração de abordagens estatísticas e da *Physics-of-Failure* (PoF), desenvolvendo-se os métodos híbridos [4]. Já em 2005, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos publicou um manual intitulado "*DOD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability*", no qual é analisada a situação relativa à fiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade nas forças armadas norte-americanas. Este documento conclui que existe uma necessidade premente de definição de parâmetros de análise que permitam alcançar níveis superiores nestas três dimensões [5].

No que se refere, em particular, à análise de fiabilidade das celas de média tensão, a norma IEC 62271-200 [6], embora preveja este tipo de análise, não especifica quaisquer requisitos ou metodologias a seguir na respetiva avaliação. Para este tipo de análise, é mais frequente a utilização das especificações técnicas da EDF (*Électricité de France*) NH 64-S-40 [7] e NH 64-S-52 [8] por estabelecerem as características, funções, classificação dos defeitos e os limites mínimos de tempo de funcionamento de uma cela. No entanto, estas especificações não

definem os procedimentos a adotar, uma vez que estes devem ser desenvolvidos especificamente para cada tipo de produto.

Numa perspetiva de futuro, é esperado que as empresas do ramo industrial que desejam manter-se competitivas no mercado global, terão de dominar todo o ciclo de produção, desde a conceção de desenvolvimento até à distribuição dos produtos, incluindo a criação de produtos que operem com a confiabilidade esperada, sejam fáceis de manter ou não exijam manutenção durante a sua vida útil, garantam segurança na utilização e apresentem um alto padrão de qualidade.

2.2 Metodologia RAMS

A metodologia RAMS (*Realiability Avaliability Maintainability Safety*), ou Fiabilidade Disponibilidade Manutenibilidade Segurança, refere-se à implementação de um conjunto de conceitos de engenharia, métodos, ferramentas e técnicas que são aplicados ao longo do ciclo de vida de uma unidade industrial. O objetivo principal é otimizar a produtividade e a rentabilidade, ao mesmo tempo em que procura minimizar o risco de falhas e acidentes, bem como os custos associados [9].

A metodologia RAMS foi introduzida pela primeira vez em 2005 numa diretiva emitida pelo Secretário da Força Aérea Norte Americana, onde foram definidas as capacidades para executar uma missão e os respetivos requisitos de suportabilidades, com a RAMS a ser um dos processos identificados [5].

A metodologia pode ser caracterizada como um indicador qualitativo e quantitativo do grau de fiabilidade com que a unidade de produção e os seus equipamentos e componentes operam conforme o que é exigido, de forma a garantir, ao mesmo tempo, a sua disponibilidade e segurança [9]. Desta forma, as atividades de manutenção assumem um papel essencial para o cumprimento de objetivos estabelecidos, assistindo-se cada vez mais a uma maior preocupação das empresas em incluir, desde a fase de elaboração do caderno de encargos na aquisição de um equipamento, um conjunto de especificações que ultrapassam os aspetos puramente técnicos, definindo limites mínimos aceitáveis relativamente à Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança [10].

A metodologia RAMS apresenta diversos fatores que influenciam a sua implementação, tais como as causas de avarias internas ao sistema (condições do sistema), as causas de avaria impostas ao sistema (condições de exploração) e as causas de avaria impostas durante as ações de manutenção (condições de manutenção). Estas causas podem ocorrer em separado ou atuar simultaneamente, relacionando-se por vezes, influenciando a RAMS, conforme explicito na Figura 1 [11].

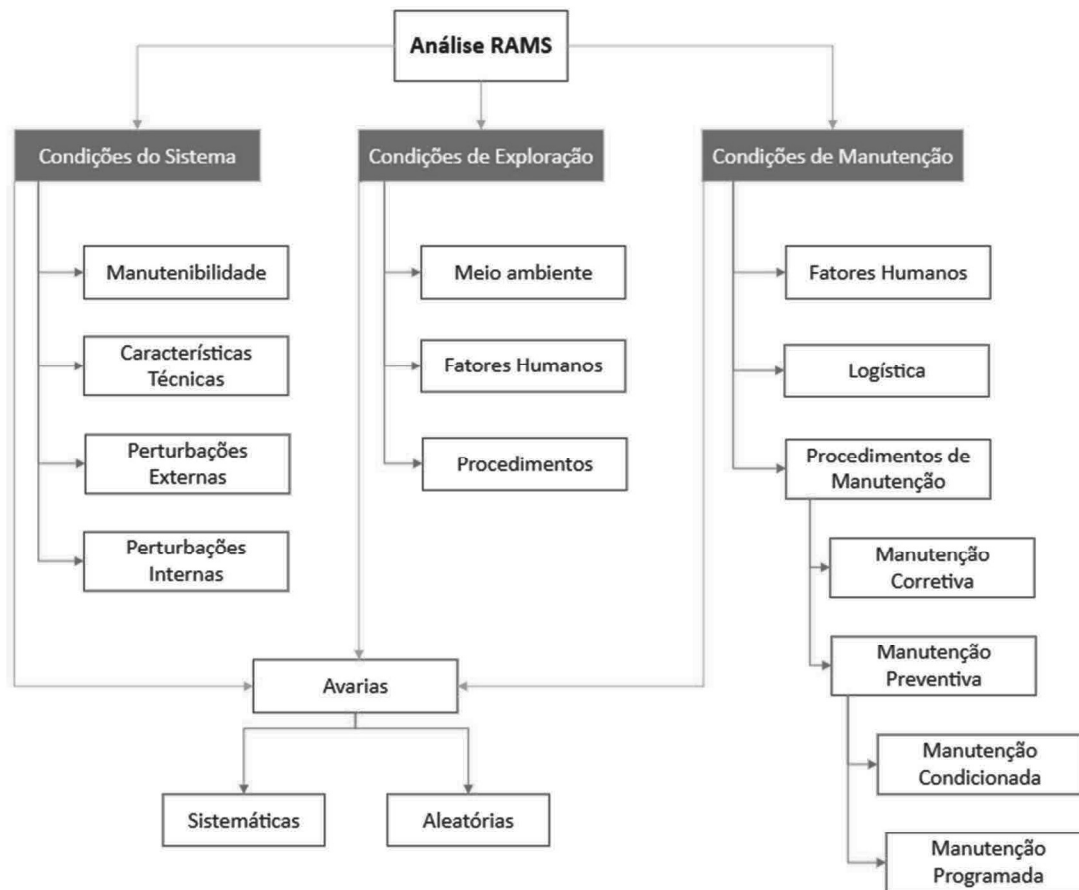


Figura 1 - Fatores de Influência no RAMS [11]

Conforme ilustrado na Figura 1, as avarias podem ser classificadas em dois grandes grupos: as sistemáticas e as aleatórias. As avarias sistemáticas estão geralmente associadas a erros nas especificações, o fabrico deficiente, as instalações inadequadas ou erros humanos. Por outro lado, as avarias aleatórias resultam, em grande medida, de fatores externos ou inevitáveis, como as condições de operação, as influências do meio ambiente ou a degradação progressiva provocada pelo desgaste natural dos componentes [11].

A análise RAMS oferece apoio à tomada de decisões de gestão e contribui para a:

- Previsão da disponibilidade operacional e económica do projeto;
- Fiabilidade do equipamento, incluindo os principais fatores que afetam a significativa redução da produção;
- Estratégia de manutenção preventiva e abordagem em relação a peças de reposição;
- Análise de custo-benefício de alternativas técnicas ou operacionais (estudos de sensibilidade);
- Principais incertezas associadas ao desempenho da produção;

- Identificação de possíveis causas de paragens de produção;
- Recomendações para a aprimoramento do desempenho da produção [12].

Esta aplicação permite elaborar vários documentos relevantes, entre os quais estão os seguintes:

- Livro de Registo de Situações Potencialmente Perigosas;
- Cadernos de Segurança;
- Plano de Segurança;
- Dossier de Segurança Geral;
- Manual de Segurança;
- Plano de Instalação;
- Programa RAM (utilizando FMECA, MTTR, MTBF e FTA);
- Plano de Validação;
- Plano de Comissionamento [12].

O processo metodológico é constituído por um conjunto de etapas sequenciais. Numa fase inicial, procede-se à definição do produto a ser analisado, seguida pela respetiva descrição funcional. Posteriormente, o produto é decomposto em equipamentos e componentes, permitindo a elaboração do correspondente diagrama funcional. Com base nesta decomposição, identificam-se os defeitos potenciais e selecionam-se os equipamentos e componentes que serão submetidos ao estudo FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). Nesta etapa, estabelecem-se os critérios de severidade, ocorrência e detetabilidade são estabelecidos, conduzindo à realização da análise FMECA, à elaboração da matriz de criticidade e, quando pertinente, à definição de árvore de falhas e de eventos [12].

Com vista à otimização das estratégias de manutenção e à redução do tempo de inatividade, torna-se essencial identificar as falhas mais frequentes, as suas consequências para o funcionamento do produto e a respetiva frequência de ocorrência. Esta análise compreende tanto uma vertente qualitativa, centrada na caracterização dos tipos de falha e dos seus impactos operacionais, como uma vertente quantitativa, que contempla os custos associados a reparações e perdas de produção. Tal abordagem pressupõe a decomposição do produto em equipamentos e componentes, possibilitando a avaliação individualizada de cada elemento, de modo a prever aqueles com maior propensão a falhas e, conseqüentemente, planear adequadamente o armazenamento de peças críticas [12].

2.2.1 Fiabilidade

O conceito de fiabilidade está associado à probabilidade de um sistema ser capaz de desempenhar as suas funções de uma forma adequada, num determinado período temporal e nas condições específicas de funcionamento. A definição do conceito abrange um conjunto de elementos fundamentais para a adequada compreensão do conceito de fiabilidade, dando uma maior ênfase aos seguintes tópicos:

- Trata-se de uma noção de natureza probabilística;
- O conceito de fiabilidade é estabelecido para um intervalo de tempo específico;
- As condições operacionais devem ser previamente conhecidas [13].

A engenharia de fiabilidade refere-se à aplicação sistemática das melhores práticas e técnicas de engenharia para desenvolver produtos mais fiáveis de uma forma mais económica. A metodologia da engenharia de fiabilidade pode ser implementada ao longo de todo o ciclo de vida do produto: desde o design e o fabrico até à operação e a manutenção [14].

Na procura de analisar a fiabilidade de um sistema complexo, como um Sistema Elétrico de Energia (SEE), torna-se praticamente inviável considerar a totalidade do sistema de forma direta, devido à sua dimensão e heterogeneidade. Assim, a prática mais comum consiste na adoção de uma abordagem estruturada, baseada em etapas específicas. Numa primeira fase, procede-se à decomposição do sistema em subsistemas ou componentes elementares, de modo a simplificar a sua representação e análise. Seguidamente, identificam-se os modos de falha de cada componente de forma individual, bem como os modos de falha resultantes da interação no sistema global. Por fim, determinam-se os índices de fiabilidade adequados, permitindo quantificar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais [13].

A fiabilidade de um produto é avaliada com base em dados de desempenho em ambientes reais, visando a medição e melhoria da sua fiabilidade durante a fase de produção. Apesar da crescente pressão para a redução de custos, medidas de economia imediatas, como a utilização de componentes de menor qualidade ou a realização de testes superficiais, podem comprometer significativamente a fiabilidade e qualidade do produto. Tais práticas, embora representem uma redução de custos a curto prazo, tendem a gerar despesas acrescidas no longo prazo, resultantes de custos associados a garantias e perda de confiança por parte dos clientes. Assim, é crucial equilibrar fiabilidade, satisfação do cliente, tempo de mercado, vendas e recursos [3].

As principais razões para o estudo da fiabilidade incluem:

- Verificar o desempenho sob diferentes condições, através de testes do produto em diferentes temperaturas e altitudes ou em exposição à água do mar. Isto ajuda a avaliar a forma como esses fatores afetam os componentes e garantem a validade dos resultados;

- Assegurar a consistência do produto, quando submetido repetidamente ao mesmo ambiente, com o objetivo de prevenir falhas, riscos de segurança e perdas financeiras ou humanas;
- Avaliar ferramentas de recolha de dados, através de questionários e métodos *split-half* e *test re-test*, importantes para garantir a consistência e precisão dos dados recolhidos [15].

A implementação de um programa de estudo de fiabilidade confere diversas vantagens para as empresas, tais como as seguintes:

- Período de garantia ótimo e estimativa dos seus custos, redução de custos de garantia ou aumento do prazo de garantia para o mesmo custo;
- Tempo ótimo de substituição preventiva de componentes em sistemas reparáveis;
- Melhor informação acerca dos tipos de avarias e os esforços necessários em investigação e desenvolvimento para a minimização dessas avarias;
- Estabelecimento dos tempos para a avaria esperados e preparação para a sua ocorrência;
- Guia para tomar decisões de ação corretivas na minimização de avarias e na redução dos tempos de manutenção e reparação;
- Capacidade de avaliar fornecedores do ponto de vista da fiabilidade;
- Promoção das vendas baseando nos índices de fiabilidade dos produtos;
- Aumento da satisfação do cliente e promoção da imagem e reputação da empresa [9].

Para o estudo de fiabilidade em sistemas mecânicos, é frequentemente utilizada a denominada curva da mortalidade, *bathtub curve* ou curva da banheira, devido à sua semelhança gráfica com o perfil de uma banheira. Esta curva, idêntica à da Figura 2, é tipicamente segmentada em três fases distintas: período de infância (A), de maturidade (B) e de desgaste (C) [10].

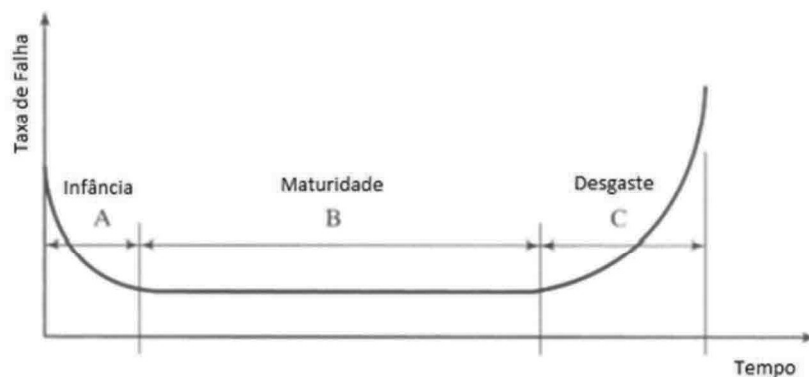


Figura 2 - Curva da mortalidade para equipamentos mecânicos [10]

O período de infância (A), referente ao período de estágio inicial, é caracterizado por uma elevada taxa de falhas, associadas a defeitos de fabrico, como controlo de qualidade insuficiente ou componentes com defeito. Já o período de maturidade (B) apresenta uma taxa de falhas aproximadamente constante, resultante de eventos aleatórios dentro das condições operacionais previstas. Por fim, o período de desgaste (C) ocorre no final da vida útil do sistema, com um aumento significativo de falhas devido ao envelhecimento, desgaste mecânico, corrosão e ausência de manutenção preventiva, que pode levar à mitigação ou prevenção de problemas [10].

A análise da curva da mortalidade permite identificar padrões de falha e implementar estratégias de manutenção direcionadas a maximizar a fiabilidade e prolongar a vida útil dos equipamentos [10]. Esta curva representa a relação entre a vida útil de um produto e a taxa de falhas. A vida útil pode ser medida em diversas unidades, como minutos, horas, anos, ciclos ou utilizações, enquanto a taxa de falhas é expressa como o número de falhas em relação às unidades ainda em funcionamento por unidade de tempo [3].

A ausência de fiabilidade na produção e na qualidade do produto resulta em custos de falha que podem ser classificados como internos ou externos. As falhas internas referem-se a defeitos identificados na fábrica, antes da expedição do produto para venda, e os custos associados incluem a repetição de testes de qualidade, desperdício de materiais e incumprimento de prazos. As falhas externas ocorrem quando os defeitos são detetados pelo cliente, gerando custos significativos para empresa, como a reposição de produtos que estejam avariados e a logística de recolha, além dos encargos relacionados com garantias [10].

Aumentar a fiabilidade de um produto pode elevar os custos de produção, mas isto não significa necessariamente um menor custo global. O custo total de um produto não deve ser avaliado apenas com base no seu preço de fabrico e lançamento no mercado, mas também ao longo de toda a sua vida útil. Este custo inclui despesas com garantias, substituição de produtos defeituosos, perdas financeiras recorrentes da insatisfação dos clientes, redução nas vendas e outros fatores que possam surgir ao longo do tempo.

Matematicamente, a fiabilidade em função do tempo, designada por $R(t)$, pode ser quantificada e analisada sob a forma de uma probabilidade, associada a um fenómeno aleatório ou impossível de prever, e quanto mais próximo estiver o seu valor de 1, mais fiável será o equipamento em questão, e quanto mais próximo de 0, mais falhas apresentará ao longo do tempo [10].

A equação 1 mostra a relação entre a fiabilidade e a taxa de falhas ou a probabilidade de falha de um determinado sistema [10].

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(x) dx = 1 - F(t) \quad (1)$$

O T e o t representam, respetivamente, o tempo de vida do produto e o período de funcionamento, que normalmente toma o valor 0, por ser medido desde o instante em que o

produto deu início ao seu funcionamento. O $f(x)$ é a função densidade de probabilidade da falha de um determinado equipamento. $F(t)$ representa a probabilidade de o equipamento ou componente falhar até ao instante t e $R(t)$ representa a probabilidade de o mesmo sobreviver sem falhas até ao mesmo instante t [10].

Portanto, a fiabilidade é uma probabilidade de sucesso (R) que é complementar à probabilidade de insucesso ou de falha (F):

$$R + F = 1 \quad (2)$$

Embora a operação sem falhas, ou $R(t) = 100\%$, seja um ideal teórico, na prática, equipamentos mais fiáveis nem sempre são a melhor solução. Produtos com maior fiabilidade geralmente apresentam custos de aquisição mais elevados, e a opção mais cara pode demandar mais intervenções de manutenção. Assim, é crucial equilibrar custo, fiabilidade e manutenção, seleccionando a alternativa mais vantajosa para as necessidades específicas da operação [10].

Um aspeto que também influencia significativamente a fiabilidade é a durabilidade. Um equipamento ou componente que se destaque pela sua durabilidade, a probabilidade de operar por um período prolongado sem a necessidade de manutenção corretiva não programada será maior [10].

Para a análise da fiabilidade de um equipamento, pode ser utilizada a distribuição de *Weibull*, cujo gráfico encontra-se ilustrado na Figura 3, por ter em consideração o envelhecimento do equipamento ao longo do tempo, o que a torna a sua utilização muito frequente neste ramo.

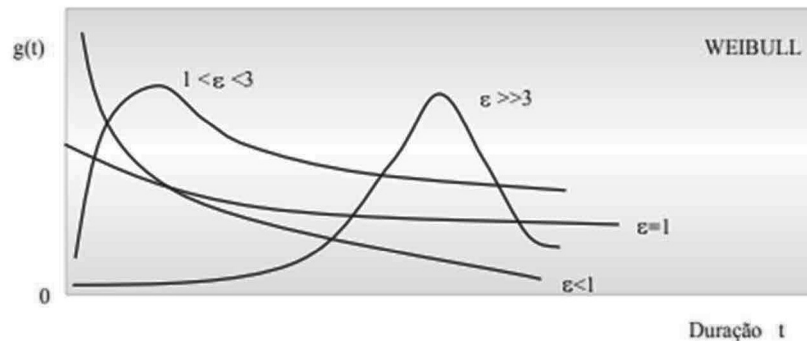


Figura 3 - Distribuição de *Weibull* [9]

A função densidade de probabilidade da distribuição de *Weibull* é dada pela seguinte equação:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta - x_0} \cdot \left(\frac{x - x_0}{\beta - x_0}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\alpha\left(\frac{x-x_0}{\beta-x_0}\right)} \quad (3)$$

Onde:

- x_0 - Parâmetro de localização (corresponde ao menor valor de x);
- α - Parâmetro de forma (à medida que o seu valor aumenta, a moda da distribuição desloca-se para valores maiores de x);

- β - Parâmetro de escala (corresponde à vida característica: $\beta < 1$ – período infantil, $\beta = 1$ – vida útil, $\beta > 1$ – período de desgaste;
- e - Número de Neper, tem o valor aproximado de 2,718 [10].

A distribuição Exponencial Negativa também é utilizada no âmbito do estudo da fiabilidade, cujo gráfico é ilustrado na Figura 4.

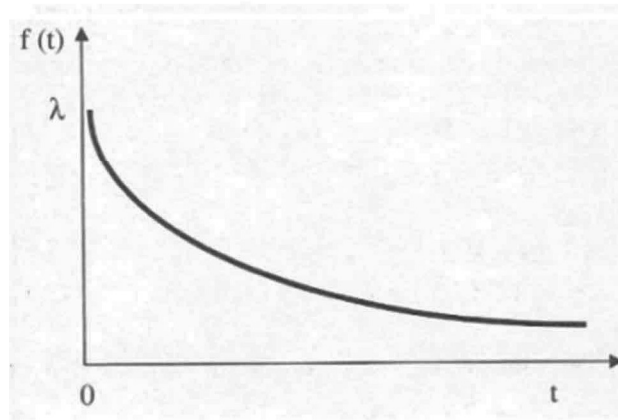


Figura 4 - Distribuição Exponencial Negativa [10]

A função densidade de probabilidade da distribuição Exponencial Negativa é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{4}$$

Onde:

$f(t)$ – Probabilidade de falha;

t – Tempo de funcionamento;

λ – Taxa de avarias ou ritmo médio de falhas [10]

No âmbito deste estudo, podem igualmente ser consideradas as associações em série e em paralelo. No caso da associação em série (Figura 5), o critério de sucesso exige o funcionamento pleno de todos os componentes que integram um sistema. Assim, a falha de um único componente é suficiente para comprometer o desempenho global, conduzindo o sistema à condição de indisponibilidade [16].

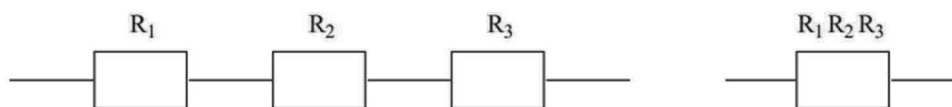


Figura 5 - Associação em série de componentes [16]

O cenário mais habitual é os componentes serem independentes, com a fiabilidade do sistema a ser dada pela equação 5, mais conhecida pela lei do produto da fiabilidade [16].

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

No caso de os componentes serem iguais, a fiabilidade do sistema é dada por:

$$R_s = R^n \quad (6)$$

A conclusão que se pode retirar com este teorema é que a fiabilidade do sistema diminui à medida que o número de componentes ligados em série aumenta [16].

No caso da associação em paralelo (Figura 6), esta apresenta como critério de sucesso, o funcionamento, no mínimo, de um componente.

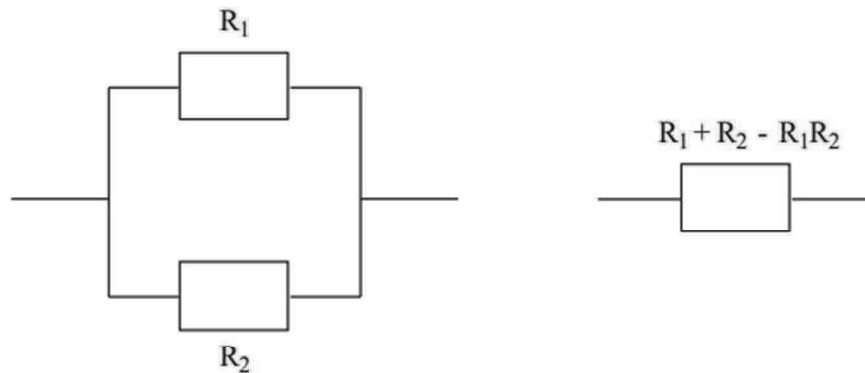


Figura 6 - Associação em paralelo de duas componentes redundantes [16]

Na hipótese de cada um dos componentes se apresentarem no seu período de vida útil, a fiabilidade do sistema é dada por:

$$R_s = R_1 + R_2 - R_1 R_2 = 1 - Q_1 Q_2 = 1 - Q_s \quad (7)$$

Em que Q_1 , Q_2 e Q_s são, respetivamente, as indisponibilidades para os componentes 1, 2 e para o sistema. Quando existem n componentes ligados em paralelo, a indisponibilidade total do sistema, Q_s , é obtida pela soma das indisponibilidades individuais de cada componente, conforme ilustrado na equação 8 [16].

$$Q_s = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (8)$$

2.2.2 Disponibilidade

Tendo por referência a norma portuguesa NP EN 13306 (2007)[17], a disponibilidade é definida como a “capacidade de um ativo para desempenhar uma função específica sob certas condições, num determinado momento ou ao longo de um intervalo de tempo, considerando que o

fornecimento dos recursos externos necessários está garantido”. É importante realçar que essa capacidade é influenciada pela interação entre a fiabilidade, a manutenibilidade e a adequação da manutenção [9].

Os estudos de disponibilidade consideram a manutenção a ser realizada no sistema e o tempo necessário para o seu restauro, tendo como objetivo garantir a máxima disponibilidade do sistema em análise, identificando os elementos mais críticos que, devido a uma taxa de falhas mais elevada ou a tempo de restauro mais longos, tornam o sistema indisponível, impactando os custos [18].

A disponibilidade, ao contrário da fiabilidade, que se refere à continuidade do funcionamento sem interrupções até um determinado momento e ignora os eventos subsequentes a uma falha, considera somente o estado do produto num instante específico, sem tomar em conta a existência de falhas ou de reparações, complementando-se ambas as características [10].

A avaliação da disponibilidade pode ser realizada por meio da razão entre as horas em que o equipamento se encontra disponível e o total de horas de operação, o que representa uma probabilidade. Esta medição está completamente interligada ao planeamento de quem a vai utilizar, para que finalidade e por quanto tempo, que é fundamental para o delineamento do planeamento, com a finalidade de avaliar o comportamento do equipamento [10].

O tempo médio até à falha ou MTTF (*Mean Time to Failure*) é o tempo médio para falha de componentes que não podem ser reparados. A equação 9 representa matematicamente que o indicador MTTF é o tempo total acumulado de uma população de um item não reparado dividido pelo número total de falhas dentro do intervalo medido [19].

$$MTTF = \frac{t}{f} = \frac{1}{\lambda_{cum}} \quad (9)$$

O tempo médio entre falhas ou MTBF (*Mean Time Between Failures*) é o tempo total acumulado de uma população de um item reparado dividido pelo número total de falhas do intervalo medido, assumindo que não existe tendência na ocorrência de falhas, ilustrado pela equação 10 [19]. O tempo total acumulado de uma população de um determinado item reparável pode ser expresso pelo somatório de todos os TBFs (Tempos de Bom Funcionamento), que correspondem aos intervalos de operação decorridos entre falhas consecutivas do equipamento, contabilizados desde o início do seu funcionamento até ao término do período de estudo considerado.

$$MTBF = \frac{t}{f} = \frac{1}{\lambda_{cum}} \quad (10)$$

Através do conhecimento deste tempo médio, consegue-se construir graficamente o ciclo de funcionamento de um componente, como representado na Figura 7.



Figura 7 - Representação gráfica do *Mean Time Between Failures* (dois estados) [3]

Quanto ao funcionamento do sistema com todos os estados disponíveis, este pode ser apresentado pela Figura 8.

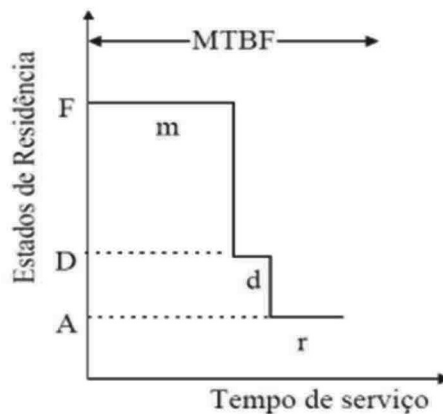


Figura 8 - Representação gráfica *Mean Time Between Failures* (três estados) [3]

Onde:

- F – Estado de funcionamento (em serviço);
- D – Estado de detecção da avaria (fora de serviço);
- A – Estado de reparação da avaria (fora de serviço).

A adoção de diferentes classificações de disponibilidade pode conduzir a conclusões divergentes relativamente ao desempenho de um sistema, o que potencialmente origina interpretações equivocadas ou a aplicação inadequada dessas métricas. Quando a organização e o cliente recorrem a classificações distintas, as percepções acerca da disponibilidade do sistema podem não coincidir, o que compromete a uniformidade da avaliação, tornando-se fundamental a seleção cuidadosa da classificação.

Quanto à classificação da disponibilidade, existem três tipos: a disponibilidade intrínseca, a disponibilidade obtida e a disponibilidade operacional [20].

- **Disponibilidade Intrínseca, A_i**

Esta disponibilidade corresponde ao desempenho do sistema no regime estacionário, quando se considera apenas o tempo de paragem do sistema para a manutenção corretiva. Esta classificação é frequentemente referida como a disponibilidade vista pelo pessoal da manutenção, que exclui o tempo de inatividade da manutenção preventiva, os atrasos logísticos, no abastecimento e os administrativos. Uma vez que estas outras causas de indisponibilidade podem ser minimizadas ou eliminadas, um valor de disponibilidade que considere apenas o tempo de inatividade corretivo constitui uma propriedade intrínseca do sistema [20].

Este tempo de inatividade corretivo reflete a eficácia e rapidez do pessoal da manutenção, bem como o seu nível de especialização e formação. Igualmente, reflete características que devem ser importantes para os engenheiros que concebem o sistema, tais como o nível de complexidade das reparações, fatores ergonómicos e se a facilidade de reparação foi adequadamente considerada na conceção [20].

Assim a disponibilidade, para um sistema no regime estacionário, é dada pela equação 11:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (11)$$

- **Disponibilidade Obtida, A_A**

A disponibilidade obtida é muito semelhante à disponibilidade intrínseca, com a exceção de que os tempos de paragem para manutenção preventiva são incluídos. Este tipo de disponibilidade é tradicionalmente referido como a disponibilidade registada pelo departamento de manutenção. Inclui tanto a manutenção corretiva como a preventiva, mas não inclui atrasos de logística, de fornecimento ou administrativos [20].

Esta disponibilidade pode ser calculada através do tempo médio entre ações de manutenção (MTBM) e do tempo médio de paragem para manutenção, M, utilizando a equação 12.

$$A_A = \frac{MTBM}{MTBM + M} \quad (12)$$

- **Disponibilidade Operacional, A_o**

A disponibilidade operacional é uma medida da disponibilidade média real durante um intervalo de tempo e inclui todas as fontes de inatividade experimentadas, como a inatividade administrativa ou a inatividade logística. Esta disponibilidade é a que o cliente presencia efetivamente, sendo, essencialmente, a disponibilidade baseada em eventos reais que

ocorreram no sistema. Em muitos casos, a disponibilidade operacional não pode ser controlada pelo fabricante devido a variações na localização, nos recursos e outros fatores [20].

Matematicamente, a disponibilidade operacional é dada pela equação 13:

$$A_o = \frac{Uptime}{Operating\ cycle} \quad (13)$$

em que o *Operating Cycle* é o período global de funcionamento que está a ser investigado e o *Uptime* é o tempo total em que o sistema esteve a funcionar durante o ciclo de funcionamento [20].

A compreensão da disponibilidade do sistema e a sua interligação com os custos de operação e manutenção possibilita uma melhor avaliação da qualidade da produção e do desempenho económico do sistema [19].

2.2.3 Manutenibilidade

A manutenibilidade refere-se à facilidade com que as operações de reparação de um equipamento ou componente podem ser realizadas. Esse conceito engloba todos os fatores que influenciam a aptidão de um equipamento para receber manutenção incluindo acessibilidade aos componentes, condições de segurança no trabalho, precisão nas intervenções e a relação custo-benefício associada ao processo [20]. Trata-se de um atributo diretamente relacionado ao design e à conceção do produto [10].

A manutenibilidade pode ser definida, da mesma forma, como a probabilidade de que um equipamento seja restaurado com sucesso ao seu estado de funcionamento normal. Esta característica é, em grande medida, determinada nas fases de conceção e fabrico dos produtos, uma vez que, durante o desenvolvimento do projeto, são incorporados aspetos que influenciam diretamente a facilidade, a rapidez e a segurança de futuras operações de manutenção. Assim, ao assegurar que o equipamento seja concebido de modo a permitir intervenções eficientes e eficazes ao longo da sua vida útil, garante-se uma maior previsibilidade e otimização do seu desempenho operacional [10].

Genericamente, a manutenção pode ser categorizada em dois tipos principais: a manutenção preventiva e a manutenção corretiva.

No que diz respeito à manutenção preventiva, o objetivo central consiste em examinar e planear todas as ações destinadas a prevenir a ocorrência de falhas nos diversos componentes do sistema. Para tal, recorrem-se a estratégias como a deteção e eliminação de falhas incipientes ou a substituição programada de componentes sujeitos a desgaste, sempre que a sua vida útil seja previsível ou quando a monitorização do seu estado de degradação se revele difícil de averiguar. Para esta análise, consideram-se dados como o intervalo entre atividades de manutenção, a descrição detalhada das tarefas a executar, o tempo necessário para a sua

realização, a especialização e o número de técnicos envolvidos, bem como os custos associados do material aplicado [3].

Por outro lado, a manutenção corretiva tem como finalidade restabelecer a funcionalidade de um dispositivo ou de uma parte dele após a ocorrência de uma falha. Esta abordagem implica a identificação e substituição da LRU (*Line Replaceable Unit*) defeituosa, tirando partido das informações dos sistemas de diagnóstico e avaliando aspetos como a acessibilidade e a facilidade de extração definidas na conceção do equipamento [20]. Para esta análise, são fornecidos parâmetros como a taxa de avarias, o tempo médio de reparação, o número de técnicos necessários para a execução da intervenção, a sua especialização e o conjunto de operações indispensáveis para o restabelecimento da funcionalidade [3].

Quanto à fase de projeto do equipamento, este conceito dá ênfase aos seguintes aspetos:

- Boa acessibilidade;
- Montagem das unidades concebidas para substituições rápidas;
- Acesso a inspeções internas por meios alternativos, como fibras óticas;
- Indicadores de vibração;
- Identificação dos circuitos pelas cores convencionais;
- Modularização de funções [9].

A obtenção de uma capacidade de manutenção satisfatória depende da consideração de diversos fatores, entre os quais se destacam:

- O equipamento ou a máquina pode falhar num momento ou noutro;
- O posicionamento dos ecrãs de manutenção, dos pontos de controlo, dos manómetros, dos contadores e a posição de um conjunto em relação a outros;
- As limitações impostas pela estrutura humana;
- O ambiente em que serão efetuadas as operações de manutenção ou de reparação;
- A conceção do equipamento de ensaio;
- A apresentação das informações no manual de manutenção e reparação [20].

Frequentemente a manutenibilidade é avaliada por meio do índice MTTR (*Mean Time to Repair*). Este índice corresponde à média da distribuição do tempo necessário para a reparação de um sistema. O seu cálculo pode ser realizado através da média ponderada dos tempos de reparação associados a cada modo de falha, sendo a ponderação efetuada em função da respetiva taxa de falha, conforme se apresenta na equação 14 [10].

$$MTTR = \frac{\sum \lambda t_r}{\sum \lambda} \quad (14)$$

onde t_r é o tempo de reparação do modo de falha r .

O MTTR é representado igualmente pelo tempo total de manutenção corretiva (tempo necessário para execução de ações com resultado de uma falha, para restabelecer o equipamento/sistema à condição operacional), dividido pelo número total de ações corretivas, resultantes da não operacionalidade de equipamentos e sistemas, durante um determinado período. Este indicador é medido com base no tempo total de manutenção, incluindo o tempo de diagnóstico, resolução de problemas, desmontagem, remoção/substituição, tempo de reparação ativa, testes de verificação, em que a reparação é adequada, os atrasos nos movimentos logísticos e atrasos no tempo dedicado a tarefas administrativas [19].

2.2.4 Segurança Operacional

O conceito de segurança operacional está intrinsecamente ligado com os outros três elementos da análise RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*) mencionados anteriormente, especialmente no contexto de aplicações críticas ou instalações industriais de elevado risco. Este conceito torna-se ainda mais relevante quando a ocorrência de falhas ou a indisponibilidade dos equipamentos pode representar riscos para a vida humana e para o meio ambiente e económico, devido à perda de bens ou à interrupção de atividades [9].

Os princípios técnicos de segurança fundamentam-se na análise detalhada das condições potencialmente perigosas num equipamento, abrangendo modos de operação, manutenção e cenários de funcionamento, que consideram tanto a gravidade de possíveis consequências e da probabilidade de ocorrência dos riscos envolvidos [10]. Da mesma forma, torna-se importante conhecer a manutenibilidade dos componentes de um equipamento e a sua relação com a segurança, sobretudo no que concerne à facilidade e à eficácia com que as intervenções de manutenção podem ser executadas. Tal avaliação integra não apenas a análise do risco associado à possibilidade de que essas intervenções originem novos perigos, mas também a consideração do tempo necessário para restabelecer o sistema ao seu estado seguro de funcionamento [10].

As técnicas analíticas aplicadas à segurança operacional podem ser classificadas em duas categorias principais: métodos qualitativos e métodos quantitativos. Ambas as abordagens partilham o objetivo comum de identificar dependências causais entre os perigos ao nível do sistema e as falhas nos seus componentes individuais [20]. Os métodos quantitativos concentram-se em analisar as causas dos perigos no sistema, procurando identificar relações e mecanismos que possam levar a falhas. Os métodos qualitativos, por outro lado, procuram fornecer estimativas mais precisas sobre as probabilidades, taxas de ocorrência e gravidade das possíveis consequências [20].

A crescente complexidade dos sistemas elétricos, associada a avanços na conceção, melhorias nos materiais, realização de inspeções programadas, implementação de projetos à prova de falhas e a utilização de redundância, contribui para uma redução do risco, mas frequentemente

resulta em custos mais elevados. No entanto, o risco pode ser minimizado até um nível considerado razoável ou praticamente exequível [20].

Quanto à classificação dos tipos de riscos, de modo a avaliar o nível de segurança vigente, estabelecendo três categorias principais: o risco intolerável, o risco tolerável e o risco negligenciável [21].

O risco intolerável não é aceite em nenhuma circunstância, implicando a sua imediata resolução, com a inclusão de medidas que suprimam ou que reduzam a sua severidade [21].

O risco tolerável é considerado aceitável, desde que possam ser obtidos algum benefício e que o risco tenha sido reduzido tanto quanto possível. A dificuldade reside em medir objetivamente o benefício, se for necessário atribuir um custo a acidentes que resultem em danos físicos ou até mesmo morte [21].

O risco negligenciável é um tipo de risco muito pequeno e que é quase considerado insignificante, sem a necessidade de qualquer tipo de precauções [21].

No âmbito geral, a análise de segurança tem como principais objetivos:

- Identificar e registar os riscos, procedendo à caracterização das situações de perigo e documentando o progresso alcançado na mitigação dos riscos associados a diferentes cenários;
- Realizar a análise de riscos, de forma a identificar as áreas críticas em termos de segurança e estabelecer os critérios de segurança a adotar no desenvolvimento de um determinado projeto;
- Avaliar os riscos inerentes às operações e à manutenção, através da identificação de situações de risco durante estas atividades e da indicação de ações corretivas suscetíveis a ser implementadas;
- Avaliar as situações de risco, mediante a análise das atividades de segurança, a definição do seu *status*, progresso e resultados atingidos, bem como a identificação das áreas críticas em termos de segurança;
- Resumir as atividades de segurança [3].

2.3 Análise FMEA/FMECA

O método FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) tem como principal objetivo assegurar a forma como possíveis problemas podem ser identificados e tratados durante as fases de desenvolvimento de um produto e de um processo. Esta é uma metodologia estruturada que permite analisar como um equipamento pode potencialmente falhar e efetuar a respetiva análise de risco, com base em equipas multidisciplinares [22].

A origem do método FMEA remonta a 1949, quando foi desenvolvido pelo Exército dos Estados Unidos com o propósito de assegurar a fiabilidade e o sucesso das missões militares. Nessa época, este procedimento era designado por *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*. Na década de 1970, o método ultrapassou o âmbito da indústria aeroespacial, tendo sido adotado pela primeira vez pela *Ford Motor Company*, que o aplicou não apenas para otimizar processos internos de projeto, mas também incentivou a sua aplicação junto das empresas fornecedoras [23].

Neste método, os defeitos são priorizados de acordo com a gravidade das suas consequências, a frequência da sua ocorrência e a facilidade com que podem ser detetadas. A principal função do FMEA é a não é a resolução direta das falhas, mas sim a sua prevenção, uma vez que, quando aplicado em conjunto com outras ferramentas de fiabilidade, permite antecipar falhas e mitigar os seus efeitos [22]. O propósito central do processo consiste em definir uma classificação que avalie a severidade dos impactos resultantes de eventuais falhas no sistema, considerando simultaneamente as suas causas potenciais e a probabilidade de ocorrência. Adicionalmente, o método integra a análise dos mecanismos de controlo, tanto preventivos como de deteção, que influenciam a probabilidade de identificação da falha, caso esta se manifeste [11].

Para apoiar a identificação das causas potenciais associadas a um modo de falha, recorre-se frequentemente ao diagrama de *Ishikawa* ou "Espinha-de-Peixe" (Figura 9). Este diagrama permite estruturar de forma hierárquica as possíveis causas de um problema ou de uma oportunidade de melhoria, proporcionando uma representação gráfica e sucinta da resposta de um sistema perante diferentes combinações de eventos, fatores ou eventos que possam ocorrer [21].

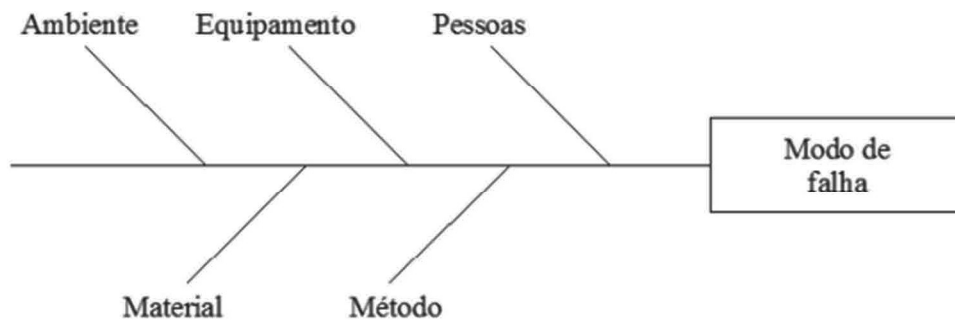


Figura 9 - Diagrama de Ishikawa ou "Espinha de Peixe" [3]

O método FMEA apresenta vários benefícios, de entre os quais se destacam:

- Identificação precoce e eliminação de potenciais modos de falha;
- Melhoria do rendimento da produção;
- Melhoria da qualidade, fiabilidade e segurança de um produto/processo;
- Aumento da satisfação do utilizador;
- Redução do impacto na margem de lucro de uma empresa;

- Redução do tempo e custo de desenvolvimento de um produto;
- Reduzir a possibilidade de ocorrer o mesmo tipo de falha no futuro [22].

A este método pode-se adicionar uma componente crítica, que é utilizada para traçar a probabilidade dos modos de falha em relação à gravidade das suas consequências, com a metodologia sendo denominada FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) [22].

Para o registo sistemático das informações resultantes do estudo FMECA, recorre-se a um documento estruturado, designado Formulário FMECA (Figura 10). Este instrumento tem como finalidade uniformizar o processo, facilitar a análise e garantir a rastreabilidade dos dados. O formulário integra, entre outros elementos, a identificação do tipo de FMECA em execução, a descrição dos modos e causas de falha, os efeitos e consequências associadas, os controlos existentes, bem como a determinação dos valores RPN (*Risk Priority Number*), a definição do responsável pelo processo e o registo das ações preventivas ou corretivas a adotar [22].

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)														
Product: Project / Phase: System / Subsystem / Equipment:										Prepared by: Approved by:				
Ident. number	Item/Block	Function	Failure cause	Mission phase/Op. mode	Failure effects		Severity	Failure detection method	Compensation provisions	Severity Number (SN)	Probability Number (PN)	Criticality Number (CN)	Corrective actions	Remarks
					Local effects	End effects								

Figura 10 - Formulário FMECA [3]

O conteúdo de cada coluna da tabela representativa do formulário FMECA do sistema é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos campos das tabelas FMECA

Nº coluna	Campo	Descrição do Campo
1	Referência	Código de referência da decomposição hierárquica, único para item em análise, frequentemente expressa em numeração decimal.
2	Componente	Descrição do item referenciado em desenhos técnicos / documentos relevantes
3	Função	Descrição sucinta da função desempenhada por item
4	Modo de falha	Potenciais modos de avaria do item em análise
5	Potencial causa	Principais causas prováveis de modos de avaria.
6	Efeito local	Efeito da avaria no item em análise
7	Efeito ao nível do topo	Efeito da avaria no nível de topo

Nº coluna	Campo	Descrição do Campo
8	Método de deteção	Modo como o operador ou técnico de manutenção deteta a avaria e identifica a sua causa
9	Probabilidade de Ocorrência (PN)	Uma avaliação da probabilidade de ocorrência do modo de falha assumida deve ser feita e atribuída um PN relevante.
10	Nível de severidade (SN)	Avaliação da importância do efeito do modo de avaria na operação
11	Número de Deteção (DN)	Estimativa da mudança para identificar e eliminar o defeito antes que o sistema ou cliente sejam afetados
12	Número de Prioridade de Risco (RPN)	O risco é avaliado por uma medida subjetiva da intensidade do efeito e uma estimativa da probabilidade esperada de sua ocorrência
13	Comentários	Qualquer nota relevante que possa ajudar a compreender a análise

O modo de falha pode ser representado por uma matriz de criticidade, usando o código de severidade num eixo e o código do nível de probabilidade no outro. Para uma avaliação quantitativa, o número de criticidade modal C_m é calculado para cada modo de falha de cada item, enquanto o número de criticidade do item C_r é determinado para cada item. O número de criticidade é definido pela equação 15 [22].

$$C_m = \lambda_p \alpha \beta t \quad (15)$$

Onde λ_p é a taxa de falhas da peça, α é a taxa do modo de falha, β é a probabilidade condicional e t é a duração da fase da missão aplicável, geralmente expressa em horas ou em número de ciclos de funcionamento.

Quanto ao número de criticidade do item, é dado pela equação 16.

$$C_r = \sum (C_m)^n \quad (16)$$

O rácio do modo de falha pode ser obtido a partir de uma base de dados específica. Para análise de FMECA em nível funcional, pode ser necessário recorrer ao julgamento de engenharia para atribuir a razão do modo de falha. O número de probabilidade β representa a probabilidade condicional de que o efeito da falha resulte na classificação de severidade identificada, dado que o modo de falha ocorreu. Para a análise gráfica, uma matriz de criticidade pode ser elaborada utilizando C_r ou C_m , em um dos eixos e código de severidade no outro [3].

Para avaliar o risco do projeto, este método utiliza o Número de Prioridade de Risco (RPN), que é dado pela equação 17. Este indicador é a multiplicação da classificação da probabilidade da ocorrência (PN), do nível de severidade (SN) e do nível de detecção (DN) [3].

$$RPN = PN * SN * DN \quad (17)$$

A Ocorrência refere-se à probabilidade de que uma causa ou mecanismo específico se manifeste ao longo do ciclo de vida do projeto. A mitigação ou controlo de uma ou mais causas ou mecanismos associados ao modo de falha, por meio de alterações o design ou na conceção, constitui a única abordagem efetiva para reduzir a classificação atribuída à ocorrência [3].

A probabilidade de ocorrência ou *Probability Number* (PN) é classificada a “1” a “10” conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da probabilidade de ocorrência [3]

Critério: Probabilidade de Ocorrência (PN)		
Muito elevada: a falha é quase inevitável	> 1 em 2	10
Elevada: falhas repetidas	1 em 3	9
	1 em 8	8
	1 em 20	7
Moderada: falhas ocasionais	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 2000	4
Baixo: relativamente poucas falhas	1 em 15000	3
	1 em 150000	2
Muito baixo: a falha é pouco provável	< 1 em 1500000	1

A severidade corresponde à avaliação da gravidade do efeito resultante do modo de uma falha potencial, caso esta venha a ocorrer, sobre o próximo sistema ou cliente. Este parâmetro aplica-se exclusivamente ao impacto gerado pelo efeito. A redução no nível de severidade pode ser alcançada por meio de uma modificação no design que elimine a ocorrência do modo de falha em questão [3].

O nível de severidade ou *Severity Number* (SN) é classificado de “1” a “10” conforme a Tabela 3

Tabela 3 - Classificação do nível de severidade [3]

Efeito	Severidade do efeito	Classificação
Perigoso, sem aviso prévio	Classificação de severidade muito alto quando um potencial efeito/modo de falha afeta a operação do sistema sem aviso prévio. Requer ações de emergência.	10
Perigoso, com aviso prévio	Classificação de severidade muito alto quando um potencial efeito/modo de falha afeta a operação do sistema com aviso prévio. Alarmes sonoros ou visuais	9
Muito alta	Sistema inoperacional, com perda de funções primárias sem comprometer a segurança.	8
Alta	Sistema inoperacional, com danos no equipamento.	7
Moderada	Sistema inoperacional, com menos danos no equipamento.	6
Baixa	Sistema inoperacional, sem danos no equipamento.	5
Muito Baixa	Sistema operacional, mas com um nível significativo de degradação e performance.	4
Menor	Sistema operacional, mas com um nível baixo de degradação e performance	3
Muito Menor	Sistema operacional com mínima interferência.	2
Nenhum	Nenhum efeito	1

O nível de detecção avalia a eficácia das verificações de design em identificar causas potenciais ou falhas antes que o sistema seja enviado para produção. Para obter uma classificação mais baixa, geralmente é necessário aprimorar as verificações de design [3]. Adicionalmente, a classificação do nível de detecção pode influenciar a avaliação da probabilidade de ocorrência, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada e robusta no processo de análise [3].

O nível de detecção ou *Detection Number* (DN) é classificado de “1” a “10”, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do nível de detecção [3]

Deteção	Probabilidade de deteção por verificação de design	Classificação
Incerteza absoluta	Verificação de projeto não irá e/ou não consegue detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	10
Muito remota	Muito remota hipótese de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	9
Remoto	Remota hipótese de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	8

Deteção	Probabilidade de deteção por verificação de design	Classificação
Muito baixa	Muito baixa possibilidade de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	7
Baixa	Baixa possibilidade de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente.	6
Moderada	Moderada hipótese de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	5
Moderadamente alta	Moderadamente alta hipótese de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	4
Alta	Grande hipótese de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	3
Muito alta	Muito alta hipótese de verificação de Design irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	2
Quase certo	Verificação do projeto quase certamente irá detetar uma causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente	1

Para valores elevados de RPN, ações corretivas devem ser implementadas pela equipa de Qualidade para mitigar os riscos considerados inaceitáveis. Uma atenção especial é recomendada quando a severidade é muito alta (valores entre 9 e 10), a ocorrência apresenta valores elevados e o RPN excede o valor 100 [3]. O objetivo destas ações é reduzir as classificações de severidade e probabilidade de ocorrência.

Nos casos em que o nível de severidade atinge os valores de 9 ou 10, torna-se imprescindível realizar uma análise aprofundada, centrada no controlo do projeto e na implementação de medidas preventivas e/ou corretivas, independentemente do valor do RPN [3]. Adicionalmente, sempre que os efeitos de falhas potenciais representem risco para o utilizador final, devem ser adotadas ações específicas destinadas a eliminar, mitigar ou controlar as causas associadas. Por outro lado, quando o RPN ultrapassa o valor de 100 e a equipa de verificação não dispõe de meios eficazes para detetar as causas, impõe-se a necessidade de proceder a uma revisão detalhada do design do projeto [3].

A diminuição da classificação da probabilidade de ocorrência apenas poderá ser alcançada através da eliminação ou controlo de uma ou mais das causas ou mecanismos associados ao modo de falha, o que requer uma revisão do projeto ou um aprofundamento de conhecimento fundamental. Em determinados casos, a redução da classificação da deteção poderá também

contribuir para a melhoria da classificação da probabilidade de ocorrência, mediante a realização de novos cálculos ou ensaios [3].

A única forma de reduzir a classificação do nível de severidade é através de uma revisão do projeto, com as principais ações recomendadas a incluir uma revisão do plano de ensaios a realizar, do projeto, da geometria e a definição das especificações dos materiais utilizados. O objetivo primordial das ações recomendadas é a mitigação dos riscos e o aumento da satisfação do cliente [3].

Cada ação recomendada deve ter um responsável designado e uma data prevista para a sua conclusão. Após a identificação da ação corretiva, deverão ser estimadas e registadas as classificações de severidade, ocorrência e deteção resultantes, bem como calculado e registado o respetivo RPN [3].

2.4 Análise FTA

A análise FTA (*Fault Tree Analysis*), ou Análise de Árvore de Falhas, constitui uma abordagem sistemática para a resolução de problemas, fundamentada na identificação das causas primordiais de uma falha por meio de um diagrama representativo. Este método pode ser aplicado tanto à investigação de uma falha específica quanto à análise estruturada de um conjunto de componentes, configurando-se, assim, como uma ferramenta versátil para o estudo das causas subjacentes.

De acordo com Clifton Ericson II, esta metodologia foi inicialmente concebida por H.A. Watson, dos laboratórios *Bell*, no âmbito de um contrato com a Força Aérea dos Estados Unidos para o estudo do sistema de controlo de lançamento do míssil *Minuteman*. Posteriormente, Dave Haasl, da empresa *Boeing*, reconheceu o valor deste método e liderou uma equipa que o aplicou ao sistema *Minuteman Missile*. Em 1965, a *Boeing* e a Universidade de Washington organizaram a primeira conferência sobre segurança de sistemas, marcando o início da difusão internacional da FTA [24]. Na década de 1980, a análise FTA começou a ser mais usual a nível internacional, principalmente por via da indústria da energia nuclear. Desde esse período, a indústria robótica adotou a metodologia e esta tem sido continuamente utilizada nas indústrias de inúmeros países até aos dias de hoje [24].

O principal objetivo desta metodologia é identificar a origem fundamental da falha em análise, proporcionando uma compreensão aprofundada do funcionamento do sistema, avaliando os riscos associados e, a partir dessa avaliação, desenvolvendo estratégias eficazes para a prevenção ou mitigação dos riscos identificados [25].

Esta técnica de análise de falhas apresenta um vasto conjunto de vantagens, destacando-se as seguintes [26]:

- Conhecimento detalhado de todo um sistema, identificando os pontos fracos;
- Obtenção de uma estimativa do grau de fiabilidade de um determinado processo;

- Cálculo da frequência de ocorrência de determinado evento;
- Detecção de potenciais falhas que possam ser indetetáveis por outros métodos;
- Permite detetar procedimentos de manutenção que foquem ações corretivas por forma a diminuir a probabilidade de falhas;
- Identificação de causas básicas de um evento acidental e as falhas mais prováveis que contribuem para a ocorrência de um acidente maior;
- Possibilidade de ser uma análise quantitativa e qualitativa de um só sistema [26].

Esta análise fundamenta-se na construção de um diagrama em forma de árvore (Figura 11), cujo ponto de partida corresponde à identificação do evento de falha. A partir desse evento, o diagrama desenvolve-se segundo uma sequência lógica até que seja possível determinar a causa raiz. O processo é considerado como encerrado quando uma análise adicional deixa de ser eficaz. Este diagrama baseia-se na aplicação da lógica Booleana, recorrendo a portas lógicas para representar os eventos que possam ter originado ou contribuído para o problema [25]. Estas portas lógicas desempenham a função de controlar a passagem de falhas para o evento de topo da árvore, indicando a relação entre os eventos necessários para a ocorrência do evento de topo [26].

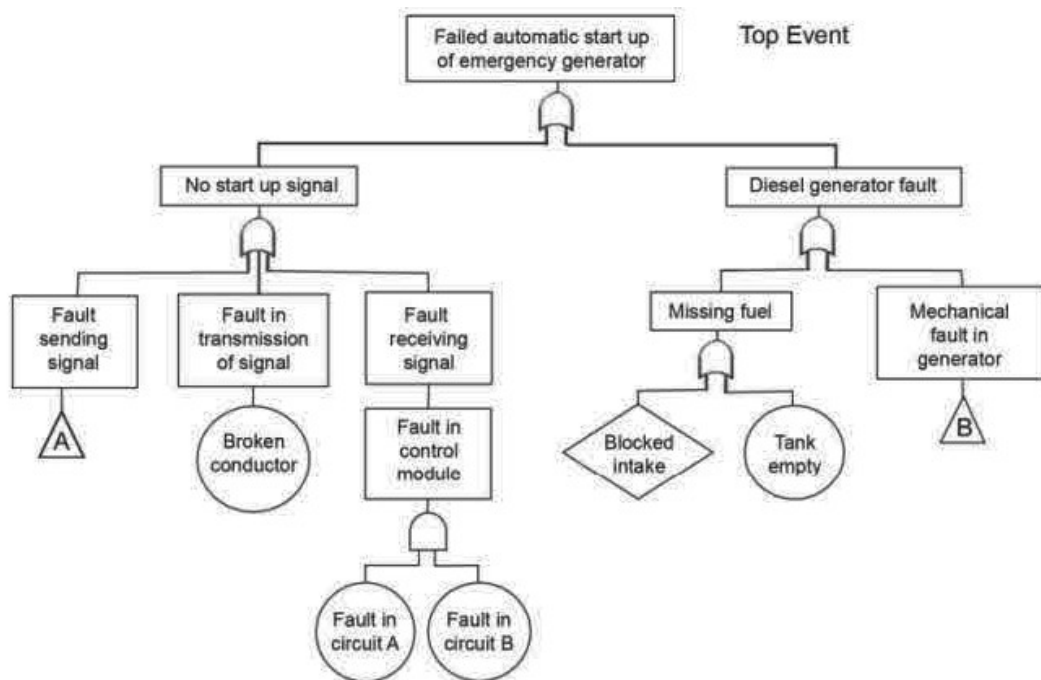



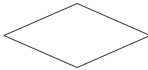
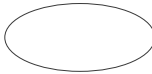
Figura 11 - Diagrama da Árvore de Falhas [25]

O diagrama da árvore de falhas é constituído por diversos tipos de símbolos, tais como os símbolos dos eventos, os símbolos das portas lógicas e os símbolos de transferência.

Os símbolos associados aos eventos são utilizados para a representação de eventos primários e intermediários. Enquanto os eventos primários não são desenvolvidos na árvore de falhas, os

eventos intermediários correspondem ao resultado da saída de uma porta lógica. A Tabela 5 ilustra os símbolos utilizados para a sua representação.

Tabela 5 - Símbolos de Evento [20]

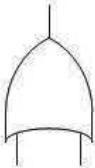

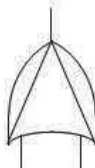
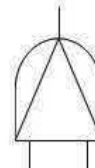
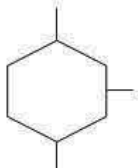
Evento Básico	Evento Externo	Evento não desenvolvido	Evento condicionado	Evento Intermediário
				

Os símbolos dos eventos primários são utilizados essencialmente para os seguintes aspetos:

- Evento básico: falha ou erro num componente ou elemento de um sistema;
- Evento externo: normalmente é esperado a sua ocorrência;
- Evento não desenvolvido: um evento sobre o qual não se dispõe de informações suficientes ou são inconsequentes;
- Evento condicionado: condições que limitam ou afetam as portas lógicas [20].

Quanto aos símbolos das portas lógicas, estes descrevem a relação entre os eventos de entrada e de saída. Os símbolos derivam de símbolos lógicos booleanos, representados pela Tabela 6.

Tabela 6 - Símbolos das portas lógicas [20]

Porta "OU"	Porta "E"	Porta "OR" Exclusiva	Porta "E" Prioritária	Porta Inibidora
				


As portas lógicas funcionam da seguinte forma:

- Porta "OU": – o evento de saída ocorre somente se um ou mais eventos de entrada ocorrerem;
- Porta "E": o evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrerem;
- Porta "OU" Exclusiva: é uma porta "OU" especial onde o evento de saída ocorre somente se exatamente um dos eventos de entrada ocorre;
- Porta "E" Prioritária: – é uma porta "E" especial onde o evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrerem numa sequência ordenada especificada;

- Porta Inibidora: é uma porta representada por um hexágono, a saída do evento ocorre quando uma entrada única atende a alguma condição (entrada condicional) [26].

Já os símbolos de transferência são utilizados para interligar as entradas e as saídas de árvores de falhas relacionadas, com a árvore de falhas de um subsistema ao seu sistema. Estes símbolos são ilustrados pela Tabela 7.

Tabela 7 - Símbolos de transferência [20]

Transferência para dentro	Transferência para fora
	

O símbolo de transferência para dentro indica que a árvore será desenvolvida quando ocorrerem símbolos de transferência para fora. O símbolo de transferência para fora é indicativo que esta parte da árvore deverá ser anexada ao correspondente símbolo de transferência para dentro [26].

A forma mais comum de aplicação desta metodologia consiste na sua sistematização em etapas sucessivas. Cada árvore de falhas é construída com o propósito de analisar única e exclusivamente um evento indesejado, o qual poderá, mais tarde, ser introduzido noutra árvore de falhas como evento de base. Embora a natureza do evento indesejado possa apresentar variações significativas, uma análise FTA segue um procedimento uniforme para qualquer outro tipo de evento [20]. As etapas fundamentais desta análise são as seguintes:

i. Definição do evento indesejado a ser estudado

A definição do evento indesejado pode ser uma tarefa complexa, embora alguns eventos sejam fáceis e óbvios de identificar. Um engenheiro com um conhecimento aprofundado do design do sistema é o profissional mais indicado para auxiliar na definição e enumeração dos eventos indesejados. Estes eventos são então utilizados para realizar as análises de árvore de falhas (FTA). Cada FTA é limitada a um único evento indesejado [20].

ii. Compreensão do sistema

Após selecionar o evento indesejado, todas as causas com probabilidade igual ou superior a zero de influenciar esse evento devem ser investigadas. Contudo, determinar essas probabilidades com exatidão pode ser uma tarefa dispendiosa e demorada. Para contornar essas dificuldades, emprega-se *software* especializado, que torna a análise mais eficiente e econômica. A colaboração entre analistas de sistemas e designers é essencial: os analistas

oferecem uma visão abrangente, enquanto os designers, com conhecimento detalhado do sistema, asseguram que nenhuma causa relevante seja omitida [20].

iii. Construção da árvore de falhas

Após selecionar o evento indesejado e analisar o sistema para compreender todos os seus efeitos causais e respectivas probabilidades, pode-se proceder à construção da árvore de falhas. Esta é estruturada com base em portas lógicas do tipo "E" e "OU", que definem as principais características do diagrama [20].

iv. Avaliação da árvore de falhas

Com a árvore de falhas construída para um evento indesejado específico, procede-se à sua avaliação e análise com o objetivo de identificar possíveis melhorias através da gestão de riscos e de encontrar formas de otimizar o sistema. Uma ampla variedade de métodos de análise qualitativa e quantitativa pode ser aplicada nesta fase. Este passo constitui uma introdução ao passo final, que consiste em verificar os perigos identificados. Em resumo, nesta etapa identificam-se todos os possíveis perigos que afetam o sistema, direta ou indiretamente [20].

v. Verificação dos perigos identificados

Este passo é específico e varia amplamente de sistema para sistema. Contudo, o objetivo principal será sempre, após identificar os perigos, aplicar todos os métodos possíveis para reduzir a probabilidade de ocorrência [20].

A aplicação deste método de análise de falhas apresenta diversas vantagens tais como:

- Determinar a probabilidade com que o evento perigoso de topo é influenciado por diversos fatores contribuintes, facilitando a identificação das ações corretivas ou preventivas a implementar;
- Identificar falhas críticas e aprofundar o conhecimento sobre os sistemas em análise;
- Converter um sistema físico num diagrama lógico estruturado;
- Determinar a sequência de eventos mais crítica;
- Identificar as principais combinações de fatores que devem ser evitadas [23].

Apesar deste método de análise de falhas estar associado à identificação de elementos específicos de um sistema e os eventos que levam à insuficiência ou falha do sistema específico, também apresenta algumas desvantagens, tais como:

- Exige um investimento significativo de tempo e custo, além de implicar um aumento exponencial do número de eventos influentes;
- A árvore de falhas baseia-se numa lógica booleana, representando apenas dois estados: em funcionamento ou em falha;
- A consideração dos estados de falha parcial é complexa, uma vez que o método assume que o sistema está operacional ou em condição de falha;

- Requer um conhecimento aprofundado do sistema e uma abordagem específica para cada falha analisada.

3 Estudos de Fiabilidade em Quadros de Média Tensão – Estudo de Caso

3.1 Distribuição Primária

As celas de média tensão, elementos essenciais dos sistemas de distribuição primária de energia, constituem componentes críticos dos sistemas de distribuição de energia em Média Tensão (MT). Estes equipamentos operam, geralmente, em níveis de tensão compreendidos entre 3 kV e 36 kV. Um conjunto de celas interligadas por um barramento geral constituem um Quadro de Média Tensão (QMT), e é responsável pelo transporte de energia elétrica a partir de sistemas de transmissão de Alta Tensão (AT) até aos sistemas de distribuição secundária, que asseguram o fornecimento de energia ao consumidor final.

Relativamente à sua utilização, os QMTs podem ser encontrados em diversos contextos. Nas subestações elétricas, desempenham um papel central no controlo e na proteção da rede elétrica. Em grandes superfícies comerciais e industriais, são essenciais para garantir um fornecimento de energia seguro e contínuo. Já nos setores minério, petrolífero e de gás, a sua aplicação justifica-se pela necessidade de sistemas elétricos robustos e fiáveis, capazes de assegurar a continuidade de operação em ambientes exigentes.

As celas constituintes dos quadros de média tensão têm como principais funções:

- **Manobra e Controlo**

Permite ligar ou isolar circuitos específicos, possibilitando a gestão eficiente do fluxo de energia;

- **Proteção**

Assegura a deteção e isolamento de defeitos, tal como curto-circuitos, de forma a prevenir danos nos equipamentos e assegurar a continuidade do serviço;

- **Seccionamento e Isolamento**

Garante condições de segurança nas operações de manutenção, através da possibilidade de isolar determinadas secções da rede elétrica.

Existem diversos tipos de funções que as celas de média tensão de distribuição primária de energia podem desempenhar, como a:

- **Função de Saída/Chegada com disjuntor**

Responsável pela distribuição de energia para alimentadores externos. É tipicamente constituída por um disjuntor de média tensão, transformadores de corrente e de tensão (no caso de haver medição de tensão), relés de proteção, barramento geral (BG) e seccionador de terra (ST);

- **Função de Seccionamento de Barras**

Isola partes das subestações para manobras ou para manutenção, equipada com um disjuntor de média tensão;

- **Função de Subida de Barras**

Interliga barramentos diferentes dentro do mesmo quadro, constituído essencialmente pelo BG, podendo ainda incorporar transformadores de corrente (TIs);

- **Função de Proteção CIS (Interruptor-Seccionador com Fusíveis)**

Constituída por um interruptor-seccionador, destinado ao fecho ou abertura manual do circuito. Da mesma forma, é constituída por fusíveis, em série com o interruptor-seccionador, que fundem e forçam a abertura do circuito em caso de curto-circuito, por um seccionador de terra;

- **Função de Medida**

Responsável pela medida da tensão no barramento geral, constituída essencialmente por transformadores de tensão (TTs).

A Figura 12 mostra os diversos tipos de funções que as celas de média tensão de distribuição primária de energia podem desempenhar.

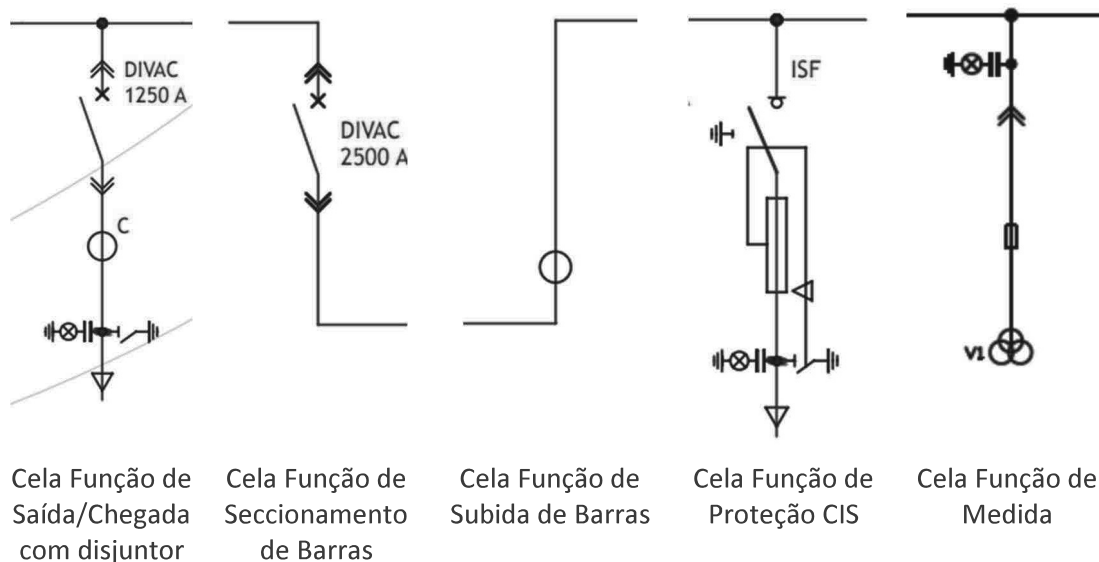


Figura 12 - Tipos de funções das celas de média tensão

Os quadros de média tensão são classificados de acordo com a sua tecnologia de isolamento e construção, em dois tipos principais:

- **Quadros isolados a ar (AIS – *Air Insulated Switchgear*)**

Utilizam o ar como meio dielétrico/isolante entre as fases e entre fase e a terra. No caso de o dispositivo de proteção ser um disjuntor, os contactos de abertura e fecho estão presentes no interior de uma ampola de vácuo [27]. Estes quadros são economicamente mais viáveis, mas requerem um maior espaço de instalação;

- **Quadros isolados a gás (GIS – *Gas Insulated Switchgear*)**

Utilizam gás como meio isolante, sendo o gás mais utilizado o SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre), permitindo uma construção mais compacta e segura, adequados para instalações interiores e em locais de espaço reduzido. De acordo com o artigo 13 do Regulamento 2024/573 de 7 de fevereiro de 2024 do Parlamento Europeu e do Conselho, o uso deste gás para aparelhos de comutação até 24 kV será estritamente proibido a partir de 1 de janeiro de 2026, estendendo-se a equipamentos acima de 24 kV e abaixo de 52 kV a partir de 1 de janeiro de 2030 [28].

3.2 Celas de Distribuição Primária - Normacel (EFACEC)

O produto objeto do presente estudo de fiabilidade é as celas de média tensão da gama Normacel da EFACEC. Trata-se de celas pertencentes à gama de soluções da EFACEC para a Distribuição Primária, de isolamento no ar, de construção modular, compartimentada e extensível.

A solução modular exige uma área de instalação bastante reduzida, sem comprometer a simplicidade da sua exploração e a acessibilidade para as atividades de manutenção e operação. A intervenção nos equipamentos é realizada exclusivamente pela parte frontal, o que permite que a sua instalação seja próxima da parede à retaguarda, diminuindo ainda mais a sua área necessária.

A construção das celas é projetada de forma que seja resistente ao arco interno, em conformidade com a norma IEC 62271-200 [6], tipo PM, acessibilidade A-FLR (*Accessibility for authorized personnel Front Lateral Rear*), garantindo assim a proteção das pessoas e restantes equipamentos. O tipo PM refere-se a *Partitioned Metal-enclosed switchgear*, significando que a cela é compartimentada em vários módulos. Já a acessibilidade A-FLR indica que o acesso ao quadro é restrito ao pessoal qualificado e que as partes lateral, frontal e traseira dispõem de proteção adequada contra falhas internas.

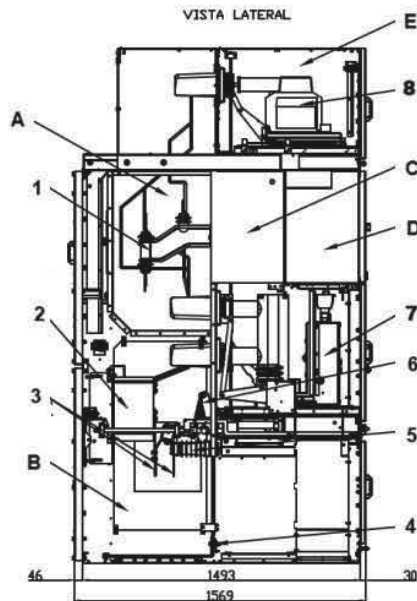
As celas da gama Normacel são tipicamente equipadas com disjuntores extraíveis de corte no vácuo do tipo DIVAC, de elevadas prestações elétricas e mecânicas segundo a IEC 62271-200 [6]. O desenvolvimento contínuo desta linha de produtos tem permitido atingir elevados níveis de desempenho, com capacidades que incluem correntes nominais até 4000 A e correntes de curto-circuito até 50 kA.

No geral, uma cela Normacel (Figura 13) é constituída por quatro compartimentos principais: o compartimento do barramento geral (BG), o compartimento do disjuntor, o compartimento de cabos e o compartimento de baixa tensão (CBT).



Figura 13 – Vista geral de uma cela de média tensão Normacel da EFACEC [29]

Na Figura 14, é possível observar com detalhe a constituição da cela Normacel, de função Saída/Chegada com disjuntor, através da vista lateral da cela.



- A – Compartimento do Barramento Geral (BG)
- B – Compartimento de Cabos
- C – Compartimento do Disjuntor
- D – Compartimento de Baixa Tensão (CBT)
- E – Compartimento dos Transformadores de Tensão
- 1 – Suporte das Barras
- 2 – Transformador de corrente
- 3 – Barras de aperto dos cabos MT
- 4 – Coletor de Terra
- 5 – Isolador Divisor Capacitivo
- 6 – Seccionador de Terra
- 7 – Disjuntor
- 8 – Transformador de Tensão (Extraíveis)

Figura 14 - Constituição de uma cela Normacel da EFACEC

A Tabela 8 mostra as características elétricas, mecânicas, as condições normais de serviço e as dimensões das celas da gama Normacel da EFACEC.

Tabela 8 - Características das celas da gama Normacel

Características Elétricas		
Tensão nominal	12 kV	17,5 kV
Nível de isolamento		
à frequência industrial	28 kV – 1 min	38 kV – 1 min
onda de choque	75 kV	95 kV
Corrente nominal de curta duração	25kA / 31,5 kA	
Valor da crista da corrente da corrente admissível	62,5 kA / 78,75 kA	
Frequência nominal	50 Hz / 60 Hz	
Corrente nominal do barramento	Até 4000 A a 40°C	
Corrente nominal das derivações	Até 3150 A (ventilação natural) 4000 A (ventilação forçada)	
Características mecânicas		
Grau de proteção (IEC 60529)	IP41 (externo) IP3x (interno)	
Invólucro	Aço galvanizado por imersão a quente de 2 mm de espessura, rebitado ou aparafusado As portas são pintadas com pintura a pó de epóxi-poliéster	

Características Eléctricas	
Cor standard	RAL 7035
Condições normais de serviço	
Temperatura ambiente mínima	- 5°C
Temperatura ambiente máxima	40°C
Altitude máxima do local	1000 m
Dimensões	
Altura	2119 mm
Profundidade	1569 mm
Largura	
In = 1250 A, Icc = 25kA	600 mm
In = 1250 A, Icc = 31,5 kA	750 mm
In = 2500 A, Icc = 25 kA	850 mm
In = 4000 A, Icc = 25 kA	1000 mm

3.3 Montagem e Ensaio

O processo de montagem segue uma sequência de etapas, com a Figura 15 a exemplificar um diagrama geral do processo de montagem desde a receção de materiais até à inspeção final.

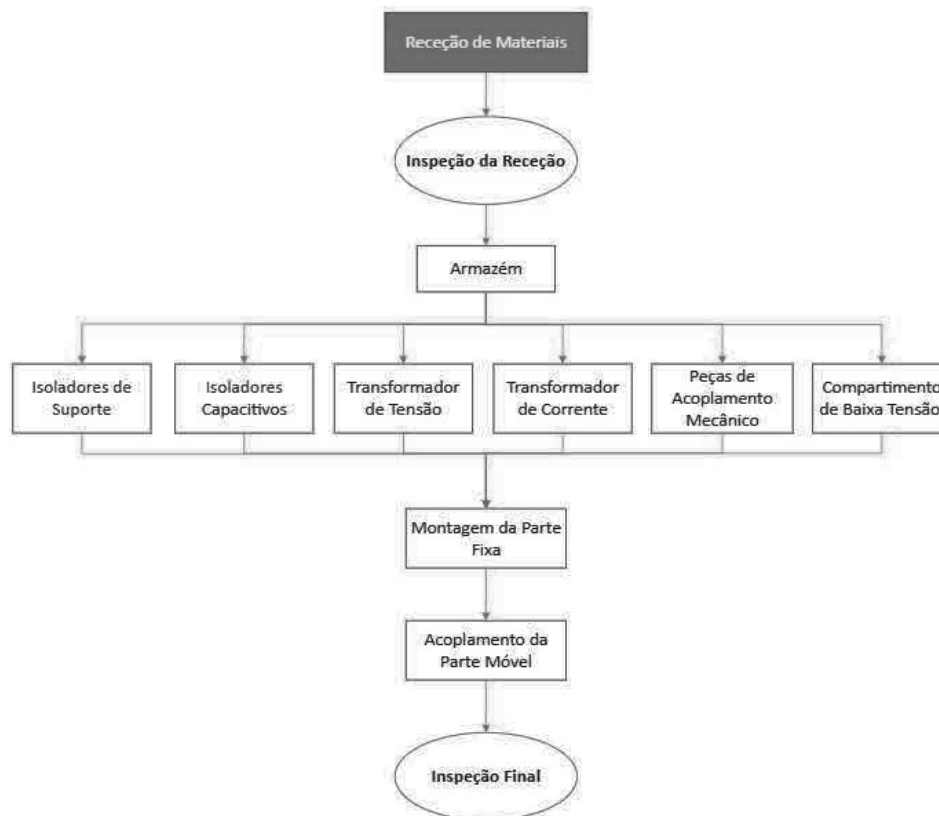


Figura 15 - Fluxograma de produção das celas Normacel da EFACEC [30]

Em detalhe, o início do processo passa pela montagem dos diferentes componentes constituintes. Em seguida, procede-se à medição das resistências, de forma a assegurar que os binários de aperto aplicados se encontram em conformidade com os requisitos técnicos estabelecidos. Após esta verificação, realiza-se a operação de soldadura, garantindo a integridade mecânica e elétrica das ligações. Posteriormente, cada cela é identificada através da associação de um número de série único e da impressão das respetivas etiquetas de identificação. Segue-se a medição das velocidades de abertura e fecho do disjuntor. Por fim, a cela é submetida a uma inspeção visual detalhada e a um *check-up* final, assegurando a conformidade global do produto com as normas de qualidade e segurança em vigor.

Ainda no processo de montagem, existe a fase de realização de ensaios, que é essencial para garantir a segurança, fiabilidade e desempenho das celas, permitindo a deteção precoce de falhas, que ajuda à prevenção de acidentes, interrupções no fornecimento de energia e custos associados a manutenção corretiva.

Os ensaios asseguram a conformidade com as normas técnicas como a IEC 62271 partes 1 [31] e 200 [6], garantindo a operação do equipamento dentro dos parâmetros exigidos. Além disso, contribuem para a redução de riscos elétricos, de forma a melhorar a vida útil dos componentes e minimizando perdas financeiras decorrentes de falhas inesperadas.

Na fase de montagem, são realizados diversos ensaios de rotina, tais como:

- Medição da resistência de isolamento (ex: barramento principal, nos polos do disjuntor, fase-fase e fase-terra), com o objetivo de avaliar a qualidade e segurança e identificar possíveis defeitos nos isolamentos, de forma a evitar curto-circuitos;
- Medição dielétrica (ex: barramento principal, disjuntor), de forma a determinar a rigidez dielétrica de um material, ou a sua capacidade de isolamento elétrico;
- Sistema de proteção de arco, como por exemplo, testes de sensor, disparo por flash de falha de arco/injeção de corrente, para verificar se o sistema de arco interno funciona devidamente;
- Medição da resistência de contacto (ex: polos do disjuntor), com o objetivo de evitar pontos de sobreaquecimento e desgaste dos componentes, na existência de resistências de contacto elevadas;
- Manobras elétricas/manuais (ex: abertura, fecho, sinalização local e remota na cela ou no disjuntor), para verificar a funcionalidade e rapidez de abertura e fecho;
- Verificação da relação primário/secundário dos transformadores de corrente e dos transformadores de tensão;
- Proteções, como por exemplo, disparo/sinalização por injeção primária ou secundária para todas as funções parametrizadas, temporizações;
- Verificação dos bloqueios de segurança de acordo com o plano de instalação/implementação do equipamento;

- Inspeção dos contactos do seccionador de terra;
- Verificação de binários de aperto, para prevenir aumentos de resistência, e evitar pontos de sobreaquecimento [32].

3.4 Manutenção

O processo de manutenção é importante para manter o equipamento totalmente capaz de operar de acordo com os padrões de fábrica e antecipar quaisquer problemas ou falhas futuras. O intervalo para a realização da manutenção depende do número de manobras, das condições ambientais da instalação ou da carga elétrica. No caso das celas Normacel que sejam instaladas em ótimas condições, o intervalo sugerido de inspeções/manutenções é aproximadamente a cada dois anos [32].

A Tabela 9 mostra um exemplo do plano de inspeção que é realizado na fase de manutenção destas celas.

Tabela 9 - Plano de inspeção das celas Normacel [32]

Equipamento			
Tarefas	Celas	Disjuntores	Manutenção
Testes	X		5000 V DC
Resistência de isolamento – MV - Ω		X	100A
Teste de resistência de contacto - Ω		X	X
Tempo de operação (abertura) - ms		X	X
Tempo de operação (fecho) -ms		X	X
Teste de resistência de contacto - Ω		X	X
Verificação de binários de aperto - Nm	X	X	X
Verificações			
Operações mecânicas			
Fecho manual		X	X
Abertura manual		X	X
Inserção / extração	X	X	X
Abertura e fecho do ST	X		X
Sinalização	X	X	X
Operações elétricas			
Abertura Elétrica	X		X
Fecho elétrico	X		X
Operação do motor		X	X
Operação			
Lubrificação			
Seccionador de terra	X		X
Mecanismo de persianas	X		X
Fechaduras	X	X	X

Equipamento			
Comando		X	X
Encravamentos			
Acesso a compartimentos sob tensão	X		X
Disjuntor / ST	X	X	X
Disjuntor / BT	X	X	X
ST / Painéis retaguarda e frontais	X		X
Fechaduras			
Bloqueio e rotação livre com a chave	X		X
Inserção / extração da chave na fechadura	X		X
Inspeção visual			
Conexão à terra (à instalação)	X		
Polos (fissuras / sinais de contornamento)		X	X
Pintura	X	X	X
Ligações elétricas - BT	X	X	X

3.5 Estudos de Fiabilidade das Celas Normacel (EFACEC)

Neste subcapítulo, é descrito o trabalho prático do estudo de fiabilidade das celas Normacel da EFACEC, que teve como propósito verificar o desempenho funcional do equipamento, identificar possíveis modos de falha e avaliar a conformidade com as normas aplicáveis.

Numa primeira instância, procedeu-se à recolha e tratamento dos dados, processo que incluiu a identificação e análise dos tipos de falhas mais frequentes nas celas estudadas. Posteriormente, foi realizada uma análise dos componentes do processo RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), com o cálculo dos indicadores MTTR (*Mean Time To Repair*) e MTBF (*Mean Time Between Failures*). O procedimento foi concluído com o desenvolvimento de um formulário FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) e de árvores FTA (*Fault Tree Analysis*), permitindo uma avaliação detalhada da fiabilidade e segurança do produto.

3.5.1 Recolha de Dados

Para o cálculo de fiabilidade das celas Normacel foi utilizada a base de dados de ocorrência do SiGefa QES, plataforma utilizada pela EFACEC para o apoio de gestão de projetos e processos internos, e as normas apresentadas no capítulo 2.

Para a posterior comparação dos dados obtidos, mais concretamente os valores de MTBF (*Mean Time Between Failures*), serão utilizadas as especificações técnicas da EDF (*Électricité de France*) NH 64-S-40 [7] e NH 64-S-52 [8], que são as mais relevantes na definição das características, funções e classificação dos defeitos e limites mínimos de tempo de funcionamento das celas. Estas normas são frequentemente adotadas por serem consideradas

as mais exigentes e completas, garantindo assim que, aquando da exportação dos produtos para qualquer parte do mundo, estes cumpram as especificações estabelecidas.

Os dados da produção dos equipamentos são obtidos pela plataforma interna de gestão e de colaboração da EFACEC, denominada de *Synergynet*. A informação relacionada com a assistência no cliente é obtida através do departamento de *After Sales* ou Após Venda. Esta informação é posteriormente filtrada, separando a informação relativa ao produto em estudo dos outros produtos, e separando os vários tipos de assistência dada e tratada através do sistema de gestão central *GlobalTracking*, plataforma interna utilizada para encontrar os projetos a partir do número de série ou da ordem de produção das celas.

Para o cálculo da fiabilidade, foi utilizado o *software* da Reliasoft, Weibull ++7, disponibilizado pela EFACEC. Este *software* pode ser utilizado para a avaliação da fiabilidade e manutenibilidade de produtos, placas eletrónicas e sistemas, bem como permitir o cálculo do valor de λ (taxa de avarias), e conseqüentemente os indicadores MTBF (*Mean Time Between Failures*) e o MTTR (*Mean Time to Repair*), através da análise de dados de avarias em campo. Além disso, é capaz de determinar a melhor distribuição estatística (normal, *Weibull*, exponencial, etc) a aplicar aos dados introduzidos.

Para o cálculo do FMECA, foi utilizado o FMECA ITEM *Software*, que permite definir para os diversos níveis hierárquicos do sistema, dados como avaria, causas de avaria, modo de deteção, severidade ou criticidade.

Para o cálculo do FTA, foi utilizado o FTA ITEM *Software*, que efetua a análise de falhas de um sistema numa estrutura em árvore. A informação é obtida e tratada de forma sistemática, como está descrito no subcapítulo seguinte.

3.5.2 Tratamento de Dados

Devido à possibilidade de existência de erros na base de dados, entendeu-se que a solução seria proceder ao tratamento dos dados, durante o qual foram excluídas as causas de avaria relacionadas com fatores externos, como vandalismo, descargas atmosféricas, problemas relacionados com o transporte do equipamento, a oxidação e os testes.

Neste processo, foram consideradas apenas os defeitos intrínsecos ao próprio produto em estudo:

- Abertura acidental dos disjuntores;
- Falha de abertura do disjuntor por solicitação;
- Falha de fecho do disjuntor por solicitação;
- Falha de abertura do interruptor-seccionador ou do seccionador de terra;
- Falha do indicador de presença de tensão;

- Defeitos internos:
 - Falha de manobras manuais de fecho/abertura;
 - Falha de manobras elétricas de fecho/abertura;
 - Falha de molas de rearme;
 - Falha do veio da bobina de disparo;
 - Falha em encravamentos;
 - Falha de disparo por fusão de fusível;
 - Falha de resistência de aquecimento;
 - Falha de manobra do comando;
 - Falha na bobina e ampola;
 - Falha nos isoladores capacitivos;
 - Arco elétrico entre fases;
 - Avaria do motor.

Numa fase inicial, é importante ter em conta a evolução da quantidade cumulativa de celas do tipo Normacel instaladas durante o período de estudo, abrangendo, neste caso 7 anos, desde a sua entrada em serviço (no início de 2017) até à data estabelecida como referência para o estudo, o final de 2023, com essa evolução ilustrada na Figura 16. No final do período de estudo, verifica-se um total cumulativo de 4238 celas.

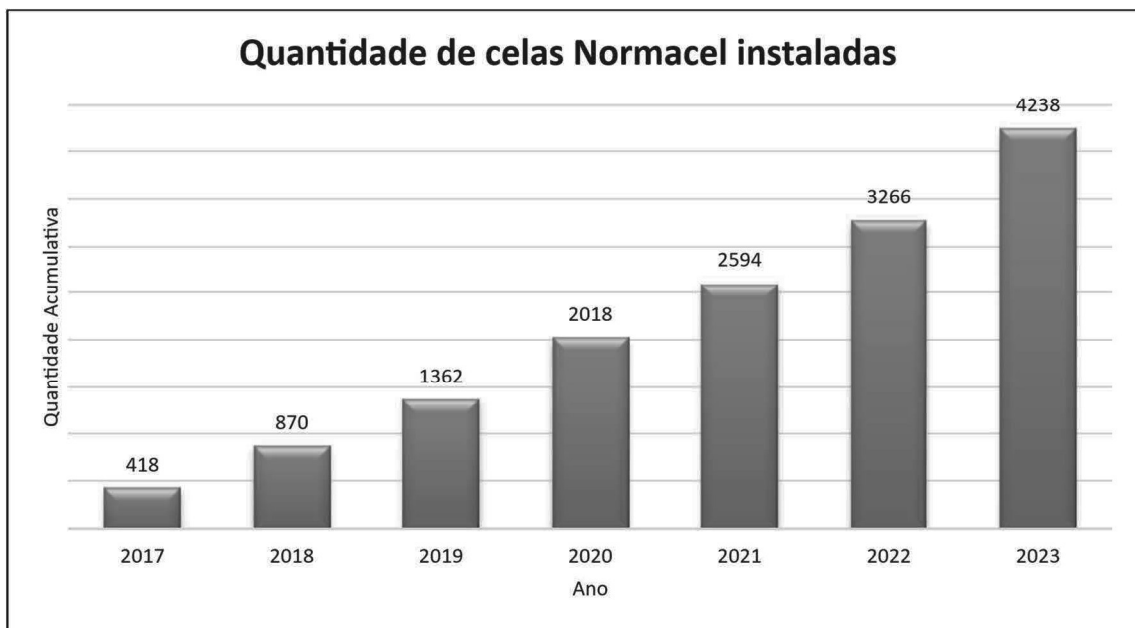


Figura 16 - Quantidade acumulativa de celas Normacel instaladas

Os dados relativos às anomalias foram registados numa folha de cálculo em Microsoft Excel, contendo informações detalhadas sobre o produto em estudo, nomeadamente: número de série, data de fabrico, data e tipo de avaria e número de horas de funcionamento até à ocorrência da falha.

A Tabela 10 apresenta um modelo de referência que ilustra, de forma clara, a estrutura adotada para a classificação das falhas/defeitos, permitindo o registo sistemático de todas as ocorrências até à data considerada.

Tabela 10 - Análise e identificação das avarias (tabela-tipo)

Nº Série EFACEC	Data de fabrico	Data de avaria	Tipo de avaria	Nº horas em funcionamento
E18100152	14/10/2019	19/02/2022	Defeito interno	20496
E18100434	21/01/2022	07/03/2022	Falha de fecho do disjuntor por solicitação	1008
E18100418	02/10/2021	12/04/2022	Falha de abertura do seccionador de terra	4536
E18100420	26/09/2021	13/04/2022	Falha de abertura do seccionador de terra	4704
E18100421	26/09/2021	19/04/2022	Falha de abertura do disjuntor por solicitação	4872
E70301145	17/05/2014	16/05/2022	Abertura acidental dos disjuntores	70056

A quantidade de ocorrências verificadas durante o período de estudo para cada modo de falha está apresentada pela Tabela 11.

Tabela 11 - Quantidade de falhas por cada tipo de avaria

Modos de avaria	Quantidade
Defeito interno	9
Abertura acidental dos disjuntores	2
Falha de abertura do disjuntor por solicitação	3
Falha de fecho do disjuntor por solicitação	3
Falha de abertura do interruptor-seccionador ou do seccionador de terra	3
Falha do indicador de presença de tensão	1

Após a identificação e análise dos modos de avaria, procedeu-se à avaliação da fiabilidade do produto. Este processo iniciou com a transformação do comportamento observado nas celas produzidas em estudo ao longo do período em estudo num comportamento representativo de uma cela-tipo, correspondendo à avaliação de uma cela padrão ao longo de 7 anos (T_f).

$$T_f = 7 \text{ (anos)} * 8760 \left(\frac{\text{horas}}{\text{ano}} \right) * 4238 \text{ (celas)} = 259874160 \text{ (hora * cela)} \quad (18)$$

Em seguida, procedeu-se à análise das falhas registadas nos equipamentos produzidos nos 7 anos objetos do presente estudo. Posteriormente, foi realizada uma avaliação detalhada das anomalias ocorridas, com o objetivo de determinar os tempos correspondentes a cada falha e compreender a sua distribuição ao longo do período analisado.

Exemplo: Tempo correspondente à anomalia 1 e à anomalia n:

$$T_1 = T_{FE1} * Q_{E1} \quad (19)$$

$$T_n = T_{FE_n} * Q_{E_n} \quad (20)$$

Onde:

T_{FE1} - Tempo de funcionamento da cela até acontecer a primeira anomalia;

Q_{E1} – Número de celas instaladas aquando da primeira anomalia;

T_{FE_n} – Tempo de funcionamento da cela até acontecer a n anomalia;

Q_{E_n} – Número de celas instaladas aquando da n anomalia.

Da mesma forma, foram calculados os tempos de falha para todas as falhas verificadas. A Tabela 12 representa um modelo tipo resultante que permite perceber a forma de cálculo dos tempos de funcionamento (T_i) de todas as celas que apresentaram uma falha.

Tabela 12 - Tempo de funcionamento (tabela-tipo)

Anomalia	Nº horas em funcionamento	Celas instaladas aquando da falha	Tempo de funcionamento T_i (horas)
T1	20496	2679	54908784
T2	1008	2711	2732688
T3	4536	2743	12442248
T4	4704	2775	13053600
T5	4872	2807	13675704
T6	70056	2839	198888984

Após o cálculo dos tempos de funcionamento, foram determinados os valores TBFs (Tempos de Bom Funcionamento) para cada tipo de defeito e para número total de defeitos, que são os intervalos de tempo entre os vários pontos desde as 0 horas e as 259874160 horas (T_f). Como o processo foi devidamente efetuado, o número de tempos de funcionamento é o mesmo que o número de anomalias verificadas, como se verifica na Tabela 13.

Exemplo:

$$TBF1 = T1 - 0 \quad (21)$$

$$TBF2 = T2 - T1 \quad (22)$$

$$TBFn = T_n - T_{n-1} \quad (23)$$

$$TBFf = T_f - T_n \quad (24)$$

Tabela 13 - Tempo de bom funcionamento (tabela-tipo)

Tempo de Bom Funcionamento	TBF (horas) Total defeitos
TBF1	45601920
TBF2	52176096
TBF3	9709560
TBF4	611352
TBF5	622104
TBF6	185213280
TBFf	61163172

Em seguida, seguiu-se o tratamento dos valores de TBF, ao eliminar os valores nulos, no caso de existirem, realizado com recurso ao *software* de cálculo de fiabilidade Weibull ++7, desenvolvido pela empresa Reliasoft e disponibilizado pela EFACEC. A aplicação permite estimar a taxa de avarias (λ), recorrendo à aproximação por uma distribuição exponencial, bem como determinar os parâmetros de uma distribuição de *Weibull*, algo será abordado no subtópico seguinte.

3.5.3 Cálculo da Fiabilidade

Uma vez calculados os parâmetros de distribuição, é possível gerar gráficos e obter resultados que permitam avaliar as características de vida do produto, nomeadamente a taxa de avarias (λ) para cada tipo de falha, e consequentemente os valores de MTBF (*Mean Time Between Failures*). Os gráficos são gerados automaticamente pelo *software* mencionado anteriormente, mediante a seleção do tipo de distribuição desejado.

Os valores de MTBF são comparados com os valores normativos das especificações técnicas da EDF (*Électricité de France*) NH 64-S-40 [7] e NH 64-S-52 [8], de forma a verificar a sua fiabilidade ou não fiabilidade. A especificação NH 64-S-40 [7] centra-se essencialmente na definição de requisitos técnicos e funcionais para aparelhagem de comutação até 24 kV, nomeadamente disjuntores, seccionadores e contactores, de instalação em ambiente protegido. Por outro lado, a especificação NH 64-S-52 [8] adota uma abordagem mais abrangente e integradora, descrevendo a aparelhagem insensível ao ambiente sob invólucro metálico.

3.5.3.1 Mean Time Between Failures – NH-64-S-52

Como explicado anteriormente, a especificação NH-64-S-52 [8] adota uma abordagem mais geral e integral e descreve a aparelhagem insensível ao ambiente, independente das condições externas. Para este estudo, importou estudar a fiabilidade do produto em função das falhas internas na cela, da falha de abertura do interruptor-seccionador ou seccionador de terra e a falha no indicador de presença de tensão.

i. Falhas internas na cela

Para as falhas internas, foi gerado um gráfico que relaciona a fiabilidade com o tempo, através do *software* Reliasoft Weibull ++7, com a Figura 17 a representar o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Ainda nesta figura, percebe-se que o tempo médio entre falhas (MTBF) obtido foi de $6,73 \times 10^7$ horas.

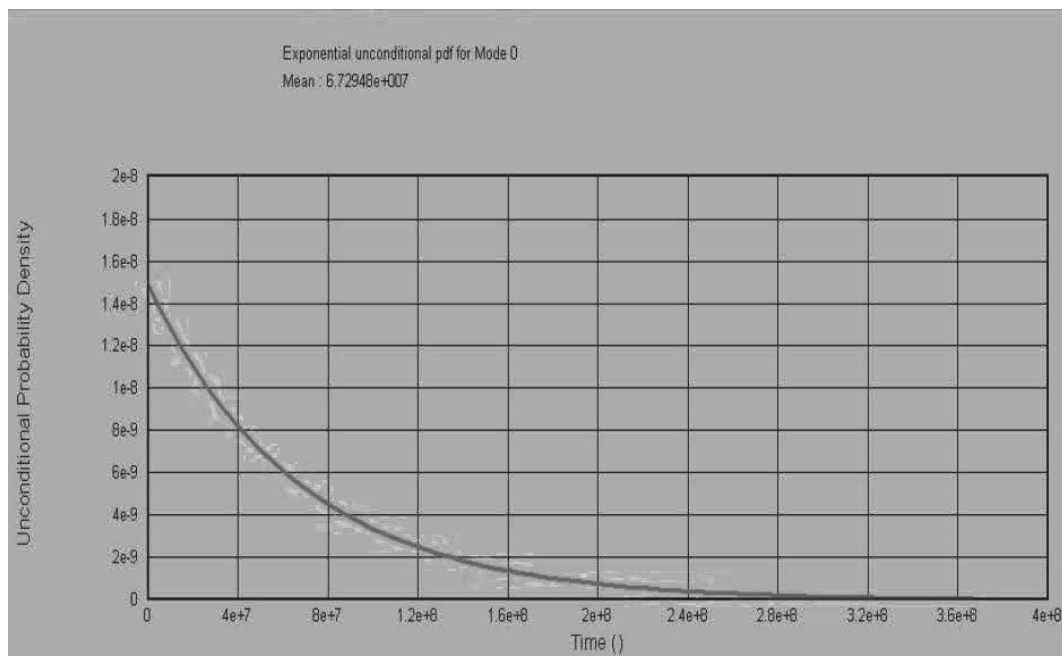


Figura 17 - Fiabilidade em função do tempo - falhas internas

Analisando o gráfico acima, é possível verificar uma diminuição da fiabilidade do produto com o tempo de utilização conforme o esperado.

Uma vez que o *software* utiliza a técnica de interpolação estatística, utilizada para estimar valores desconhecidos com base em dados previamente conhecidos, um dos pontos de falha é tratado como um valor estimado. Assim, o número total de unidades com falhas internas corresponde, na realidade, a 17, e não a 18, como se verifica na Tabela 14.

Tabela 14 - Lista de tempos das falhas internas

#	F/C	Time (s)	Modo
1	F	1,42195x10 ⁶	0
2	F	1,66925x10 ⁶	0
3	F	3,17184x10 ⁶	0
4	F	4,6032x10 ⁶	0
5	F	5,1072x10 ⁶	0
6	F	5,21875x10 ⁶	0
7	F	5,32696x10 ⁶	0
8	F	1,74854x10 ⁷	0
9	F	2,26713x10 ⁷	0
10	F	3,09439x10 ⁷	0
11	F	6,38817x10 ⁷	0
12	F	7,16837x10 ⁷	0
13	F	7,55244x10 ⁷	0
14	F	1,01906x10 ⁸	0
15	F	1,29757x10 ⁸	0
16	F	1,38583x10 ⁸	0
17	F	1,54103x10 ⁸	0
18	F	3,78243x10 ⁸	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido pelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{6,73 \times 10^7} = 1,49 \times 10^{-8} \text{ falhas/hora} \quad (25)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

ii. Falha de abertura do interruptor-seccionador ou seccionador de terra

Para as falhas de abertura do interruptor-seccionador ou seccionador de terra, o gráfico que ilustra a evolução da fiabilidade ao longo do tempo está representado na Figura 18, e observa-se que o tempo médio entre falhas (MTBF) obtido foi de $1,40 \times 10^8$ horas.

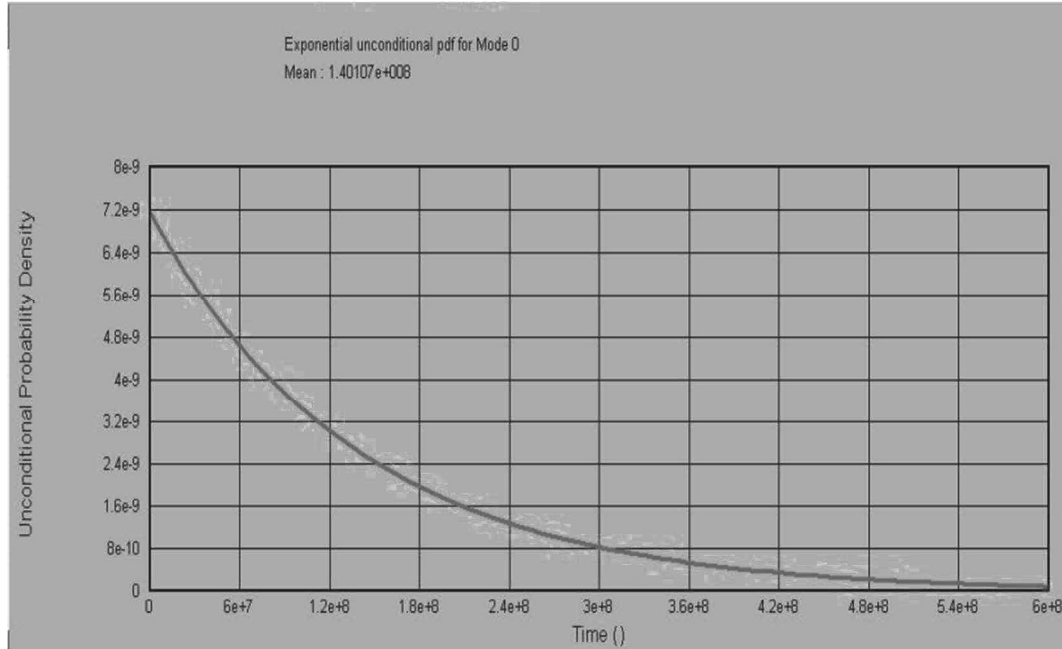


Figura 18 - Fiabilidade em função do tempo - falha de abertura do interruptor-seccionador ou ST

Este tipo de falha esteve presente em 3 unidades, com os tempos de falha, em horas, representados na Tabela 15. Um dos valores apresentados na tabela é estimado, como foi explicado anteriormente.

Tabela 15 – Lista de tempos da falha de abertura de interruptor-seccionador ou ST

#	F/C	Time (s)	Modo
1	F	1,54493x10 ⁶	0
2	F	5,77735x10 ⁶	0
3	F	1,91706x10 ⁷	0
4	F	5,33935x10 ⁸	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido apelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{1,40 \times 10^8} = 7,14 \times 10^{-9} \text{ falhas/hora} \quad (26)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

iii. Falha do indicador de presença de tensão

No caso da falha do indicador de tensão, a Figura 19 ilustra a curva do gráfico evolutivo da fiabilidade em função do tempo, com um tempo médio entre falhas (MTBF) de 2,80x10⁸ horas.

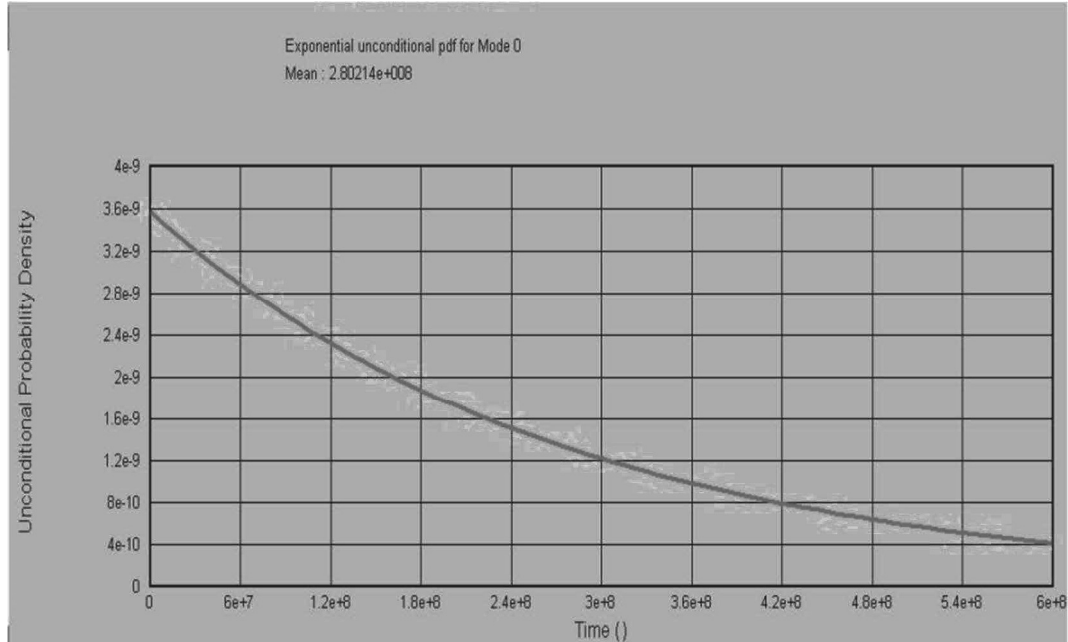


Figura 19 – Fiabilidade em função do tempo – falha do indicador de presença de tensão

Este tipo de falha esteve presente em 1 unidade, com os tempos de falha, em horas, representados na Tabela 16.

Tabela 16 – Lista de tempos da falha do indicador de presença de tensão

#	F/C	Time ()	Modo
1	F	1,80069x10 ⁷	0
2	F	5,42421x10 ⁸	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido apelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{2,80 \times 10^8} = 3,57 \times 10^{-9} \text{ falhas/hora} \quad (27)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

iv. Falhas totais

Após a análise dos gráficos gerados pelo *software* Reliasoft Weibull++ das falhas relacionadas com esta norma, foi gerado e analisado a curva referente às falhas totais que afetaram o produto, que se pode verificar pela Figura 20. Juntamente com o gráfico da relação fiabilidade-tempo, é indicado o tempo médio entre falhas (MTBF), com o valor de 5,79x10⁷ horas.

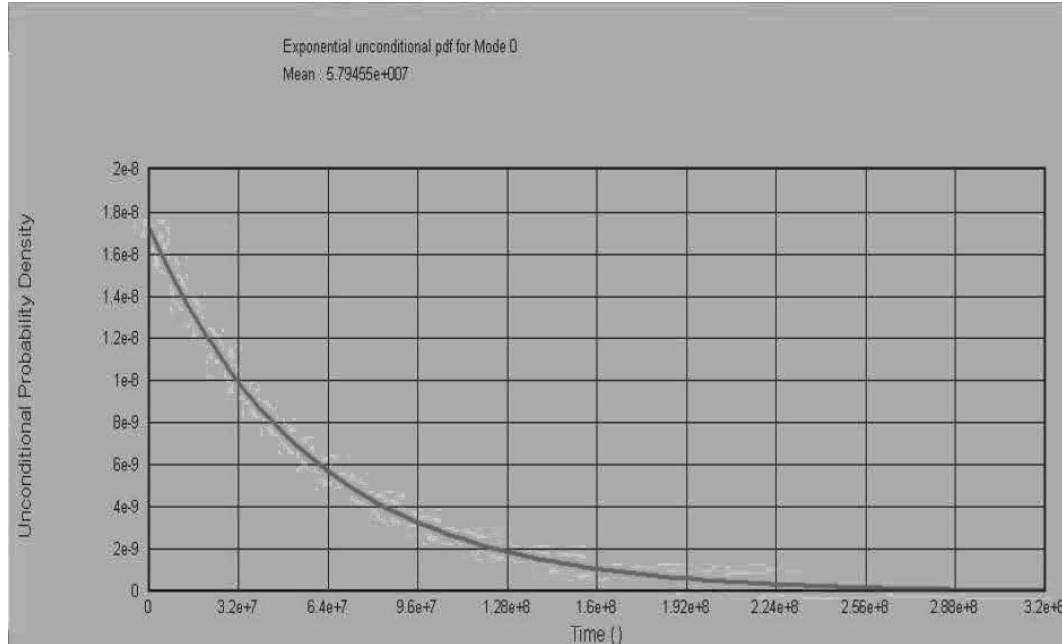


Figura 20 - Fiabilidade em função do tempo - falhas totais (especificação NH 64-S-52)

O número de unidades afetadas pelas falhas totais é o somatório das unidades que sofreram falhas do género das apresentadas neste tópico. Este número pode ser verificado pela Tabela 17.

Tabela 17 - Lista de tempos das falhas totais do produto

#	F/C	Time (s)	Modo
1	F	1,42196x10 ⁶	0
2	F	1,54493x10 ⁶	0
3	F	1,58928x10 ⁶	0
4	F	1,66925x10 ⁶	0
5	F	3,17184x10 ⁶	0
6	F	4,6032x10 ⁶	0
7	F	5,1072x10 ⁶	0
8	F	5,21875x10 ⁶	0
9	F	5,32896x10 ⁶	0
10	F	6,31865x10 ⁶	0
11	F	1,7854x10 ⁷	0
12	F	1,95371x10 ⁷	0
13	F	2,54285x10 ⁷	0
14	F	3,09439x10 ⁷	0
15	F	7,16873x10 ⁷	0
16	F	7,55244x10 ⁷	0
17	F	8,93101x10 ⁷	0
18	F	1,01906x10 ⁸	0
19	F	1,29757x10 ⁸	0
20	F	1,44901x10 ⁸	0

#	F/C	Time (s)	Modo
21	F	1,54103x10 ⁸	0
22	F	3,78243x10 ⁸	0

Pelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF), consegue-se obter o valor da taxa de avarias (λ):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{5,79 * 10^7} = 1,73 * 10^{-8} \text{ falhas/hora} \quad (28)$$

3.5.3.2 Mean Time Between Failures – NH-64-S-40

Como explicado anteriormente, a especificação NH-64-S-40 [7] centra-se essencialmente na definição de requisitos técnicos e funcionais para aparelhagem de comutação em 24kV, nomeadamente disjuntores, seccionadores e contactores. Portanto, importou apresentar o estudo da fiabilidade relativamente à abertura accidental do disjuntor, às falhas de abertura e fecho do disjuntor por solicitação e aos defeitos internos, que incluem os dos disjuntores.

i. Abertura accidental do disjuntor

No caso da abertura accidental do disjuntor, o *software* gerou o gráfico Fiabilidade-Tempo ilustrado na Figura 21, com um tempo médio entre falhas (MTBF) de 7,12x10⁴ anos.

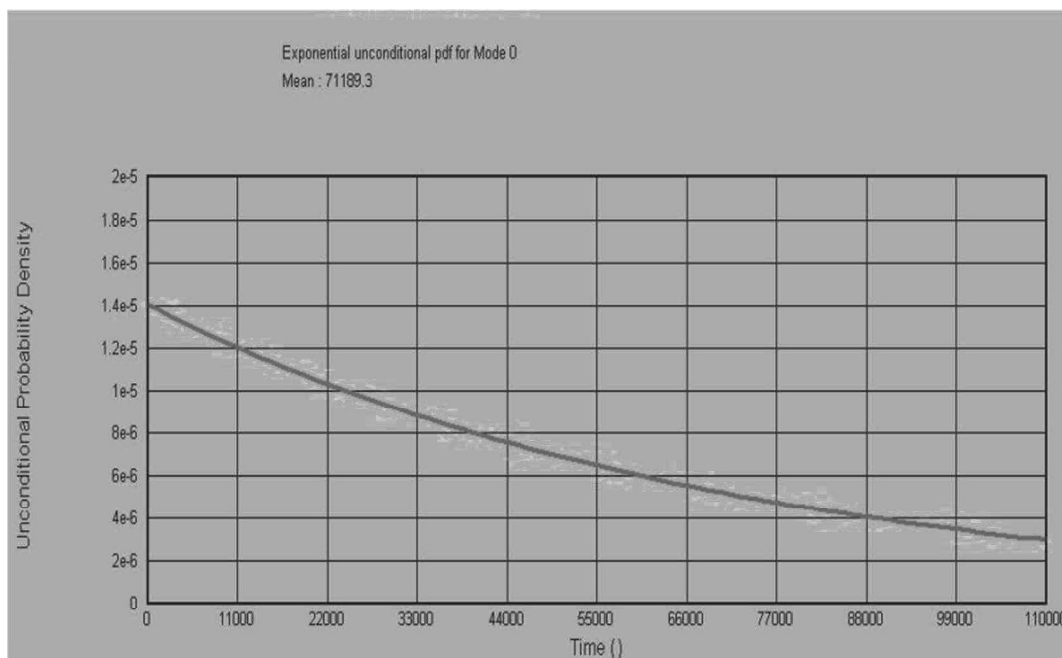


Figura 21 – Fiabilidade em função do tempo – abertura accidental do disjuntor

A abertura acidental do disjuntor ocorreu em 2 unidades, com os tempos de falha, em anos, apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Lista de tempos da abertura acidental do disjuntor

#	F/C	Time ()	Modo
1	F	32939	0
2	F	74796	0
3	F	105833	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido apelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{7,12 \times 10^4} = 1,40 \times 10^{-5} \text{ falhas/ano} \quad (29)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

ii. Falha de abertura do disjuntor por solicitação

Para a falha de abertura do disjuntor por solicitação, foi gerado o gráfico da fiabilidade em função do tempo apresentado na Figura 22, e o seu tempo médio entre falhas (MTBF) obtido foi de $1,77 \times 10^4$ anos.

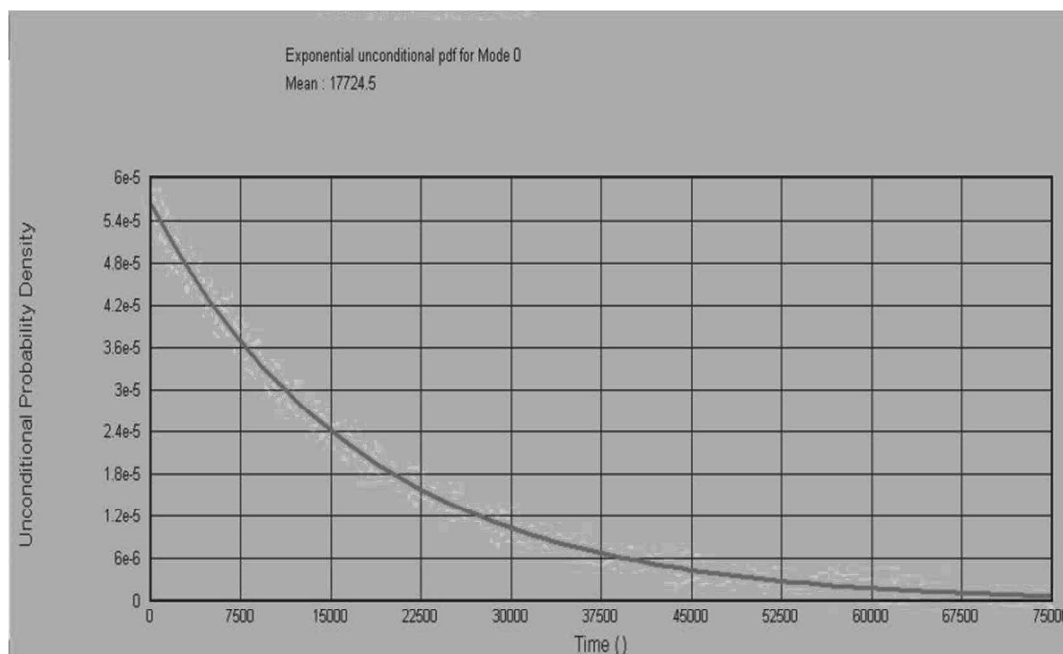


Figura 22 - Fiabilidade em função do tempo - falha de abertura do disjuntor por solicitação

Este tipo de falha ocorreu em 3 unidades das celas Normacel, com os tempos de falha, em horas, representados na Tabela 19.

Tabela 19 - Lista de tempos de falha da abertura do disjuntor por solicitação

#	F/C	Time (h)	Modo
1	F	3461	0
2	F	5907	0
3	F	7145	0
4	F	54385	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido pelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{1,77 \times 10^4} = 5,64 \times 10^{-5} \text{ falhas/ano} \quad (30)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

iii. Falha de fecho do disjuntor por solicitação

No caso da falha de fecho do disjuntor por solicitação, a curva gerada pelo *software* para a relação fiabilidade-tempo está ilustrada na Figura 23, com um tempo médio entre falha (MTBF) de $1,79 \times 10^4$ anos.

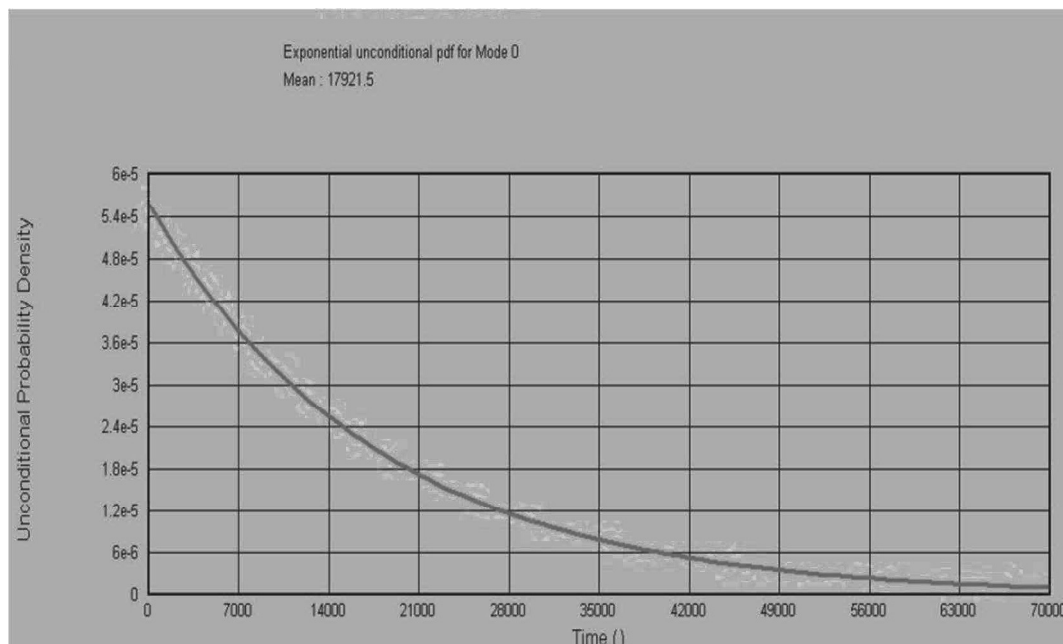


Figura 23 - Fiabilidade em função do tempo - falha de fecho do disjuntor por solicitação

A falha de fecho do disjuntor por solicitação ocorreu em 3 unidades, com os tempos de falha, em horas, representado na Tabela 20.

Tabela 20 - Lista de tempos de falha de fecho do disjuntor por solicitação

#	F/C	Time (h)	Modo
1	F	636	0
2	F	3219	0
3	F	5703	0
4	F	62128	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido pelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{1,79 \times 10^4} = 5,58 \times 10^{-5} \text{ falhas/ano} \quad (31)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

iv. Falhas internas (incluindo disjuntores)

Para as falhas internas, foi gerado o gráfico da fiabilidade em função do tempo apresentado na Figura 24, e o seu tempo médio entre falhas (MTBF) obtido foi de $2,08 \times 10^4$ anos.

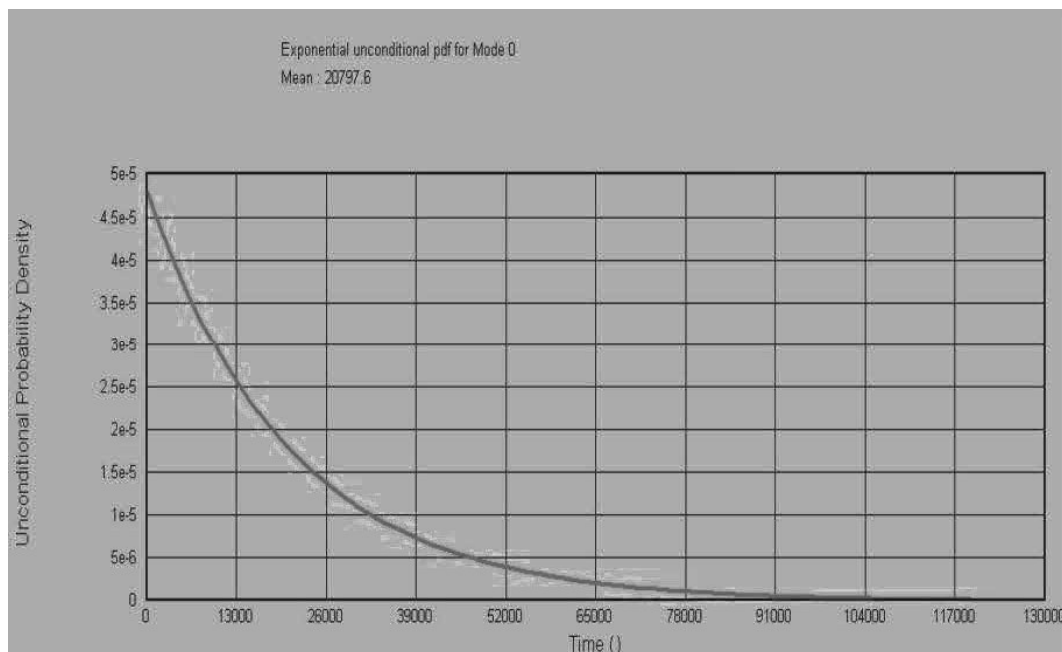


Figura 24 - Fiabilidade em função do tempo - falhas internas (incluindo disjuntores)

As falhas internas, incluindo nos disjuntores, ocorreu em 21 unidades, com os tempos de falha, em horas, representado na Tabela 21.

Tabela 21 - Lista de tempos de falhas internas (incluindo disjuntores)

#	F/C	Time (h)	Modo
1	F	486	0
2	F	528	0
3	F	543	0
4	F	570	0
5	F	1083	0
6	F	1572	0
7	F	1744	0
8	F	1782	0
9	F	1820	0
10	F	2156	0
11	F	5972	0
12	F	6672	0
13	F	8685	0
14	F	10568	0
15	F	24483	0
16	F	25794	0
17	F	30502	0
18	F	34804	0
19	F	44316	0
20	F	49488	0
21	F	74796	0
22	F	129181	0

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido apelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{2,08 \times 10^4} = 4,81 \times 10^{-5} \text{ falhas/ano} \quad (32)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

v. Falhas totais

Após a análise dos gráficos gerados pelo *software* Reliasoft Weibull++ das falhas associadas a esta norma, foi gerado e analisado a curva referente às falhas totais que afetaram o produto, que se pode verificar pela Figura 25. Juntamente com o gráfico da relação fiabilidade-tempo, é indicado o tempo médio entre falhas (MTBF), com o valor de $2,08 \times 10^4$ anos.

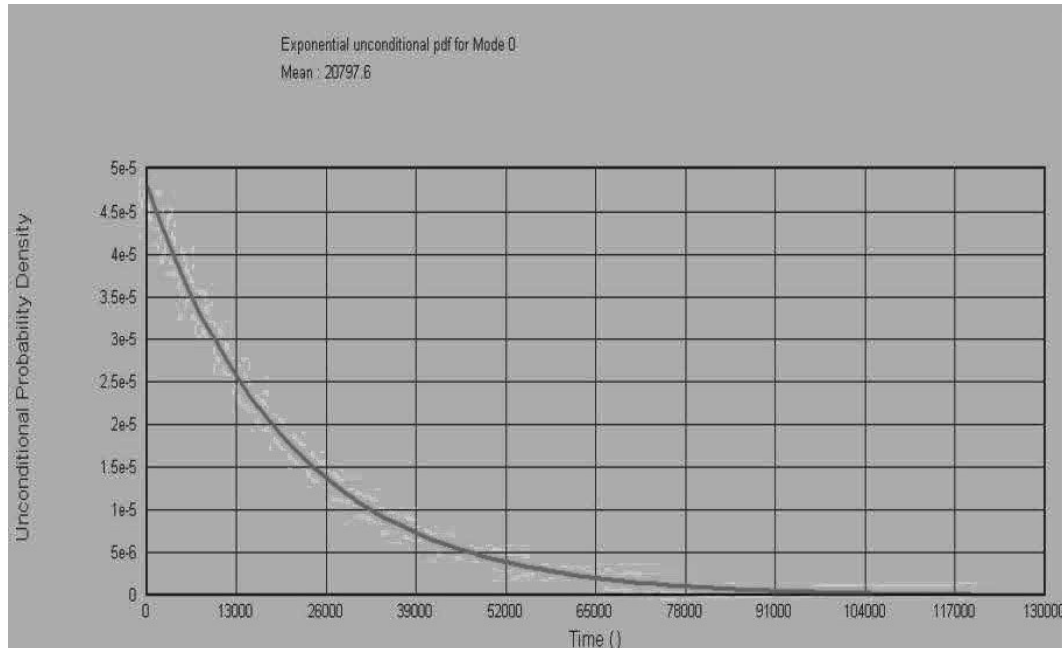


Figura 25 - Fiabilidade em função do tempo - falhas totais (especificação NH 64-S-40)

De acordo com a especificação NH 64-S-40 [7], as falhas internas representam a totalidade das falhas de uma cela. Deste modo, o número de unidades afetadas pelas falhas totais corresponde ao número de unidades afetadas pelas falhas internas, que é 21. As falhas relacionadas com a abertura e fecho do disjuntor mediante solicitação, bem como a abertura acidental do disjuntor, assumem um carácter complementar para este estudo. Contudo, não são contabilizadas no total de defeitos, uma vez que a sua ocorrência está associada a condições de operação externas, nomeadamente ao número de manobras solicitadas.

O valor da taxa de avarias (λ) é obtido apelo inverso do valor do tempo médio entre falhas (MTBF):

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{2,08 \times 10^4} = 4,81 \times 10^{-5} \text{ falhas/ano} \quad (33)$$

Após o cálculo do valor da taxa de avarias, o passo seguinte passou por comparar o valor calculado com o valor normativo, que será abordado mais à frente neste subtópico, na análise dos resultados globais.

3.5.3.3 Resultados Globais

Após o cálculo do indicador MTBF e da taxa de avarias (λ) de todas as falhas mais comuns que podem afetar as celas Normacel, é importante fazer a comparação dos valores calculados com os valores normativos das especificações NH 64-S-40 [7] e NH 64-S-52 [8]

As Tabelas 22 e 23 expõem o número de ocorrências registadas para cada modo de falha, as respetivas taxas de avaria e os valores de referência estabelecidos de acordo com as normas adotadas no presente estudo, bem como verificar os números de defeitos, os valores de MTBF (*Mean Time Between Failures*) obtidos, a taxa de avaria obtida através do *software* Weibull ++7 e os valores de avaria tabelada conforme a norma utilizada.

Tabela 22 - Taxa de avaria dos modos de avaria - especificação NH 64-S-52

Modos de avaria	Qtd	MTBF (horas)	λ – Taxa de avaria (falhas/hora)	Valores de referência
Falhas internas	17	$6,73 \times 10^7$	$1,49 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-7}$ por hora de operação
Falha de abertura do interruptor-seccionador ou seccionador de terra	3	$1,40 \times 10^8$	$7,14 \times 10^{-9}$	$6,00 \times 10^{-8}$ por hora de operação
Falha do indicador de presença de tensão	1	$2,80 \times 10^8$	$3,57 \times 10^{-9}$	$5,00 \times 10^{-9}$ por hora de operação

Tabela 23 - Taxa de avarias dos modos de avaria - especificação NH 64-S-40

Modos de avaria	Qtd	MTBF (ano)	λ – Taxa de avaria (falhas/ano)	Valores de referência
Abertura acidental do disjuntor	2	$7,12 \times 10^4$	$1,40 \times 10^{-5}$	10^{-4} por ano
Falha de abertura do disjuntor por solicitação	3	$1,77 \times 10^4$	$5,64 \times 10^{-5}$	$2,50 \times 10^{-4}$ por pedido
Falha de fecho do disjuntor por solicitação	3	$1,79 \times 10^4$	$5,58 \times 10^{-5}$	$3,50 \times 10^{-4}$ por pedido
Falhas internas (incluindo disjuntores)	21	$2,08 \times 10^4$	$4,81 \times 10^{-5}$	$4,00 \times 10^{-4}$ por ano

Como se pode verificar pelas tabelas acima, identifica-se com facilidade que os valores calculados são inferiores aos valores de referência impostos pelas normas aplicáveis, ou seja, estão dentro dos valores normativos. Da mesma forma, existe a possibilidade de que grande parte das avarias das celas fossem do tipo “Falhas internas”, o que permitiu uma projeção de posterior estudo com vista à diminuição deste número, passando inicialmente pela identificação das causas destes defeitos.

A verificação das condições, assim como o preenchimento das tabelas Excel, encontra-se automatizada através da integração de programação em VBA (*Visual Basic for Applications*). Esta automatização permite, atualmente, uma execução do trabalho de forma mais célere e eficiente, facilitando os cálculos necessários para futuros estudos aplicáveis a outros equipamentos.

Através das taxas de avarias de todos os modos de avaria, é possível calcular fiabilidade do sistema, sendo que a fiabilidade total do sistema é de 99,987%.

Finalizada a abordagem ao cálculo da fiabilidade, onde se analisaram os principais modos de avarias e as respetivas taxas de avaria, procede-se agora ao estudo da manutenibilidade, que assume particular relevância na medida em que avalia a facilidade e a rapidez com que um sistema pode ser restaurado ao seu estado operacional após uma falha.

3.5.4 Manutenibilidade

A manutenibilidade ou a manutibilidade é a probabilidade de um equipamento ser reposto a funcionar ao fim de um dado tempo, após a falha, desde que as operações de manutenção tenham sido conduzidas em condições bem definidas. Este parâmetro é caracterizado pelo tempo médio para efetuar a reparação (MTTR) e influenciado pelos seguintes fatores:

- Intermutabilidade dos componentes suscetíveis de desgaste ou avaria;
- Normalização dos sistemas e componentes;
- Possibilidade de inspeção, verificação e controlo dos componentes;
- Montagem e afinação [33].

O TTR (Tempo Técnico de Reparação) depende em geral da soma dos seguintes tempos:

- Tempo de verificação da realidade da falha;
- Tempo de diagnóstico da causa da falha;
- Tempo de acesso ao componente com falha;
- Tempo de substituição ou de reparação do componente com falha;
- Tempo de remontagem;
- Tempo de controlo e ensaio [33].

Para o cálculo do MTTR, foram considerados os componentes críticos existente na cela e para cada componente foi determinado, com base em registos da equipa de manutenção e no histórico de incumprimento, o tempo médio de reparação.

A Tabela 24 apresenta os valores referentes a um determinado cliente localizado na França. Neste caso, observa-se que o tempo de chegada à instalação é superior ao de um cliente situado em território nacional. Consequentemente, o MTTR (*Mean Time to Repair*) varia de cliente para cliente, uma vez que o tempo de acesso às instalações influencia diretamente este indicador.

3.5.5 Disponibilidade

O conceito de disponibilidade refere-se à capacidade de um produto se encontrar em condições de executar a função requerida, sob determinadas condições de operação e num dado momento ou intervalo de tempo, pressupondo que os recursos externos necessários se encontram disponíveis.

Tal como exposto no subtópico anterior, o indicador MTTR (*Mean Time To Repair*) pode ser desprezado no cálculo da disponibilidade, dado que o seu valor é significativamente reduzido quando comparado com o MTBF (*Mean Time Between Failures*). Neste contexto, a disponibilidade do produto aproxima-se de 100% refletindo uma elevada fiabilidade operacional.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \approx \frac{MTBF}{MTBF} \approx 100\% \quad (34)$$

3.5.6 Segurança Funcional

Como referido no subtópico anterior, a disponibilidade das celas Normacel tem um valor matemático aproximadamente igual a 100%. Contudo, é necessário que o sistema funcione de forma correta em resposta a situações perigosas ou condições anómalas, com o intuito de prevenir riscos para os equipamentos, pessoas e instalações.

Na EFACEC, a equipa da Qualidade assume a responsabilidade pela elaboração e implementação do Plano de Segurança, o qual constitui um conjunto estruturado de atividades documentadas e calendarizadas, integrando recursos, processos e eventos específicos. Este plano tem como finalidade estabelecer a organização interna, as responsabilidades atribuídas, os procedimentos adotados, bem como as competências e os meios necessários para assegurar que cada item cumpre os requisitos aplicáveis ao contrato ou projeto em causa.

Os requisitos associados ao ambiente, à segurança e saúde no trabalho, bem como as práticas preventivas correspondentes, encontram-se descritos em documentos disponibilizados junto dos postos de trabalho. Os colaboradores devem participar, de forma periódica e conforme estipulado pelo Departamento da Qualidade, em ações de formação específicas sobre segurança e ambiente, adaptadas às exigências do seu posto de trabalho. É responsabilidade de todos os intervenientes cumprir rigorosamente as instruções de segurança, de forma a garantir a execução correta e segura das atividades inerentes às suas funções.

Em situações de emergência, os colaboradores recebem indicações claras acerca dos procedimentos a adotar, os quais se encontram descritos na Tabela 25.

Tabela 25 - Requisitos de atuação em caso de emergência

Situação	Requisito
Situações de emergência	Em caso de acidente: contactar o Centro Médico pelo número 22666 e dar a descrição correta do tipo de acidente
	Incêndio: Contactar os Bombeiros da EFACEC pelo número 22653, dar a descrição correta da amplitude e da natureza do incêndio e desligar a energia elétrica.
Outras situações	Deverão ser imediatamente reportadas aos Gestor Qualidade Ambiente e Segurança (QAS), de forma a serem analisadas de acordo com cada situação

Perante uma não conformidade detetada ou reclamação recebida, o departamento de Controlo da Qualidade procede à determinação e análise das potenciais ocorrências e as suas causas. Dessa forma, é necessário definir e estabelecer planos de ação de forma a combater, corrigir e prevenir as potenciais ocorrências detetadas e evitar repetições.

Após a análise das falhas e identificadas as causas de defeitos, foram propostas medidas corretivas, e constatou-se que a maioria das avarias ocorrem na fase de fabrico, portanto, existiu alguma urgência na melhoria desta parte. Entre as medidas propostas e implementadas, estão as seguintes:

- Ministar formação ao nível da montagem aos novos colaboradores;
- Realização de ensaios que comprovem a qualidade de determinado artigo ou fornecedor;
- Verificação das manobras mecânicas novamente após os ensaios finais;
- Inspeções na Receção de Materiais;
- Melhorar as qualificações da equipa de manutenção;
- Envio do manual de instruções das celas Normacel, que incluem as manobras, funcionamento e locais de instalação apropriados.

Todas as reclamações enviadas pelos clientes quanto à operacionalidade do produto (reclamações de anomalias detetadas nos equipamentos em serviço no cliente) são registadas na ferramenta SiGefa QES na intranet da EFACEC, onde é feita a gestão das reclamações.

Posteriormente, as reclamações são encaminhadas para o Controlo de Qualidade, sendo da responsabilidade do respetivo responsável ou de um colaborador com delegação de competências proceder ao seu tratamento. A ocorrência é então formalmente classificada como reclamação, e o recetor da reclamação deve anexar toda informação pertinente à mesma. Todas as ações desenvolvidas neste âmbito são devidamente registadas na plataforma SiGefa QES. Se, por qualquer motivo, não seja possível utilizar a plataforma, então é utilizada a Ficha de Registo de Ocorrências em formato físico (em papel), que deve ser remetida aos

responsáveis das áreas de Gestão da Qualidade, Ambiente, Segurança e Saúde no Trabalho ou Investigação, Desenvolvimento e Inovação (QAS+IDI), sendo posteriormente introduzida no sistema SiGefa QES, sempre que tal seja viável.

3.5.7 FMECA

A aplicação da metodologia FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) constitui uma etapa fundamental no âmbito da análise RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), uma vez que possibilita a identificação sistemática dos modos de falha, das suas causas e dos respetivos efeitos sobre o desempenho das celas Normacel. No presente estudo, esta técnica foi aplicada a este produto, produzido pela EFACEC, com o objetivo de avaliar criticamente os potenciais pontos de vulnerabilidade do produto e de estabelecer medidas de mitigação adequadas.

A análise FMECA é efetuada com base metodologia de análise *Bottom-Up* e com registo de resultados em tabelas, com o ponto de partida da análise sendo a estrutura funcional das celas Normacel definida na Tabela 26, que serve de base para a identificação e categorização das falhas consideradas mais relevantes

Tabela 26 - Estrutura funcional - Normacel

Item	Descrição
1	Normacel
1.1	Barramento Geral
1.2	Seccionador de Terra
1.3	Disjuntor de Média Tensão
1.3.1	Motor
1.3.2	Bobina de abertura
1.3.3	Bobina de fecho
1.3.4	Comando
1.3.5	Ampola de vácuo
1.4	Isolador divisor capacitivo
1.5	Indicador de presença de tensão
1.6	<i>Bushings</i>
1.7	Sistema manual introdução/extração do disjuntor MT
1.8	Encravamento mecânico
1.9	Termostato
1.10	Resistência de aquecimento
1.11	Disjuntor de baixa tensão
1.12	Transformador de corrente
1.13	Transformador de tensão
1.14	Fusíveis de média tensão para o transformador de tensão

Nas tabelas seguintes, foram apresentados os principais componentes onde pode ocorrer uma falha.

Para cada um dos componentes, foi apresentada a respetiva função, os modos de falha possíveis, as potenciais causas associadas a essas falhas, bem como o efeito local correspondente a cada modo de falha. Adicionalmente, foi descrito o efeito final presumido da falha, o método de deteção adotado, a classificação da probabilidade de ocorrência (PN), do nível de severidade (SN) e do nível de deteção (DN). Por fim, procedeu-se ao cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN) e à identificação das ações recomendadas com vista à mitigação dos riscos associados.

A Tabela 27 apresenta a análise FMECA para os componentes Barramento, Seccionador de Terra e Disjuntor MT.

Tabela 27 - Análise FMECA - tabela 1

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)												
Sistema: Normacel					Preparado: Pedro Espinho							
Subsistema/Equipamento: Celas MT					Aprovado: Ion Gordiciuc							
Projeto/Fase: Produção					Data: 2025-04-10							
Ref	Componente	Função	Modo de falha	Potencial Causa	Efeito Local	Efeito Final	Método de Detecção	PN	SN	DN	RPN	Notas
1.1	Barramento	Interligar o circuito de MT entre componentes de uma cela e entre celas	Falha de interligação entre componentes na mesma cela e entre celas	Falha de aderência do barramento geral Existência de descargas parciais no compartimento do barramento geral	Degradação do isolamento e do barramento geral Degradação do isolamento e do barramento geral	Arco interno provoca indisponibilidade parcial ou total Arco interno provoca indisponibilidade parcial ou total	Verificação da termografia e dos punhos Verificação da termografia e dos punhos	2	8	1	16	
1.2	Seccionador de terra	Colocar os cabos de MT à terra	Falha de colocação dos cabos à terra	Fraca lubrificação Procedimentos de manobra errados Encravarmento forçado com o painel de cabos	Impossibilidade de manobrar o seccionador de terra	Inacessibilidade ao compartimento de cabos	Sinalização elétrica ou visual	4	4	1	16	
1.3	Disjuntor MT	Proteção do circuito de MT	Impossibilidade de abrir o circuito Impossibilidade de fechar o circuito Impossibilidade de introdução do disjuntor Impossibilidade de extração do disjuntor	Falha no comando ou na bobina de abertura Falha no comando ou na bobina de fecho Falha no sistema de introdução e extração do disjuntor	Indisponibilidade da cela Indisponibilidade da cela Indisponibilidade da cela Cela disponível, mas não a 100% (Inacessibilidade ao compartimento de cabos)	Possibilidade do Normacel se tornar indisponível Indisponibilidade da cela Indisponibilidade da cela Cela disponível, mas não a 100%	Teste de parâmetros dinâmicos do disjuntor ou sinalização visual ou elétrica Sinalização elétrica ou visual Sinalização elétrica ou visual Sinalização elétrica ou visual	2	8	1	16	
								4	4	1	16	
								3	4	1	12	
								3	4	1	12	

Tomando como exemplo, o componente 1.3 “Disjuntor MT” apresenta a função de proteger o circuito de MT (Média Tensão), sendo que pode ter quatro modos de falha distintos:

- Impossibilidade de abrir o circuito;
- Impossibilidade de fechar o circuito;
- Impossibilidade de introduzir o disjuntor;
- Impossibilidade de extração do disjuntor.

O modo de falha denominado “Impossibilidade de abrir o circuito” apresenta como potenciais causas a falha do comando ou falha da bobina de abertura. A ocorrência deste modo de falha conduz a um efeito local caracterizado pela indisponibilidade da cela, podendo resultar, como efeito final, na completa inoperacionalidade da mesma. A detecção desta falha pode ser realizada por meio de ensaios aos parâmetros dinâmicos do disjuntor ou através de sinalização elétrica ou visual.

No que se refere à classificação da probabilidade de ocorrência (PN), esta apresenta o valor 2, dado que este ocorre com pouca frequência, estimada em aproximadamente 1 ocorrência por cada 150 000 unidades instaladas e em funcionamento. Relativamente ao nível de severidade (SN), foi atribuída a classificação 8, dado que este modo de falha compromete a operacionalidade do sistema, provocando a perda de funções primárias, embora sem comprometer a segurança. Por fim, quanto ao nível de detecção (DN), este foi classificado como 1, refletindo a elevada probabilidade de detecção durante os procedimentos de controlo de projeto, antes da entrada em funcionamento do equipamento.

O número de Prioridade de Risco (RPN) será então:

$$RPN = 2 * 8 * 1 = 16 \quad (35)$$

Na Tabela 28, está apresentada a tabela FMECA realizada para as restantes componentes.

Tabela 28 - Análise FMECA - tabela 2

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)												
Sistema: Normacel					Preparado: Pedro Espinho							
Subsistema/Equipamento: Celas MT					Aprovado: Ion Gordiciuc							
Projeto/Fase: Produção					Data: 2025-04-10							
Ref	Componente	Função	Modo de falha	Potencial Causa	Efeito Local	Efeito Final	Método de Detecção	PN	SN	DN	RPN	Notas
1.3.1	Motor	Rearmar a mola de fecho do disjuntor MT	Falha no rearme da mola de fecho do disjuntor MT	Falha do circuito do motor Falha ao rearmar o mecanismo Motor "queimado"	Incapacidade de rearmar as molas Incapacidade de fechar o disjuntor Incapacidade de rearmar as molas	Indisponibilidade do disjuntor	Verificar o circuito elétrico e inspeção visual do sistema mecânico de rearme	4	4	1	16	
1.3.2	Bobina de abertura	Abertura elétrica do disjuntor MT	Falha de abertura elétrica do disjuntor MT	Falha no circuito aberto e/ou falha da bobina	Incapacidade de abrir eletricamente o disjuntor MT	Disjuntor elétrico indisponível	Verificar a abertura do circuito elétrico da bobina e a resistência de isolamento da bobina	2	8	1	16	
1.3.3	Bobina de fecho	Fecho elétrico do disjuntor MT	Falha de fecho elétrico do disjuntor MT	Falha no circuito fechado e/ou falha da bobina	Incapacidade de fechar eletricamente o disjuntor MT	Disjuntor elétrico indisponível	Verificar o fecho do circuito elétrico da bobina e a resistência de isolamento da bobina	4	4	1	16	
1.3.4	Comando	Operação mecânica do disjuntor MT	Impossibilidade de executar a operação mecânica do disjuntor MT	Regulação defeituosa; fratura de algum componente interno do mecanismo	Indisponibilidade de operar o disjuntor mecânica ou eletricamente	Disjuntor indisponível	Manutenção preventiva para verificar a regulação; parâmetros de ensaio do disjuntor	5	4	1	20	
1.3.5	Ampola de vácuo	Abre e fecha o circuito MT	Falha em abrir os contactos do disjuntor MT Falha em fechar os contactos do disjuntor MT	Falha em controlar o mecanismo; dissociação da ampola de vácuo, perda ao esvaziar a ampola	Indisponibilidade da cela Indisponibilidade da cela	Possibilidade do Normacel se tornar indisponível	Teste de parâmetros dinâmicos do disjuntor, medição da resistência de contacto do disjuntor e resistência de isolamento. Sinais elétricos	3	8	1	24	
								4	7	1	28	

1.4	Isolador divisor capacitivo	Divisão do MT para BT para ligação do indicador de presença de tensão	Falha na divisão de MT para BT	Falha no isolador capacitivo, falha na eletrificação	Não assinala a presença de tensão na cela, parcial ou total	Disponível	Visual	3	2	1	6
1.5	Indicador da presença de tensão	Indica a presença de tensão nos cabos MT	Não indica a presença de tensão nos cabos MT	Falha no isolador capacitivo, falha na eletrificação, falha no quadro	Não assinala a presença de tensão na cela, parcial ou total	Disponível	Visual	3	2	1	6
1.6	Bushings	Assegura o isolamento da cela Normacel	Falha de isolamento entre os compartimentos do disjuntor e de cabos	Condições ambientais, desempenho impróprio dos terminais de cabos	Indisponibilidade da cela	Indisponibilidade da cela	Detecção por ultrassons, medição da resistência de isolamento, presença de ozono (O3)	4	4	1	16
			Falha de isolamento entre os compartimentos do disjuntor e do barramento	Condições ambientais	Possibilidade do Normacel se tornar indisponível	Possibilidade do Normacel se tornar indisponível		3	7	1	21
1.7	Sistema manual introdução/extração do disjuntor MT	Introduzir/extrair o disjuntor MT	Falha na introdução do disjuntor	Anomalia na cela, mau funcionamento do carrinho do disjuntor	Indisponibilidade da cela	Indisponibilidade da cela	Visual	2	4	1	8
			Falha na extração do disjuntor					2	4	1	8
1.8	Encravamento mecânico	Encravamento mecânico para segurança do operador	Falha do encravamento mecânico na introdução/extração do disjuntor MT	Desregulação do sistema mecânico no disparo do disjuntor	Indisponibilidade da cela e do disjuntor	Indisponibilidade da cela	Visual	2	4	5	40
			Falha do encravamento mecânico no acesso ao compartimento de cabos	Falha no sistema de lubrificação dos cabos ou painéis deslocados	Indisponibilidade do compartimento de cabos			2	4	5	40

1.9	Termostato	Alimentação da resistência de aquecimento	Falha na alimentação da resistência de aquecimento	Mau funcionamento do contacto do termostato	Cela disponível, mas não a 100%	Possibilidade de a cela ficar indisponível	Na manutenção preventiva, deve ser verificado o circuito elétrico do termostato	2	2	2	8
1.10	Resistência de aquecimento	Sistema de aquecimento para prevenir condensação	Falha no aquecimento permitindo a condensação	Falha da resistência; falha na alimentação da resistência de aquecimento	Cela disponível, mas não a 100%	Possibilidade de a cela ficar indisponível	Na manutenção preventiva, deve ser verificado o circuito elétrico do termostato	2	2	2	8
1.11	Disjuntor BT	Proteção dos circuitos BT	Falha na proteção dos circuitos BT	Falha no disjuntor	Cela disponível, mas não a 100%	Cela disponível, mas não a 100%	Na manutenção preventiva, deve ser verificado o disjuntor BT	3	3	2	18
1.12	Transformador de corrente	Transformação de corrente MT para BT, medição e proteção	Falha no isolamento Erro na relação de transformação	Saturação do enrolamento. Abertura do Ti secundário	Cela disponível (compartimento de cabos afetado)	Possibilidade de a cela ficar indisponível	Ensaio dos transformadores na manutenção preventiva	2	7	2	28
				Saturação do enrolamento	Erros na medição e proteção	Leitura de valores errados		2	3	2	12
1.13	Transformador de tensão	Transformação de tensão MT para BT, medição e proteção	Falha no isolamento Erro na relação de transformação	Sobretensão	Cela disponível (compartimento de cabos afetado)	Possibilidade de a cela ficar indisponível	Ensaio dos transformadores na manutenção preventiva	2	4	2	16
				Saturação do enrolamento	Erro na medição e proteção	Leitura de valores errados		2	3	2	12
1.14	Fusíveis de média tensão para o transformador de tensão	Proteção do transformador de tensão	Falha na proteção do transformador de tensão	Falha no fusível	Indisponibilidade do transformador de tensão	Possibilidade de a cela ficar indisponível	Indicação de fusão do fusível por sinalização elétrica	2	4	1	8

* Esta análise foi realizada numa cela de chegada, que seria o pior caso

Por exemplo, o componente 1.12 “Transformador de corrente”, desempenha as funções de transformar a corrente de MT (Média Tensão) em BT (Baixa Tensão) e de medição e proteção. Para este componente podem existir dois modos de falha:

- Falha no isolamento;
- Erro na relação de transformação.

O modo de falha designado “Falha no isolamento” apresenta como potenciais causas a saturação do enrolamento e a abertura do secundário do TI (Transformador de Corrente). A ocorrência deste modo de falha pode originar, como efeito local, a afetação do compartimento de cabos, mantendo, contudo, a cela potencialmente disponível. Todavia, o efeito final associado a esta falha traduz-se na possibilidade de indisponibilidade da cela. O método de deteção desta falha baseia-se na realização de ensaios aos TIs durante as ações de manutenção preventiva.

No que respeita à probabilidade da ocorrência (PN), esta foi classificada com o valor 2, dado tratar-se de uma ocorrência pouco frequente, estimada em cerca de 1 caso por cada 150 000 unidades instaladas e em funcionamento. Relativamente ao nível de severidade (SN), atribuiu-se uma classificação igual a 7, uma vez que este modo de falha conduz à inoperacionalidade do sistema e pode ocasionar danos no equipamento. Por fim, a classificação atribuída ao nível de deteção (DN), foi 2, refletindo a elevada probabilidade de identificação da falha ainda na fase de montagem, antes da entrada em funcionamento do equipamento.

O número de Prioridade de Risco (RPN) será então:

$$RPN = 2 * 7 * 2 = 28 \quad (36)$$

Na última coluna da tabela, são apresentadas as observações correspondentes a cada um dos modos de falha. No caso específico deste modo de falha, a nota registada indica que a análise foi realizada numa cela função *Incoming* (ou de Chegada) com disjuntor. Tal destaque justifica-se pela importância desta cela no processo de alimentação das restantes celas do quadro de média tensão, o que torna imprescindível que os TIs assegurem o correto desempenho das suas funções.

3.5.8 FTA

Após a identificação das falhas, respetivas causas e efeitos das celas Norrmacel, torna-se necessário proceder a uma análise aprofundada das causas subjacentes e ao desenvolvimento de medidas eficazes para a sua mitigação ou eliminação. Para esse propósito, revela-se particularmente adequado o recurso ao método de Análise da Árvore de Falhas ou *Fault Tree Analysis* (FTA), o qual permite representar de forma estrutura e hierárquica as combinações de eventos que podem conduzir a uma falha do equipamento.

Esta análise deve ser efetuada para cada período de operação de cada parte ou de todo o sistema, utilizando os dados da análise FMECA e a identificação de falhas. Primeiramente, foram identificadas as falhas que podem provocar um arco interno, uma vez que na ocorrência deste tipo de falhas, o produto é normalmente substituído, por estar sujeito a uma destruição total ou parcial. Após este passo, foram geradas várias árvores de falha, verificando que apresentavam uma estrutura mais horizontal do que vertical, o que significa que ocorreram poucos desdobramentos dos níveis hierárquicos.

A Figura 26 mostra o diagrama das falhas correspondentes ao estudo FMECA (com as respetivas letras associadas) que podem provocar um arco interno, e, conseqüentemente, a indisponibilidade total da cela.

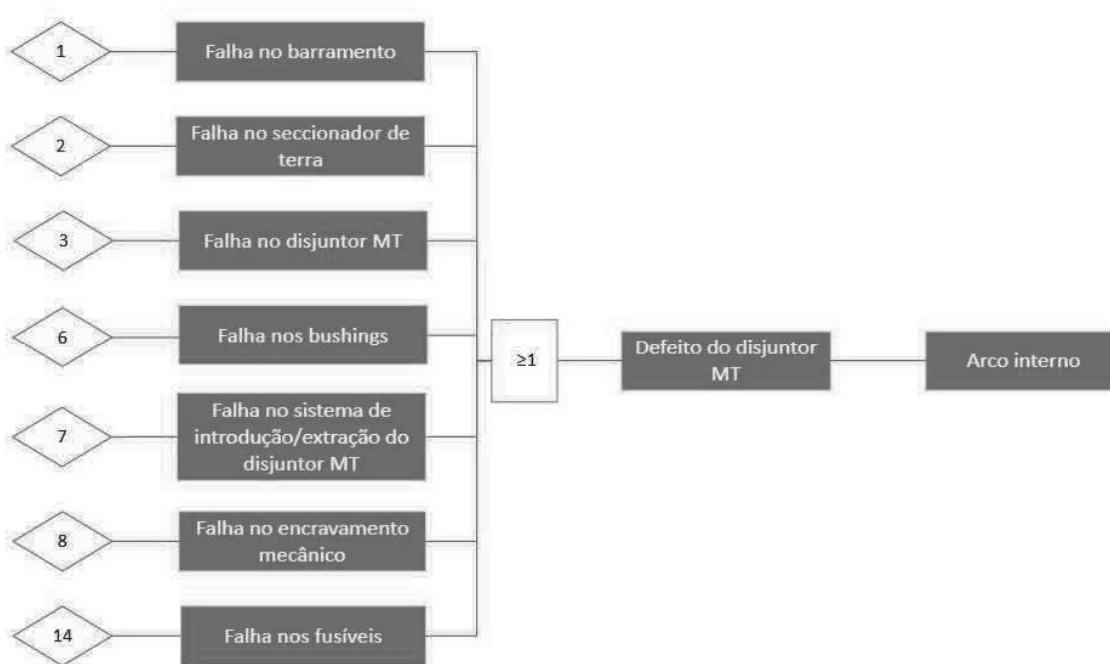


Figura 26 - Falhas que podem provocar a indisponibilidade total da cela

De seguida, identificaram-se as falhas que podem provocar uma indisponibilidade parcial, que devem ser eliminadas o mais breve possível, para que não se prolongue o efeito destas e não prejudique o bom funcionamento da cela, com a Figura 27 a ilustrar o diagrama das falhas correspondentes ao estudo FMECA que podem provocar uma indisponibilidade parcial.

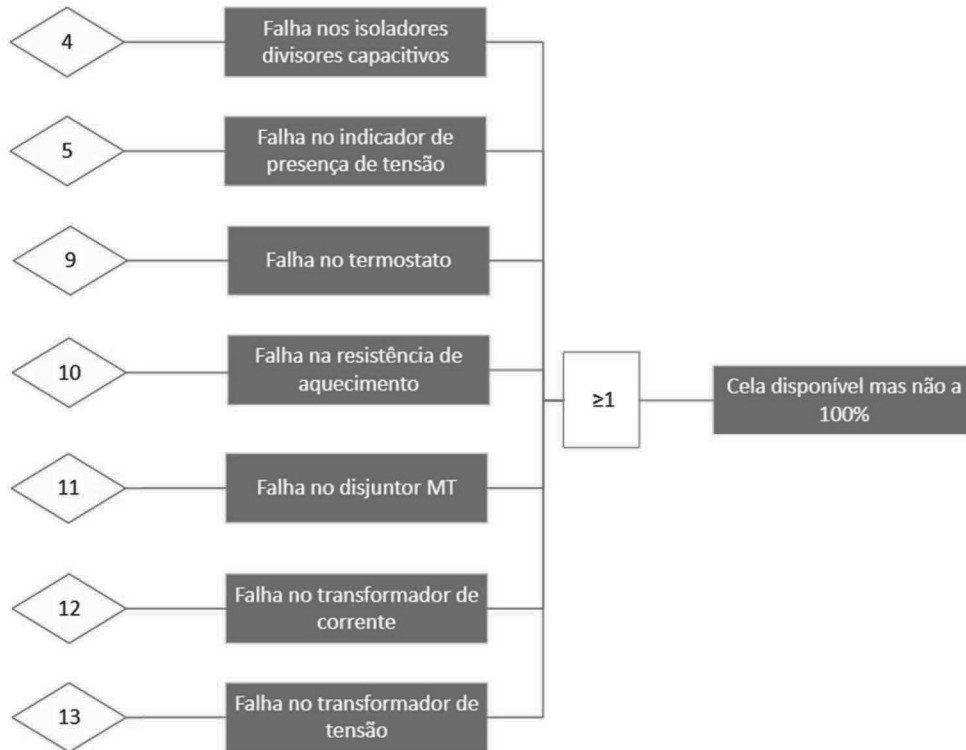


Figura 27 - Falhas que provocam a indisponibilidade parcial da célula

Em seguida, serão apresentadas todas as árvores de falhas construídas para cada componente do estudo FMECA, iniciando com os diagramas FTA das componentes ligadas às referências 1.1 “Barramento” e 1.2 “Seccionador de Terra” da tabela FMECA, que correspondem, respectivamente, às Figuras 28 e 29.

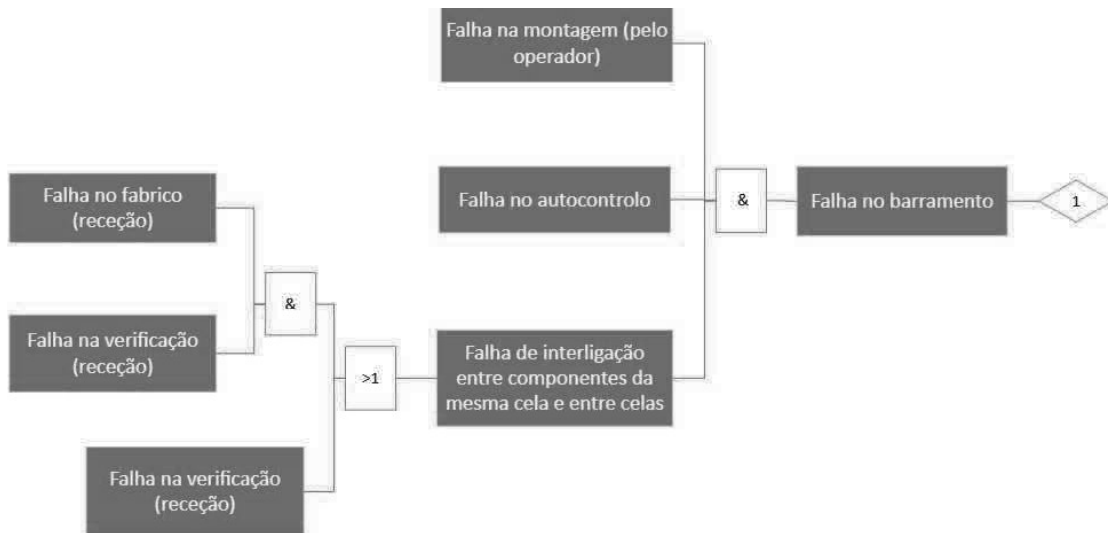


Figura 28 - Diagrama FTA para a falha no barramento geral

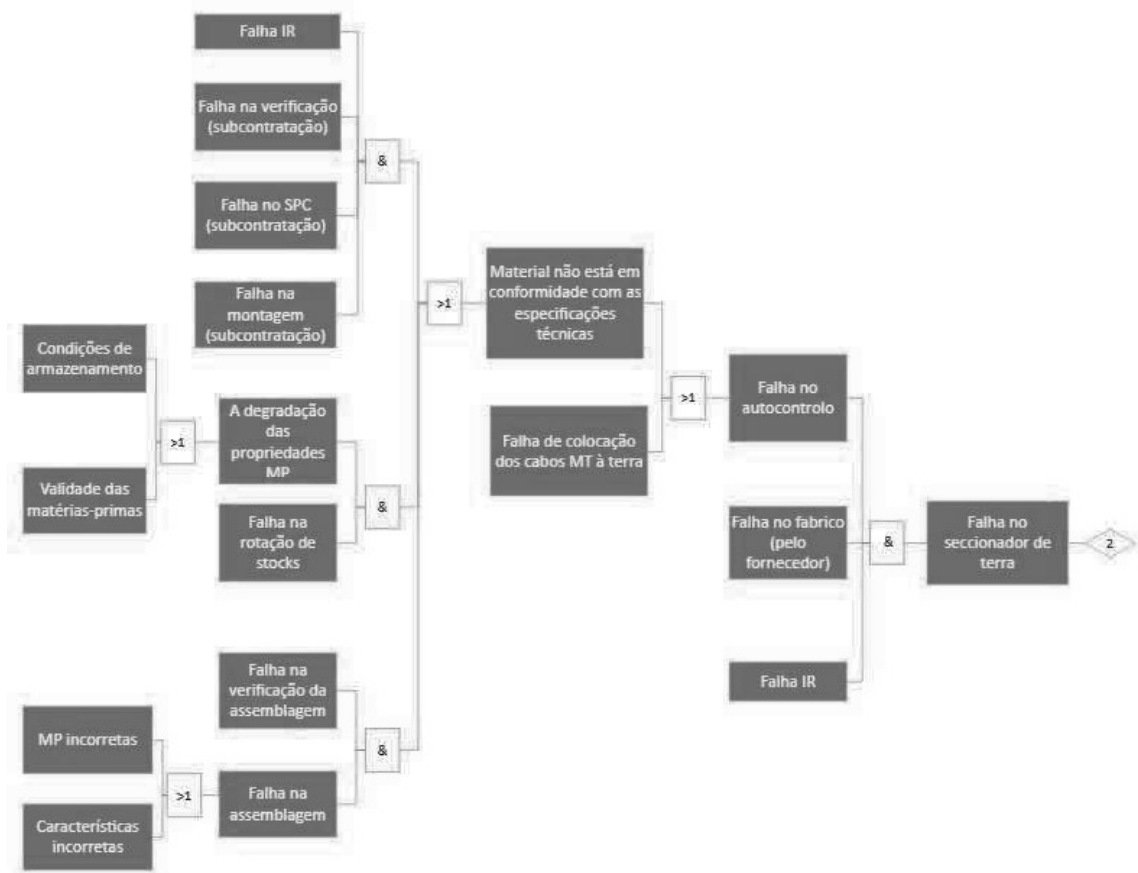


Figura 29 - Diagrama FTA para a falha no seccionador de terra

É possível verificar que a análise FTA é uma ferramenta bastante útil e que fornece dados em diversas vertentes, sendo possível identificar potenciais falhas com uma visão mais alargada e esse conhecimento é muito importante a fim de não perder as razões que afetam o evento indesejável.

A componente 1.3 correspondente ao disjuntor MT do estudo FMECA está ilustrado na Figura 30. Como se verifica, o diagrama deste componente apresenta as suas componentes internas, sendo neste caso, o motor, a bobina de abertura/fecho, o comando e a ampola de corte em vácuo, com os seus respetivos diagramas ilustrados nas Figuras 30, 31, 32, 33 e 34.

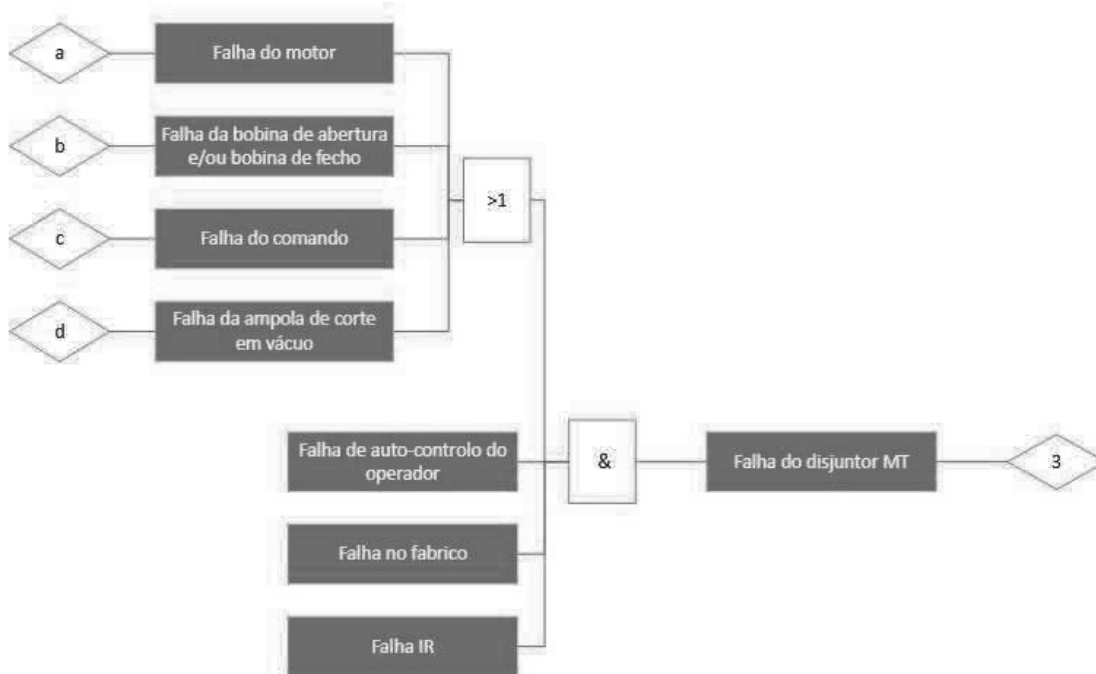


Figura 30 - Diagrama FTA para a falha no disjuntor MT

A falha IR que está representada na Figura 30 está associada à falha na resistência de isolamento.

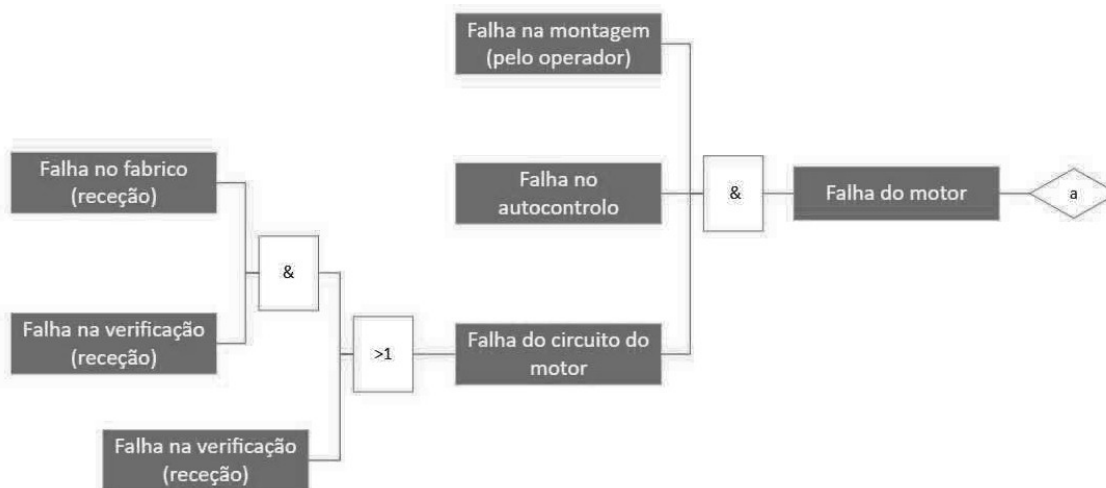


Figura 31 - Diagrama FTA para a falha no motor

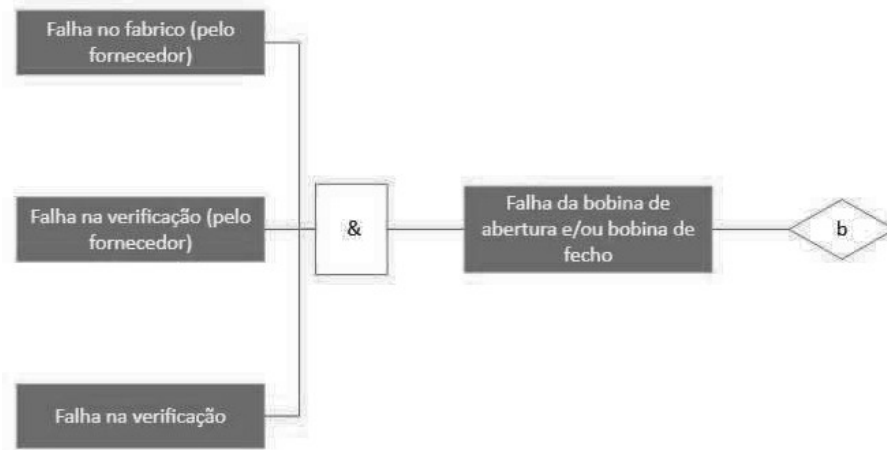


Figura 32 - Diagrama FTA para a falha na bobina de abertura e/ou bobina de fecho



Figura 33 - Diagrama FTA para a falha no comando

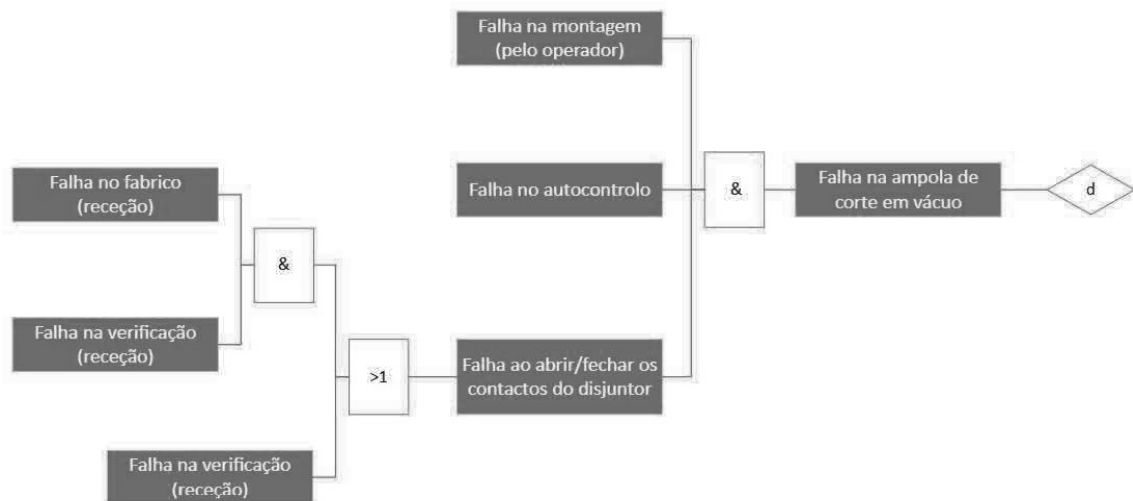


Figura 34 – Diagrama FTA na falha na ampola de corte em vácuo

O diagrama FTA relativo à falha nos indicadores divisores capacitivos está representado na Figura 35.



Figura 35 - Diagrama FTA para a falha nos indicadores divisores capacitivos

O diagrama FTA relativo à falha nos indicadores de presença de tensão está representado na Figura 36.

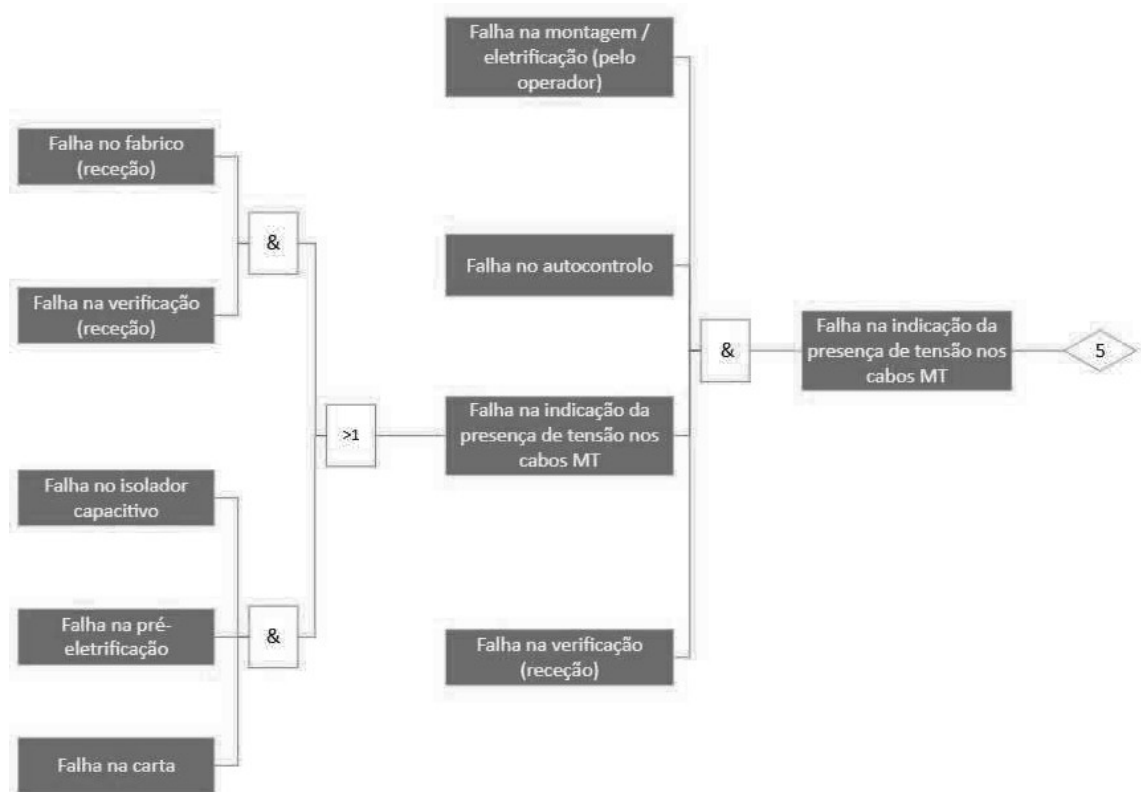


Figura 36 – Diagrama FTA para a falha nos indicadores de presença de tensão

O diagrama FTA para a falha nos *bushings* está representado na Figura 37.

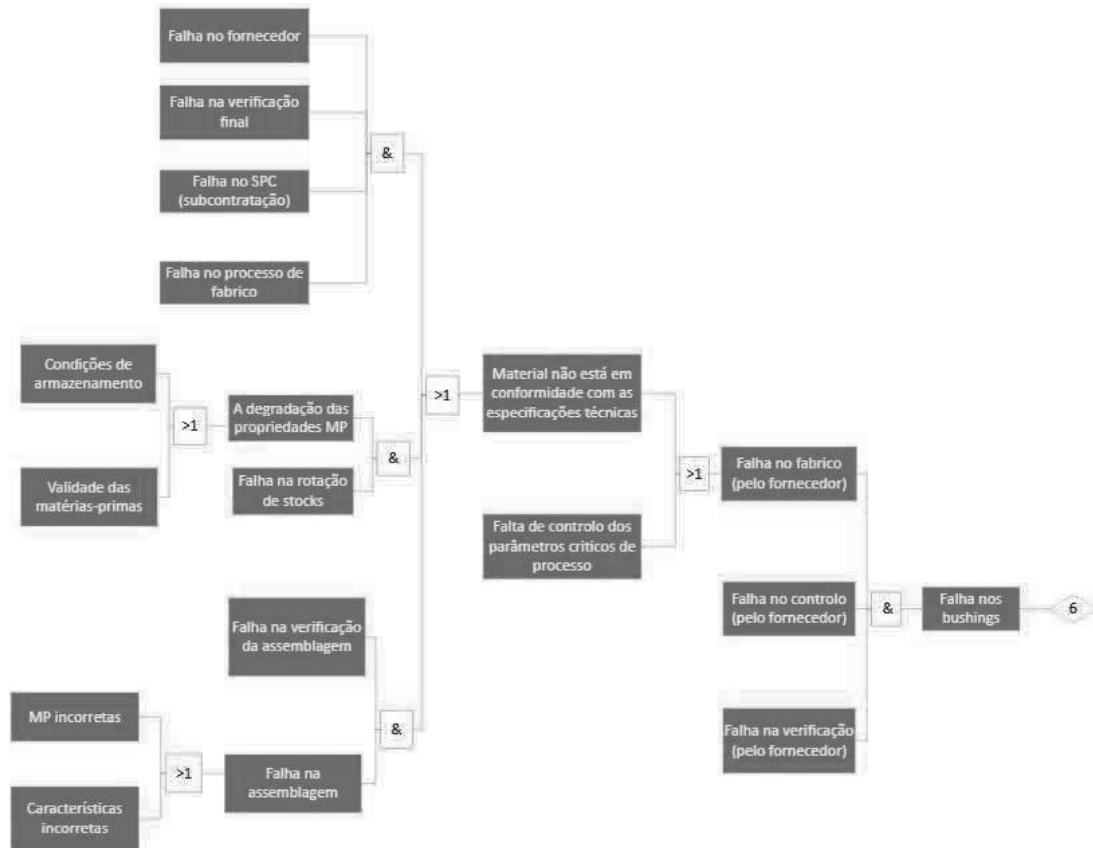


Figura 37 - Diagrama FTA para a falha nos bushings

A falha no SPC, como se verifica na Figura 37 está associada à falha no Sistema de Proteção e Controlo.

O diagrama FTA para a falha nos *bushings* está representado na Figura 38.

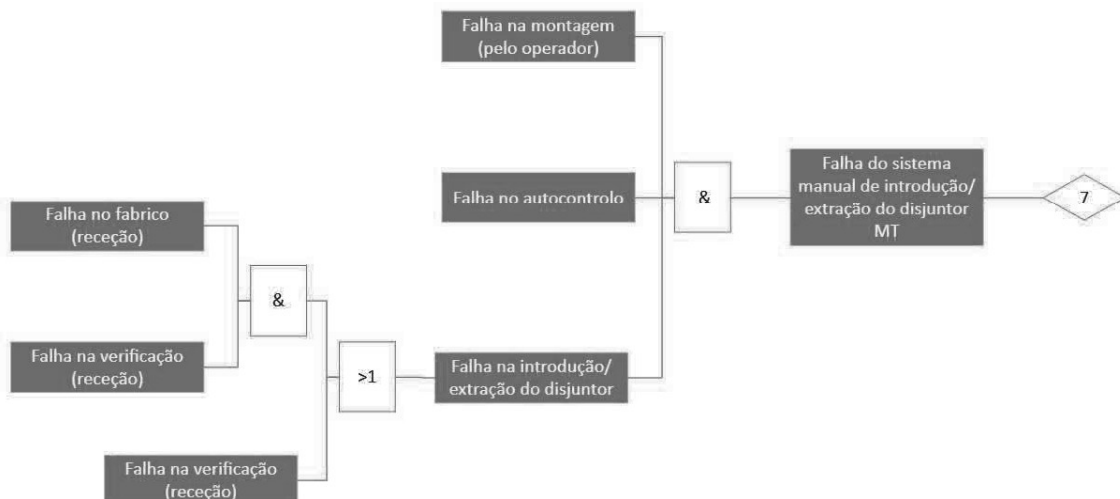


Figura 38 - Diagrama FTA para a falha no sistema manual de introdução/extração do disjuntor MT

O diagrama FTA para a falha no encravamento mecânico está representado na Figura 39.

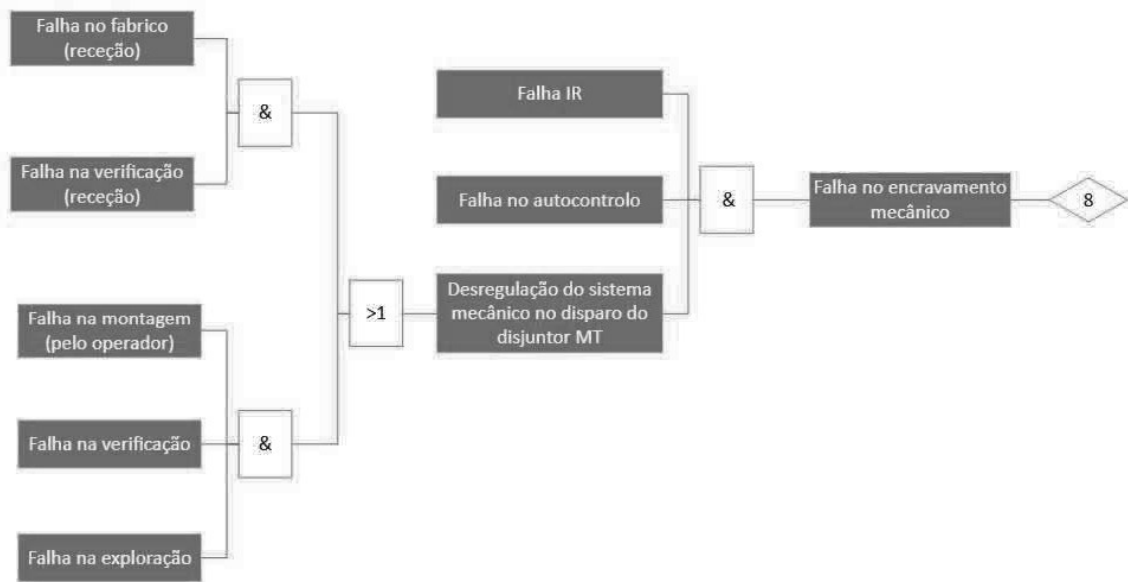


Figura 39 - Diagrama FTA para a falha no encravamento mecânico

O diagrama FTA para a falha no termostato está representado na Figura 40.

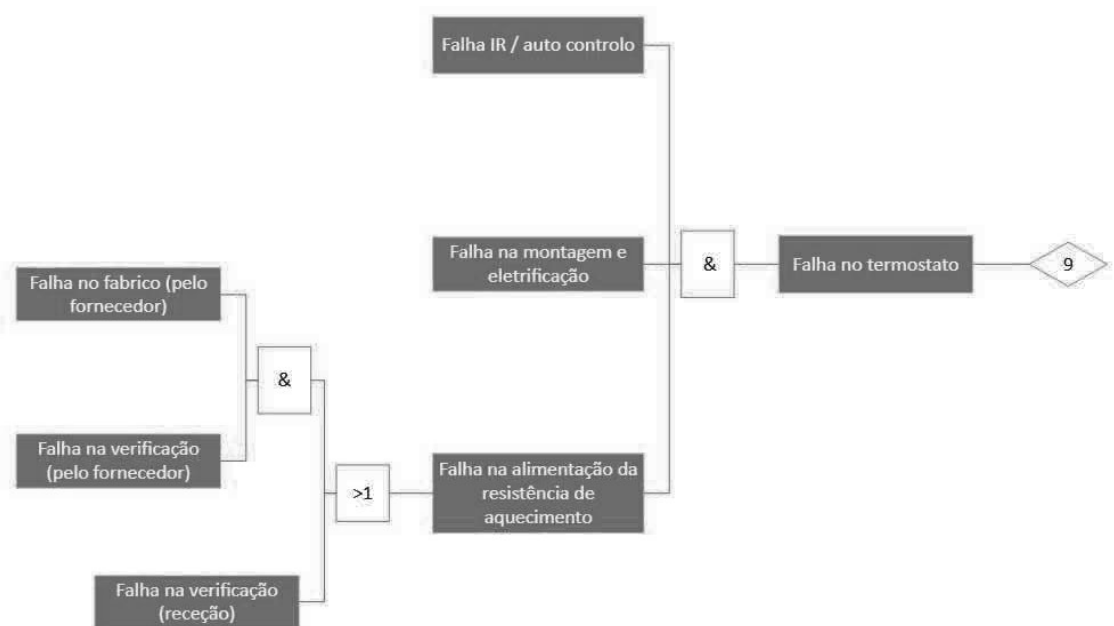


Figura 40 - Diagrama FTA para a falha no termostato

O diagrama FTA para a falha na resistência de aquecimento está representado na Figura 41.

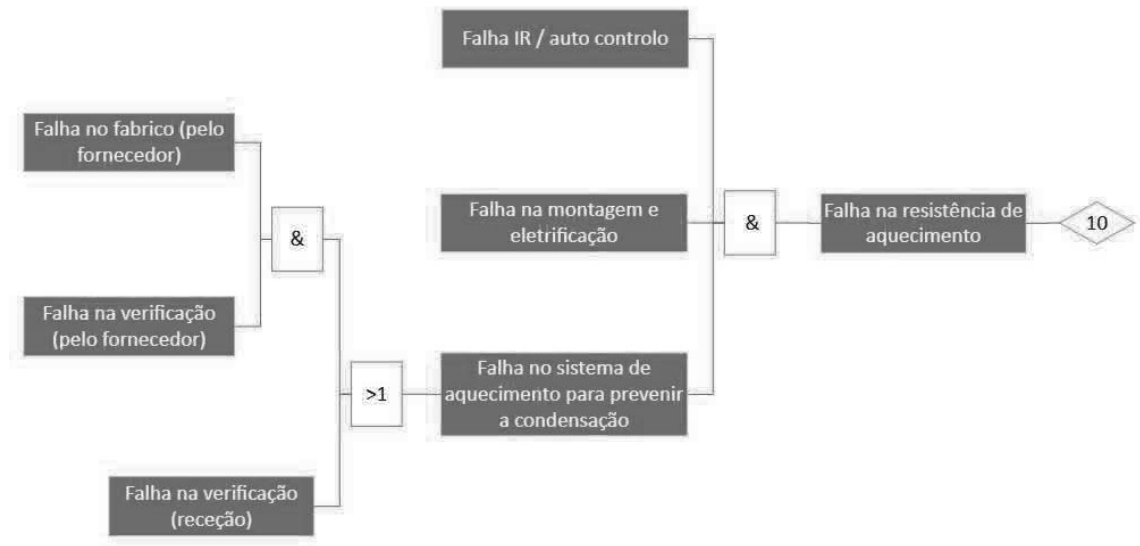


Figura 41 - Diagrama FTA para a falha na resistência de aquecimento

O diagrama FTA para a falha nos disjuntores BT está representado na Figura 42.

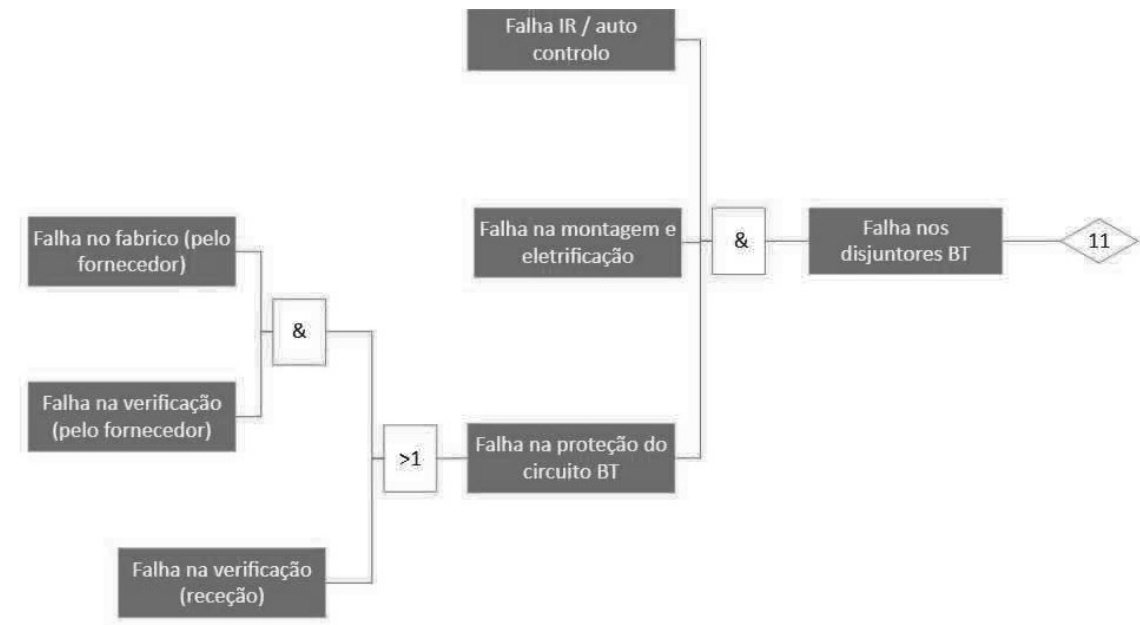


Figura 42 - Diagrama FTA para a falha nos disjuntores BT

O diagrama FTA para a falha nos transformadores de corrente está representado na Figura 43.

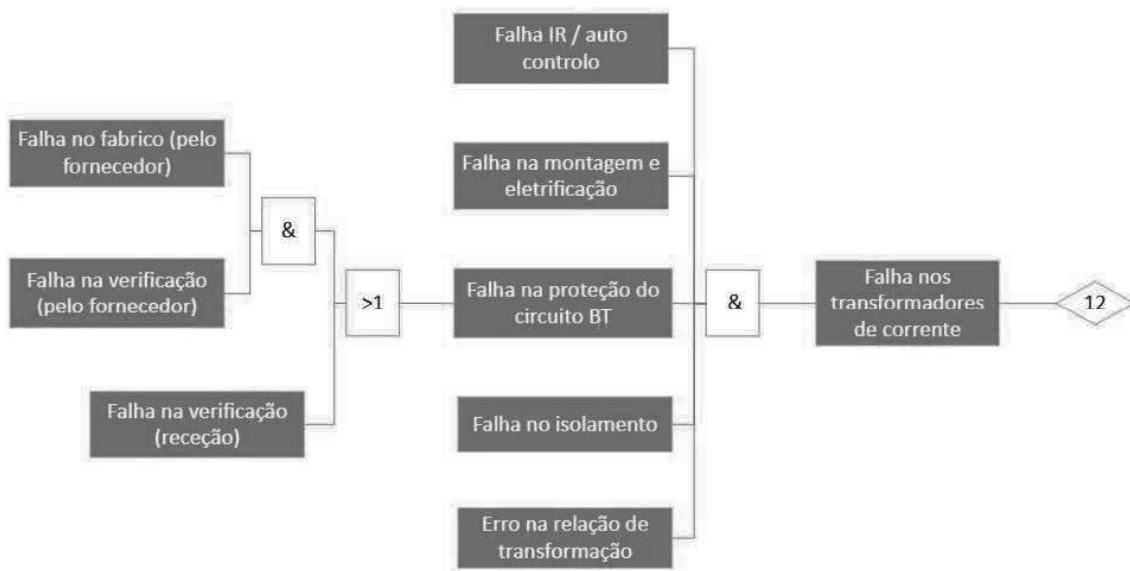


Figura 43 - Diagrama FTA para a falha nos transformadores de corrente

O diagrama FTA para a falha nos transformadores de tensão está representado na Figura 44.



Figura 44 - Diagrama FTA para a falha nos transformadores de tensão

O diagrama FTA para a falha nos transformadores de tensão está representado na Figura 45.



Figura 45 - Diagrama FTA para a falha nos fusíveis

Com base na análise dos diagramas anteriormente apresentados, é possível identificar os principais pontos críticos de controlo e mitigação de falhas, nomeadamente:

- A seleção adequada da matéria-prima (MP);
- A implementação de procedimentos de autocontrolo, verificação, montagem e operação;
- A realização sistemática de ensaios de rotina;
- O correto armazenamento tanto das matérias-primas como dos componentes.

Importa salientar que, dado o componente Disjuntor MT ser constituído por diversos subcomponentes, as árvores de falhas foram desenvolvidas individualmente para cada um desses elementos, culminando posteriormente na construção da árvore global do sistema.

A elaboração e análise de um conjunto estruturado de árvores de falhas facilita, de forma significativa, a sua implementação em sistemas especializados, nomeadamente através de *software* e ferramentas de cálculo. Acresce ainda que, quando esses sistemas dispõem de funcionalidades específicas para a construção, importação, exportação e integração de árvores de falhas com outras ferramentas, a resolução de problemas torna-se mais célere, eficaz e sistemática.

Este ganho de eficiência advém do facto de que as questões colocadas ao sistema seguiram as ramificações definidas nas árvores, permitindo, em função das respostas obtidas, a eliminação de causas improváveis. Tal é possível dado que um mesmo modo de falha pode surgir em diferentes pontos da estrutura de uma árvore, sendo assim essencial a sua representação clara e bem estruturada.

3.6 Medidas Propostas

Na sequência da análise das falhas e a identificação das respetivas causas, foram estabelecidas medidas corretivas direcionadas às potenciais falhas às quais as celas Normacel estão sujeitas. Cumpre salientar que, tal como frequentemente observado em estudos desta natureza, algumas das medidas propostas apresentam carácter transversal, levando a que sejam associadas a mais do que um tipo de defeito.

Verificou-se ainda que a maioria das falhas identificadas se manifesta predominantemente durante a fase de fabrico, pelo que a implementação de ações corretivas neste tipo de equipamentos deve assumir carácter prioritário. Tal abordagem visa a otimização dos processos produtivos, contribuindo para a redução de falhas e para o reforço global da fiabilidade do produto.

Com base nas falhas identificadas e nas respetivas causas, a Tabela 29 reúne algumas medidas propostas, devidamente agrupadas por categoria de defeitos, permitindo uma visão clara e sistemáticas das ações a adotar

Tabela 29 - Lista de medidas propostas

Tipo de Defeitos	Medidas Propostas
Defeitos internos	<ul style="list-style-type: none">• Implementação de programas de formação contínua para os técnicos responsáveis pela montagem;• Execução de múltiplas manobras manuais durante a fase de montagem, nomeadamente a verificação do sentido de rotação nos mecanismos de fecho;• Inspeção rigorosa aquando da receção de materiais e componentes, com vista a detetar eventuais não conformidades antes da sua incorporação no interior das celas;• Realização de ensaios técnicos e funcionais destinados a validar a qualidade e conformidade dos artigos recebidos;• Reforço da qualificação e especialização da equipa de manutenção, através de ações de formação técnica, atualização sobre novas tecnologias e boas práticas de diagnóstico e reparação de avarias;• Utilização exclusiva de matérias de elevada qualidade e fiabilidade comprovada, como silicões, massas isolantes, fios condutores, entre outros.
Falha de abertura do seccionador de terra	<ul style="list-style-type: none">• Implementação de programas de formação contínua para os técnicos responsáveis pela montagem;• Execução de múltiplas manobras manuais durante a fase de montagem, nomeadamente a verificação do sentido de rotação nos mecanismos de fecho;

Tipo de Defeitos	Medidas Propostas
	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção rigorosa aquando da receção de materiais e componentes, com vista a detetar eventuais não conformidades antes da sua incorporação no interior das celas; • Realização de ensaios técnicos e funcionais destinados a validar a qualidade e conformidade dos artigos recebidos; • Verificação funcional do seccionador de terra antes da sua instalação na cela, assegurando a operação segura e conforme os requisitos técnicos do sistema; • Rever e, se necessário, aumentar a sensibilidade dos seccionadores de terra, de forma a garantir uma atuação eficaz em situações de defeito à terra.
Falha do indicador de presença de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Implementação de programas de formação contínua para os técnicos responsáveis pela montagem; • Execução de múltiplas manobras manuais durante a fase de montagem, nomeadamente a verificação do sentido de rotação nos mecanismos de fecho; • Realização de ensaios técnicos e funcionais destinados a validar a qualidade e conformidade dos artigos recebidos.
Falha de abertura do disjuntor de média tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Implementação de programas de formação contínua para os técnicos responsáveis pela montagem; • Execução de múltiplas manobras manuais durante a fase de montagem, nomeadamente a verificação do sentido de rotação nos mecanismos de fecho; • Inspeção rigorosa aquando da receção de materiais e componentes, com vista a detetar eventuais não conformidades antes da sua incorporação no interior das celas; • Realização de ensaios técnicos e funcionais destinados a validar a qualidade e conformidade dos artigos recebidos; • Aumentar a energia acumulada na mola do mecanismo de acionamento, de forma a garantir uma eficaz e firme atuação do disjuntor, especialmente em manobras de abertura e fecho sob carga.
Falha de fecho do disjuntor de média tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Implementação de programas de formação contínua para os técnicos responsáveis pela montagem; • Execução de múltiplas manobras manuais durante a fase de montagem, nomeadamente a verificação do sentido de rotação nos mecanismos de fecho; • Inspeção rigorosa aquando da receção de materiais e componentes, com vista a detetar eventuais não conformidades antes da sua incorporação no interior das celas;

Tipo de Defeitos	Medidas Propostas
	<ul style="list-style-type: none"> • Realização de ensaios técnicos e funcionais destinados a validar a qualidade e conformidade dos artigos recebidos; • Ajustar as características do motor de acionamento de forma a permitir o correto armamento do disjuntor, de forma a assegurar os valores adequados de binário e velocidade.

Algumas das medidas definidas já se encontram em fase de implementação. Um exemplo é a criação de um canal de comunicação interna, disponibilizado através da *intranet* da EFACEC, que possibilita a todos os colaboradores partilhar sugestões e contributos orientados para a melhoria contínua dos processos de fabrico.

Outra medida de relevo corresponde ao desenvolvimento de um *software* específico para a integração da informação de um projeto (funções e especificações), com a capacidade de gerar automaticamente as árvores de falhas e os formulários FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). Este sistema deverá, adicionalmente, permitir a incorporação dos dados de campo, como taxas de falha numa base de dados dedicada ao cálculo de fiabilidade. A disponibilização de um serviço informatizado permitirá reduzir significativamente o tempo necessário para a elaboração dos formulários e das árvores de falhas, facilitará a atualização contínua dos formulários e otimizará o processo de desenvolvimento das árvores de falhas.

4 Conclusões

A temática da fiabilidade associada aos quadros de média tensão (QMT) é de extrema importância, uma vez que estes constituem elementos centrais nas redes de distribuição de energia elétrica, onde qualquer falha pode comprometer a continuidade do serviço, provocar avarias em cadeia, originar elevados custos de manutenção e reparação, além de colocar em risco a segurança de pessoas e infraestruturas.

O desenvolvimento do presente estudo decorreu de forma bastante positiva, ao proporcionar um contacto direto, ativo e integrado com o contexto profissional. Esta experiência permitiu a análise de processos reais, a avaliação da sua viabilidade e a formulação de propostas de melhoria alinhadas com as necessidades específicas da organização. Constituiu, assim, uma oportunidade valiosa para a aquisição de conhecimentos práticos e para a consolidação de hábitos de trabalho na área em estudo.

A articulação entre os conceitos assimilados ao longo do percurso académico e a sua aplicação em situações concretas do quotidiano profissional mostrou-se particularmente enriquecedora, contribuindo para um aprofundamento sólido dos conhecimentos adquiridos. Destaca-se ainda a relevância do trabalho desenvolvido, quer para a entidade de acolhimento, quer para o crescimento pessoal e profissional do autor.

Para uma compreensão mais clara e abrangente dos tópicos abordados no capítulo dedicado à aplicação prática, recomenda-se a consulta dos Anexos, os quais incluem tabelas fundamentais para o tema em análise. A inclusão destes elementos no corpo principal do texto revelou-se pouco adequada, dado que poderiam comprometer a fluidez da leitura e transmitir, de forma incorreta, a perceção de uma menor densidade da componente prática. Assim, optou-se por apresentar o conteúdo de forma clara e concisa no corpo do trabalho, remetendo para os anexos a informação detalhada que resultou do estudo realizado ao longo do período em análise.

O presente estudo procurou evidenciar que, através da aplicação de metodologias adequadas no âmbito da fiabilidade, é possível estruturar a informação de forma a facilitar e tornar mais precisa a identificação dos principais defeitos e das respetivas causas. Esta abordagem permite,

subsequentemente, a definição e implementação fundamentada de medidas corretivas e de planeamento.

Neste contexto, a metodologia RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), o procedimento de análise FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) e a análise FTA (*Fault Tree Analysis*) revelaram-se ferramentas fundamentais no processo de avaliação da fiabilidade. Em particular, a análise FMECA foi adaptada às especificidades do caso em estudo, demonstrando o seu potencial contributo para a melhoria de projetos, produtos e processos. Os benefícios observados incluem um aumento de qualidade, uma maior segurança operacional, um acréscimo na satisfação do cliente e uma redução de custos.

Adicionalmente a aplicação FMECA possibilita a identificação sistemática dos modos de falha e respetivas ações corretivas, constituindo assim uma base sólida de conhecimento que pode ser reutilizada em futuras análises, tanto na resolução de problemas como no contexto de formação de novos engenheiros da área da qualidade.

Verificou-se que as previsões de fiabilidade são efetuadas ao longo das fases de conceção e definição, projeto e desenvolvimento, bem como durante as etapas de operação e manutenção, com o objetivo de avaliar, definir e otimizar as medidas de fiabilidade de um determinado equipamento ou sistema.

As estimativas da taxa de falha revelam-se particularmente úteis em diversas atividades críticas relacionadas com o projeto e a operação de equipamentos elétricos. Estas incluem, entre outras, a verificação do cumprimento de metas de fiabilidade, a identificação de potenciais fragilidades no design, a análise de alternativas de projeto e dos respetivos custos ao longo do ciclo de vida, o fornecimento de dados para análises de fiabilidade e disponibilidade do sistema, o apoio logístico, o planeamento estratégico e a definição de objetivos para os ensaios de fiabilidade.

A metodologia proposta para os processos de manutenção e monitorização demonstrou que, com algumas adaptações face ao modelo tradicionalmente adotado na indústria, é possível obter benefícios significativos. Entre eles, destaca-se o aumento do número de equipamentos sob monitorização, através da aplicação de técnicas objetivas e subjetivas, assegurando simultaneamente a fiabilidade e a credibilidade da informação recolhida.

Importa ainda salientar que, ao longo do desenvolvimento deste estudo e conforme evidenciado na revisão da literatura, se verificou uma tendência generalizada por parte dos autores em privilegiar a manutenção preditiva, alicerçada no monitoramento da condição dos equipamentos – isto é, na monitorização objetiva – como caminho para alcançar a excelência em manutenção. Constatou-se igualmente que a engenharia de manutenção deve, progressivamente, assumir um papel central na definição do rumo da manutenção, responsabilizando-se pela elaboração dos procedimentos e planos correspondentes.

Neste sentido, sugere-se, para futuras implementações, a realização de uma análise do impacto individual da monitorização objetiva nos indicadores de desempenho e nos custos associados à manutenção. Recomenda-se ainda que a equipa responsável pela implementação possua uma formação sólida na temática, demonstrando um domínio aprofundado dos seus propósitos,

objetivos, definições e das ferramentas aplicadas, sendo estas, no caso da monitorização subjetiva, os próprios sentidos humanos.

Referências

- [1] A. Hoyland and M. Rausand, “A brief history of reliability,” *System Reliability Theory: Models and Statistics Methods*, 1994.
- [2] J. McLinn, “A Short History of Reliability,” Hanover, Apr. 2010.
- [3] I. Gordiciuc, “Análise da Fiabilidade de Aparelhos de Proteção em Média Tensão,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017.
- [4] M. Azarkhali and M. Modarres, “The Evolution and History of Reliability Engineering: Rise of Mechanistic Reliability Modeling,” *International Journal of Performability Engineering*, vol. 8, pp. 35–47, Jan. 2012.
- [5] M. Cardoso, “Estudo no âmbito RAMS sobre a fiabilidade e conceito de manutenção aplicável ao sistema UAV Skyguardian,” Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2008.
- [6] “IEC 62271-200 («High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metalenclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV»),” May 2021.
- [7] “HN 64-S-40 («Appareillage à haute tension 24 kV sous enveloppe métallique et bâtiment préfabriqué pour postes HTB/HTA»),” Oct. 1995.
- [8] “HN 64-S-52 («Appareillage insensible à son environnement sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tension assignée égale à 24 kV »),” Nov. 2002.
- [9] J. A. da Silva Sobral, “UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ‘RAMS’ NA ANÁLISE DE BARREIRAS DE SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DE RISCO ELEVADO,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [10] B. Almeida, “Estudo da Metodologia RAMS: Aplicação a um caso prático,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2011.

- [11] J. A. da Silva Sobral, "Análise 'RAMS' de Sistemas de Combate a Incêndio em Edifícios Públicos," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2002.
- [12] M. Pinheiro, "Reliability, Availability and Maintainability Study (RAMS Analysis)," ORS Consulting. Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.ors-consulting.com/reliability-availability-maintainability>
- [13] F. Maciel Barbosa, "Fiabilidade do Sistema de Produção/Transporte," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017.
- [14] B. Christiansen, "Reliability Engineering 101 - Definition, Goals, Techniques," Limble. Accessed: Nov. 13, 2024. [Online]. Available: <https://limblecmms.com/blog/reliability-engineering/>
- [15] Right Paradigm Consulting, "The Importance of Reliability Analysis," Right Paradigm Consulting. Accessed: Nov. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.rightparadigmconsulting.com/the-importance-of-reliability-analysis/>
- [16] F. Maciel Barbosa, "Introdução à Fiabilidade de Sistemas Elétricos de Energia," Porto, Mar. 2018.
- [17] "NP EN 13306 - 2007 - Terminologia Da Manutenção," Caparica, Sep. 2007.
- [18] BYHON, "RAMS Engineering," BYHON. Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.byhon.it/rams-engineering/>
- [19] C. Cajazeira, "Estudo dos Fatores RAM na Fase de Operação e Manutenção de Aerogeradores," Universidade do Minho, Braga, 2012.
- [20] D. S. Fosnight, "RAMS Engineering, Advancement of System Safety of Avionic Equipment," Politecnico di Milano, Milan, 2022.
- [21] B. Lemos, "Análise RAMS na componente Manutenibilidade," Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [22] V. Rajamanickam, "Analysis and Implementation of FMECA Methodology - Vacuum Machine," Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.
- [23] M. de Pinho Gomes, "Modelo de Análise de Causas e Consequências de Falhas em Fase de Obras," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2020.
- [24] C. A. Ericson II, "Fault Tree Analysis - A History," *Proceedings of the 17th International System Safety Conference*, 1999.
- [25] P. Gonçalves, "Aplicação da Metodologia FMEA para Avaliação do Risco de Incumprimento de Prazo de Empreitadas de Construção," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2023.

- [26] C. Silva, “Análise da Árvore de Falhas do processo de cozedura da Cerâmica F. Santiago, S.A.,” Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2013.
- [27] A. Patharkar, “Demystifying Switchgear Classification,” LinkedIn. Accessed: Jul. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/demystifying-switchgear-classification-amol-surendra-patharkar-ap--2gyvc/>
- [28] “Regulamento (UE) 2024/573 do Parlamento Europeu e do Conselho,” *Jornal Oficial da União Europeia*, vol. 573, Feb. 2024.
- [29] Efacec, “Aparelhagem.” Accessed: Mar. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.efacec.com/pt/negocio/aparelhagem/>
- [30] I. Gordiciuc, “Análise da Fiabilidade dos Aparelhos de Proteção em Média e Alta Tensão,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
- [31] “IEC 62271-1 («High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear»),” Jul. 2017.
- [32] Efacec, “Manual Normacel 3G PT,” Jun. 01, 2022.
- [33] A. M. S. da C. Monteiro, “Fiabilidade de Equipamentos na Indústria Automóvel:Disponibilidade e Manutibilidade:Gestão Técnica de uma Linha de Produção,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000.

Anexo A: Tabela Especificação NH 64-S-40

Neste anexo está apresentado a tabela com as condições descritas na especificação técnica da EDF (*Électricité de France*) NH 64-S-40 [7] que foi utilizada para a verificação das condições, através da Tabela 23.

ANNEXE BB (normative)

TABLEAU DE CARACTÉRISTIQUES DE FMDS

N° de paragraphe de référence	Caractéristique ou fonction	Valeurs des niveaux de fiabilité de référence FC
4.30.3.2.1	Ouverture intempestive de disjoncteur	10^{-4} par an
4.30.3.2.2	Refus d'ouverture à la sollicitation pour les disjoncteurs	$2,5 \cdot 10^{-4}$ par demande
	Refus de fermeture à la sollicitation pour les disjoncteurs	$3,5 \cdot 10^{-4}$ par demande
4.30.3.4	- Taux de défaut interne d'une U.F. (disjoncteur compris)	$4 \cdot 10^{-4}$ par an
4.30.3.5	- Taux de fuite des systèmes à pression scellés d'une U.F.	$6 \cdot 10^{-3}$ par an

Pour la détermination du niveau de fiabilité, on prendra :

- $n = 3$
- $N = 10$.

Anexo B: Tabela Especificação NH 64-S-52

Neste anexo está apresentado a tabela com as condições descritas na especificação técnica da EDF (*Électricité de France*) NH 64-S-52 [8] que foi utilizada para a verificação das condições, através da Tabela 22.

- 67 -

HN 64-S-52
Novembre 2002

ANNEXE 9.D (Informative) - Tableau des caractéristiques de fiabilité

Caractéristique ou fonction	Valeurs des niveaux de fiabilité de référence (Taux de défaillance)
Défauts internes à un tableau	1×10^{-7} par heure de fonctionnement (pour chaque tableau)
Fuite d'un système à pression scellé	$0,3 \times 10^{-7}$ par heure de fonctionnement (pour chaque enveloppe de tableau)
Refus d'ouverture ou de fermeture d'un interrupteur sectionneur ou d'un sectionneur de terre	$0,6 \times 10^{-7}$ par heure de fonctionnement (pour chaque tableau)
Indicateur de présence de tension	(*) $0,5 \times 10^{-8}$ par heure de fonctionnement (pour chaque U.F. équipée)
Défaut détecteur de présence et d'absence de tension HTA (annexe B)	(*) $0,5 \times 10^{-7}$ par heure de fonctionnement (pour chaque détecteur)
Défaut transformateur auxiliaire HTA/BT	1×10^{-7} par heure de fonctionnement (pour chaque transformateur)

(*) valeur normative

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

Pedro José Gonçalves Espinho

ISEP, Porto, 14 de setembro de 2025