



ANÁLISE DA FIABILIDADE DE APARELHOS DE PROTEÇÃO EM MÉDIA TENSÃO

ION GORDICIUC

Julho de 2017

ANÁLISE DA FIABILIDADE DE APARELHOS DE PROTEÇÃO EM MÉDIA TENSÃO

Ion Gordiciuc



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2017

Dissertação elaborada para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
DSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de
Energia

Candidato: Ion Gordiciuc, Nº 1100345, 1100345@isep.ipp.pt

Orientação científica: Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias, fmd@isep.ipp.pt

Empresa: EFACEC

Supervisão: Manuel Santos Carlos



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2017

“Desde o início da história, a humanidade tem tentado prever o futuro. Observando o voo dos pássaros, o movimento das folhas das árvores e outros métodos foram algumas das práticas utilizadas. Felizmente, os engenheiros de hoje não têm que depender de pífia ou uma bola de cristal para prever o futuro dos seus produtos. Através da análise de dados de vida, os Engenheiros da Qualidade determinam a probabilidade e capacidade das peças, componentes e sistemas para executar suas funções requeridas por períodos de tempo desejados sem falhas em ambientes específicos.”

Nicolette Young

Agradecimentos

Quero expressar a minha gratidão pela disponibilidade, auxílio, apoio, motivação e transmissão de conhecimentos prestados, pois sem eles teria sido mais complicado a tarefa de desenvolver este estudo e atingir os padrões de qualidade expectados.

Agradeço ao Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias e Eng.º Santos Carlos meus orientadores, pela partilha dos seus conhecimentos e o apoio sempre disponibilizado, que se constituiu fundamental, tendo contribuído para o meu crescimento profissional.

Agradeço a toda a equipa do departamento AMT (Aparelhagem de Média e Alta Tensão) que em muito contribuíram para o sucesso deste estudo, dando o seu contributo ao nível de transmissão de experiências, de conhecimentos, boas práticas e facilitação da minha integração no ambiente e organização do grupo.

Agradecemos a todos os professores e pessoas que nos marcaram ao longo deste percurso académico.

Agradeço ao meu colega Eng.º Fábio Emanuel dos Santos Nogueira, pelo constante apoio e amizade durante todo o curso, e que dure por longos anos.

Por fim não podemos de deixar de agradecer aos familiares, amigos e colegas que ao longo do curso serviram de inspiração e incentivo á conclusão desta etapa.

Votos de muitos sucessos e de boa sorte para todos!

Estou grato pelas competências e pelo profissionalismo que adquiri.

Resumo

Este relatório traduz o trabalho realizado durante dois anos na Área de Alta e Média Tensão, da Efacec Energia - Unidade de Aparelhagem de Alta e Média Tensão, no âmbito da unidade curricular Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Começa-se por efetuar uma introdução e explicar os objetivos propostos para o estudo aplicado. Após o enquadramento teórico, aborda-se de forma efetiva o trabalho realizado na empresa. Na primeira fase deste projeto consistiu em entender o processo de montagem dos vários equipamentos, assim como verificar quais os problemas associados ao mesmo - foram elaborados vários diagramas e análises respetivas.

Seguidamente é descrito o trabalho realizado no departamento em relação ao produto da Área da Alta e Média Tensão Fluofix GC (celas compactas e modulares de isolamento em SF₆), nomeadamente as estratégias e equipamentos utilizados para calcular a fiabilidade do produto, como a metodologia RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), FMECA (*Failure Mode, Effects and Critical Analysis*), FTA (*Fault Tree Analysis*).

Apresenta-se por fim uma discussão acerca da importância do trabalho realizado, nomeadamente, da relevância de se possuir informação tratada relevante, efetiva e objetiva de modo a assegurar a eficiência dos seus processos de manutenção e de otimização do produto.

Palavras-Chave

Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade, Segurança funcional, qualidade, falha, MTBF, MTTR, RAMS, FMECA, FTA.

Abstract

This document reproduces the work done during the two years in the area of high and medium voltage, Efacec Energy - unit of high and medium voltage, under the Master's course in Electrical Engineering - Electrical Energy Systems, Department of Electrical Engineering (DEE), the Institute of Engineering of Porto.

It begins with an introduction and the main objectives for the practical study followed by a theoretical overview. The first phase of this project was to understand the process of assembling of the various equipment, as well to take notice of what are the problems and their frequency - several corresponding diagrams and the corresponding analysis are presented.

Then in more detail I describe the work done in the department regarding the High and Medium Voltage product FLUOFIX GC (compact and modular cubicles of isolation SF6), namely the strategies and equipment used to calculate the reliability of the product, such as the RAMS methodology, analysis of Failure Mode, Effects and Critical Analysis (FMECA) and the Trees Failures Analysis (FTA) to provide effective data about the reliability of the product, its proper functioning, how one can increase the efficiency of its maintenance processes and product improvement.

Keywords

Reliability, Availability, Maintainability, Functional Safety, Quality, Failure, MTBF, MTTR, RAMS, FMECA, FTA.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....	1
1.2.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	3
1.3.OBJETIVOS.....	4
1.4.CALENDARIZAÇÃO.....	5
1.5.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	5
2. METODOLOGIA RAMS E SEU DESENVOLVIMENTO A NÍVEL INDUSTRIAL.....	7
2.1.VISÃO E ENQUADRAMENTO.....	7
2.2.PROCESSO RAMS.....	11
2.3.FIABILIDADE.....	13
2.4.DISPONIBILIDADE.....	25
2.5.MANUTIBILIDADE.....	26
2.6.SEGURANÇA FUNCIONAL.....	28
2.7.FMECA - ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS, EFEITOS E CRITICIDADE.....	30
2.8.FTA – ÁRVORES DE FALHAS.....	39
2.9.AÇÕES CORRETIVAS E PREVENTIVAS.....	42
2.10.CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	43
3. PRODUTO EM ESTUDO.....	45
3.1.DISTRIBUIÇÃO SECUNDARIA.....	45
3.2.FLUOFIX GC - QUADROS MODULARES / COMPACTOS.....	45
3.3.FLUOFIX GC - MONTAGEM E ENSAIOS.....	48
4. ESTUDO FLUOFIX GC.....	50
4.1.RECOLHA DE DADOS.....	50
4.2.TRATAMENTO DOS DADOS.....	52
4.3.MANUTIBILIDADE.....	57

4.4.CÁLCULO DA FIABILIDADE	59
4.5.DISPONIBILIDADE	69
4.6.SEGURANÇA FUNCIONAL	69
4.7.FMECA.....	72
4.8. FTA	80
4.9.MEDIDAS PROPOSTAS	97
5. CONCLUSÕES.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXO A. TABELA NORMA HN 64-S-40	106
ANEXO B. TABELA NORMA HN 64-S-52	107
ANEXO C. ENSAIO DE FUGAS NO SISTEMA KONTIKAB.....	108
ANEXO D. PROCESSO DE FUNCIONAMENTO KONTIKAB.....	109

Índice de Figuras

Figura 1	Curva da Banheira (Taxa de Falha) [22]	16
Figura 2	Nível ótimo de fiabilidade [22]	17
Figura 3	Função densidade probabilidade com distribuição exponencial [16]	19
Figura 4	Representação de uma associação série dos componentes [21]	20
Figura 5	Dependência da fiabilidade com o número de componentes em série [16]	21
Figura 6	Representação de uma associação paralela de componentes [21]	22
Figura 7	Dependência da fiabilidade - componentes em paralelo [16]	23
Figura 8	Representação gráfica MTBF (dois estados) [17]	24
Figura 9	Representação gráfica MTBF (três estados) [17]	25
Figura 10	Representação gráfica da Manutibilidade do equipamento [22]	27
Figura 11	Estados de segurança [24]	29
Figura 12	Causas potenciais de modos de falhas [24]	30
Figura 13	Exemplo – Construção FTA [24]	41
Figura 14	Fluofix GC – Celas modulares e compactas [25]	46
Figura 15	Fluxograma Operacional do Fluofix GC [25]	49
Figura 16	Quantidade instalada de Fluofix GC	54
Figura 17	Fiabilidade vs Tempo – Falhas elétricas no circuito principal	60
Figura 18	Fiabilidade vs Tempo – Falhas elétricas no circuito de controlo auxiliar	61

Figura 19	Fiabilidade vs Tempo – Falhas do mecanismo de operação	62
Figura 20	Fiabilidade vs Tempo – Falhas tipo fuga no sistema SF6	63
Figura 21	Fiabilidade vs Tempo – Falha no indicador de presença de tensão	64
Figura 22	Fiabilidade vs Tempo – Falha na presença de média tensão	65
Figura 23	Fiabilidade vs Tempo – Fluofix 36kV	66
Figura 24	Falhas que podem provocar arco interno (indisponibilidade total)	80
Figura 25	Falhas que podem provocar uma indisponibilidade parcial	81
Figura 26	FTA – Interruptor ISFG	84
Figura 27	FTA – Disjuntor M.T.	85
Figura 28	FTA – Motor/bobinas (Disjuntor M.T.)	86
Figura 29	FTA – Comando/ampola (Disjuntor M.T.)	87
Figura 30	FTA – Isolador Condensador	88
Figura 31	FTA – Indicadores de tensão (nos cabos MT)	89
Figura 32	FTA – <i>Bushings</i>	90
Figura 33	FTA – Encravamentos Mecânicos	91
Figura 34	FTA – Termostato	92
Figura 35	FTA – Resistência de Aquecimento	92
Figura 36	FTA – Disjuntores B.T.	93
Figura 37	FTA – Transformadores de corrente (TI)	94
Figura 38	FTA – Transformadores de tensão (TT)	95
Figura 39	FTA – Fusíveis	96

Índice de Tabelas

Tabela 1	Formulário de manutenção preventiva [23]	27
Tabela 2	Formulário de manutenção corretiva [23]	28
Tabela 3	FMECA para sistemas ferroviários [25]	32
Tabela 4	FMECA para sistemas espaciais [25]	32
Tabela 5	FMEA no formato <i>Automotive Industry Action Group</i> [26]	33
Tabela 6	Descrição das tabelas FMECA	35
Tabela 7	Classificação da Probabilidade de Ocorrência	36
Tabela 8	Classificação do Nível de Severidade	36
Tabela 9	Classificação do Nível de Detecção	37
Tabela 10	Características do equipamento Fluofix GC [25]	47
Tabela 11	Identificação da avaria, tempo de funcionamento (tabela tipo)	53
Tabela 12	Falhas conforme a norma HN64-S-52 [2]	54
Tabela 13	Tempo de funcionamento (tabela tipo)	56
Tabela 14	Tempo de bom funcionamento (tabela tipo)	56
Tabela 15	Cálculo da MTTR para Fluofix GC	58
Tabela 16	MTBF, Taxa de avaria dos modos de Avaria – Fluofix 36kV	67
Tabela 17	MTBF, Taxa de Avaria e Fiabilidade para o produto – Fluofix GC	68
Tabela 18	Requisitos de atuação em caso de emergência [25]	70
Tabela 19	Estrutura funcional – Fluofix GC	72

Siglas e Acrónimos

A.I.A.A.	–	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
A.S.M.E.	–	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
A.S.Q.C.	–	<i>American Society for Quality Control</i>
<i>AFIT</i>	–	<i>Air Force Institute of Technology</i>
AFL	–	Classes de acessibilidade
AFNOR	–	Associação Francesa de Normalização
AMETA	–	<i>Army Management Engineering and Training Activity</i>
AMT	–	Aparelhagem de Alta e Média Tensão
BT	–	Baixa Tensão
CENELEC	–	Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica
DEE	–	Departamento de Engenharia Eletrotécnica
E/E/PE	–	<i>Electrical/electronic/ programmable electronic</i>
EUC	–	<i>Equipment under control</i>
FMECA	–	<i>Failure Mode, Effects and Critical Analysis</i>
FNC	–	Ficha não conformidade
FTA	–	<i>Fault Tree Analysis</i>
I.E.E.E.	–	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
I.E.S.	–	<i>Illuminating Engineering Society</i>
ID	–	Investigação e Desenvolvimento
IQ	–	Inovação e Qualidade

ISFG	–	Interruptor Seccionador rotativo de três posições, duplo corte, com isolamento interno / externo em SF6
LRU	–	<i>Last Replaceable Unit</i>
MDT	–	<i>Mean Down Time</i>
MT	–	Média Tensão
MTBF	–	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	–	<i>Mean Time To Failure</i>
MTTR	–	<i>Mean Time to Repair</i>
MUT	–	<i>Mean Up Time</i>
NASA	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
RAM	–	<i>Reliability, Availability and Maintainability</i>
RAMS	–	<i>Reliability, Availability, Maintainability and Safety</i>
RBD	–	<i>Reliability Block Diagram</i>
RMU	–	Celas isoladas a Gás
S.A.E.	–	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SF	–	Seccionador rotativo de três posições, duplo corte, com isolamento em SF6
SF6	–	Hexafluoreto de Enxofre é um composto químico inorgânico dos elementos químicos enxofre
TBF	–	Tempo de Bom Funcionamento
TDT	–	<i>Total Down Time</i>
TI	–	Transformadores de corrente
TT	–	Transformadores de tensão
UN	–	Unidade Negócio

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Até à data, o progresso tecnológico pode ser caracterizado pelo desenvolvimento e exploração de produtos que cada vez mais se assumem como sistemas complexos.

Fruto da evolução referida, atualmente, como fator de competitividade crucial, está a minimização dos custos da não qualidade, que está naturalmente associada à eficiência dos processos de uma empresa e dos seus produtos, no seu fabrico e claramente na sua exploração.

Naturalmente, na área dos equipamentos de proteção em Alta e Média Tensão (AMT), a importância da fiabilidade dos produtos é crítica para o sucesso do mesmo e da empresa. Como tal, é preciso adaptar metodologias de registo dos dados dos equipamentos em funcionamento, para cálculo de medidas de fiabilidade para comparação com as normas internacionais, as metas internas e claro está para perceber o que pode ser melhorado.

De facto, a fiabilidade é uma das propriedades importantes destes sistemas. O estudo da fiabilidade é muito importante para qualquer empresa que pretende ter sucesso no ambiente altamente competitivo e tecnologicamente complexo de hoje, e é "essencial" que saiba o nível de fiabilidade do seu produto e seja capaz de controlá-lo. E isso significa algo muito

importante para o cliente final pois desta permite-lhe reduzir custos de inoperação e manutenção do sistema. Cada vez mais o cliente tem em conta os custos de exploração além dos de aquisição, já que os custos da primeira parcela podem ser bastante superiores, em caso de frequência e duração de avarias. Portanto, além das normas internacionais visarem proteger os clientes em relação à qualidade dos equipamentos, o cliente pode e deve sempre requisitar a documentação à empresa fornecedora, de forma a avaliar o histórico do produto.

Note-se que o valor de um dos indicadores de fiabilidade não está apenas relacionado com a qualidade dos componentes, mas também com a quantidade de equipamentos vendidos.

Fatores mecânicos, elétricos e ambientais são uma parcela significativa na garantia do correto funcionamento dos equipamentos de proteção em Alta e Média Tensão – estes fatores podem levar a que se exceda os valores especificados pelas normas e projeto levando à necessidade a interrupção do funcionamento e afetando sua fiabilidade. Por isso, na fase de projeto é necessária a realização de ensaios virtuais, que visam principalmente reduzir o número total dos testes "reais" na fase de produção, minorando os custos financeiros e os recursos de tempo sobre o refinamento de produtos novos ou protótipos. A simulação computacional dos processos mecânicos ou elétricos requer a consideração mútua de vários fatores: a complexidade da estrutura geométrica, a disponibilidade de instruções operacionais, variedade de tipos de efeitos mecânicos, propriedades físicas não-linear de estruturas materiais, aplicações simultâneas para o *hardware* de dois ou mais tipos de aplicações.

Através do conhecimento do comportamento das falhas é possível escolher o tipo de manutenção (corretiva, preventiva ou preditiva) mais adequado a cada tipo de falha. Na maioria dos casos, é desejável atuar antes que a falha ocorra, pois, o custo de uma falha durante a operação do equipamento é muito maior do que o custo para substituição antecipada do componente.

Para estudo de fiabilidade dos equipamentos de proteção em Alta e Média Tensão estão envolvidos vários profissionais dos diversos departamentos tais como: desenvolvimento, projeto, engenharia, montagem, ensaios, expedição, assistência pós-venda, etc. Estes profissionais contribuem com a teoria e a prática para o cálculo da fiabilidade. Não existem métodos e modelos apropriados para cálculo de fiabilidade dos equipamentos de proteção.

Podemos concluir a crescente relevância da modelagem de processos mecânicos e tarefas de construção, tendo em conta os fatores externos para obter resultados mais fiáveis.

Esta dissertação aborda conteúdos referentes à aplicação de metodologias RAMS¹ - combinação de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança de funcionamento - [18] a um produto de Alta e Média Tensão da empresa Efacec Energia: Fluofix GC (celas compactas e modulares de isolamento em SF6).

Com o presente estudo pretende-se mostrar que a adoção de novas metodologias tendencialmente reduzirá os custos produtivos e operacionais e aumentará a capacidade de produção e gerará valor acrescentado com a disponibilização de informação útil relativa ao desempenho de componentes, equipamentos e processos.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este documento traduz o trabalho realizado durante dois anos em que foi desenvolvido o estudo na Efacec Energia - Unidade de Aparelhagem de Alta e Média Tensão, no âmbito da Unidade Curricular de DSEE – Dissertação do 2º ano da Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O trabalho na íntegra foi acompanhado na empresa pelo Eng.º Santos Carlos, sendo no ISEP o trabalho acompanhado pelo Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias.

Identificou-se assim, por motivos profissionais, a necessidade e possibilidade de realização de um trabalho específico sobre a análise da fiabilidade de aparelhos de proteção em MT.

¹ Em português: FDMS, menos usual, por isso ao longo do trabalho será utilizado mais o termo RAMS no lugar de FDMS.

1.3. OBJETIVOS

O trabalho realizado teve como primeiro objetivo a garantia do bom funcionamento das unidades de Fluofix GC em instalações industriais bem como assegurar a eficiência dos seus processos de manutenção e identificação de necessidades de melhoria através da obtenção de indicadores efetivos acerca do comportamento do produto.

De uma forma mais detalhada, enumeram-se os seguintes objetivos, que incluem a análise e desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- Análise regulamentar e normativa relativa à fiabilidade dos equipamentos de proteção em MT;
- Recolha de dados através dos livros de avarias da empresa;
- Identificar e classificar os modos de falha e os seus efeitos;
- Cálculo dos parâmetros:
 - MTBF (*Mean Time Between Failure* ou, traduzindo, Tempo Médio Entre Falhas);
 - MTTR (*Mean Time To Repair* ou, traduzindo, Tempo Médio de Reparação);
 - Fiabilidade do sistema (equipamento) - Rs;
 - A FMECA (*Failure Mode, Effects and Critical Analysis* ou, traduzindo, Modo de falha, Efeitos e Análise de Criticidade).
- Definir o processo, requisitos, ações, competências, entre outros itens para uma eficaz gestão RAMS;
- A criação e desenvolvimento de uma Base de Dados para compilar o histórico de ocorrências de cada componente identificado;
- Elaborar modelos quantitativos que permitam prever os impactos de ações (manutenção e produção) em sistemas com uma taxa de falhas crescente.

Apos uma descrição e análise teórica devidamente aprofundada aos diversos temas, surge o estudo de um exemplo prático de aplicação.

Assim, torna-se possível desenvolver medidas e ações que visem corrigir ou eliminar as falhas detetadas (através da implementação de ações preventivas ou corretivas) e a integração na empresa para o conhecimento da filosofia e dinâmica de trabalho;

1.4. CALENDARIZAÇÃO

Sendo a análise da fiabilidade dos aparelhos de proteção em Alta e Média Tensão a motivação deste trabalho, a sua prossecução conduziu à uma calendarização dividida em dois momentos principais.

O primeiro a investigação, pesquisa e estudo da problemática o qual envolveu a maior percentagem do tempo dedicado ao tema desenvolvendo-se ao longo de 18 meses. Esta inclui um conjunto de tarefas, como por exemplo: formação, estudo das diversas normas [1][2][3][4][6][7][8][10][11][12][13][14][15][16] e [18] que são mencionadas nas referências documentais, observação do processo de montagem, de ensaios, recolha dos dados, análise desses dados, cálculos, construção das diagramas (FTA), elaboração das tabelas (FMECA) e apresentar medidas de melhoria dos processos ou tarefas.

O segundo representa a integração dos dados resultantes das diferentes pesquisas do primeiro momento, comparação com os métodos analíticos anteriormente pesquisados, o desenvolvimento do relatório final, que se desenvolveu ao longo de seis meses.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O trabalho está organizado da seguinte forma:

- No capítulo 1 é feita um pequeno enquadramento teórico, introdução e descrição do trabalho abordado. Apresenta-se ainda os objetivos a cumprir, a calendarização e a entidade que permitiu a realização do estudo;
- O capítulo 2 introduz e explicita o conceito RAMS (acrónimo de *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*) que consiste na aplicação de um conjunto de conceitos de engenharia, métodos, ferramentas e técnicas estabelecidas ao longo do ciclo de vida do sistema. Introduce e explicita o conceito FMECA (acrónimo de *Failure Mode, Effects and Critical Analysis*) que é um procedimento para analisar cada modo de falha no sistema/equipamento para determinar os resultados ou efeitos no sistema/equipamento. Introduce e explicita o conceito FTA (acrónimo de *Fault tree analysis*) que é uma análise para determinar quais os modos de falha do produto, subprodutos ou acontecimentos externos ou combinações destes, que podem resultar num estado de avaria do produto, apresentado em forma de uma representação gráfica arborizada;

- No capítulo 3 está descrito o produto em estudo, características do produto, fluxogramas de produção e ensaios, tipos de ensaios realizados pela parte da produção;
- O capítulo 4 descreve o caso de estudo. Serão apresentados todos os cálculos justificativos, as considerações do projeto considerando aplicação da metodologia RAMS, procedimento FMECA e a análise FTA – encontrando-se a descrição e as equações dos diversos índices de fiabilidade considerados no trabalho. Ainda neste capítulo, para cada equipamento é apresentado o método utilizado, o tipo de distribuição, os cálculos do MTBF e MTTR e a verificação das condições relativamente às normas utilizadas ao longo do estudo, sendo depois apresentadas as propostas de melhoria do processo de montagem e soldadura, como diminuição dos defeitos que vai trazer uma melhoria contínua e diminuição dos custos;
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho onde se inclui uma análise crítica pertinente e complementar à do capítulo anterior, bem como as contribuições para o tema relativo ao FMECA, RAMS e FTA e oportunidades de melhoria e trabalhos futuros;
- As referências bibliográficas e anexos são o último ponto no presente trabalho.

2. METODOLOGIA RAMS E SEU DESENVOLVIMENTO A NÍVEL INDUSTRIAL

2.1. VISÃO E ENQUADRAMENTO

O estudo de fiabilidade e da manutenibilidade, visto como dois dos fatores do RAMS remontam à década de 60 (sessenta), com os primeiros estudos publicados por Dr. Dimitri Kececioglu [24].

Os capítulos fundamentais do desenvolvimento da história da fiabilidade, em concordância, com os outros fatores RAMS – disponibilidade e segurança, são descritos a seguir, de forma resumida:

- A percepção de que a fiabilidade é um fator crítico no ciclo de vida dos equipamentos e componentes, sobretudo quando se avaliava o seu desempenho, surgiu efetivamente durante a segunda guerra mundial [25], nos E.U.A., associada ao deslocamento de equipamento aéreo para os locais longínquos onde decorria o cenário de guerra, onde 60% chegava avariado, à baixíssima fiabilidade do equipamento e peças de reserva em armazém, que se tornava inoperacional antes de

utilização, e ao equipamento eletrônico dos bombardeiros, que dispunha de, no máximo, de 20 horas sem avarias. Paralelamente, Robert Lusser [24], que trabalhou no programa de teste do míssil alemão V-1, na Alemanha, foi o primeiro homem a reconhecer a necessidade de se entender a engenharia de fiabilidade como uma disciplina separada. Após a guerra, Robert Lusser [24] emigrou para os E.U.A. entrando para a divisão de investigação e desenvolvimento do exército americano. Escreveu, entretanto, numerosos artigos sobre a teoria da fiabilidade e a sua aplicação.

- Durante a década de 40, passou a ser dada uma atenção especial às válvulas e a outros componentes eletrónicos pelo exército, força aérea e marinha, de forma a melhorar o seu desempenho, tendo algumas entidades privadas e ligadas ao ensino iniciado a realização de estudos de análise às falhas de válvulas, resistências, condensadores, transformadores, relés, entre outros.
- Em 1950, o Departamento de Defesa americano estabeleceu um grupo Ad Hoc [24] para o estudo da fiabilidade e em 1951 o “*Secretary of Defense*” publicou uma diretiva para todas as agências do Departamento de Defesa no âmbito de aumentarem a ênfase na fiabilidade do equipamento eletrónico militar.
- Em 1952, o grupo Ad Hoc [24] passou a permanente (*AGREE – Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment*). Nesse ano, a engenharia de fiabilidade iniciou o seu desenvolvimento como uma disciplina separada.
- Em 1953, o Dr. R. Carhart da Rand Corporation [23] preparou um inquérito à fiabilidade patrocinado pela USAF Project Rand. Esse estudo baseou-se na revisão dos problemas e na análise do progresso até essa altura. Adicionalmente, apresentou sete fatores que, estimados por si, determinavam a importância militar e económica de um sistema de armamento. Dois desses fatores eram a fiabilidade e a manutibilidade.
- Em 1954 efetuou-se o primeiro Simpósio Nacional em Fiabilidade e Controlo de Qualidade [25], patrocinado pelo I.E.E.E. (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), pela A.S.Q.C. (*American Society for Quality Control*) e pela I.E.S. (*Illuminating Engineering Society*), tendo sido publicados as atas e conclusões deste simpósio.

- Em 1955 o I.E.E.E. criou a Sociedade da Fiabilidade e Controlo de Qualidade [25]. Durante a década de 50 foram publicados diversos artigos sobre fiabilidade e foi publicado o primeiro livro neste âmbito (editado por Keith Henney na McGraw-Hill). A AGREE continuou a sua atividade dando origem a várias normas militares e publicando, em 1957, o seu primeiro relatório sobre fiabilidade.
- Em 1957, a Bell Aircraft Corporation [22], na sua divisão de voos espaciais, editou um dos primeiros livros sobre fiabilidade na indústria aeroespacial. Os principais conteúdos do livro foram posteriormente incorporados num boletim da força aérea, que representou a primeira tentativa do governo para ajudar a indústria a se organizar no sentido da fiabilidade.
- Em 1959, a Força Aérea [25] publicou um documento com um programa para a gestão da fiabilidade, onde, pela primeira vez, foram estipuladas condições mínimas a cumprir pelos seus fornecedores. Um dos aspetos salientes do documento era a exigência dos fornecedores para demonstração da fiabilidade especificada. Paralelamente, passava a ser requerido aos fornecedores a preparação de um plano escrito descrevendo o programa da fiabilidade que este assumia durante o período contratual.
- Em 1960 foi publicado o primeiro livro que combinava a Análise Estatística e a Engenharia de Fiabilidade (D. N. Chorafas) [24] e a U.S. Naval Post-Graduate School, em Monterey, California, tornou-se a primeira instituição a lecionar cursos de Engenharia de Fiabilidade, à qual se juntou a *U.S. Army Management Engineering and Training Activity* (AMETA) em Rock Island, Illinois, em 1961, com cursos de Engenharia de Fiabilidade e Manutibilidade.
- Em 1961 foi publicado o primeiro livro exclusivamente sobre Engenharia de Fiabilidade [24] (Igor Bazovsky) e as forças armadas continuaram a estabelecer uma série de normas no âmbito da fiabilidade.
- Em 1962 o *U.S. Air Force Institute of Technology (AFIT)* em Dayton [25], Ohio, tornou-se a primeira instituição educacional a iniciar um programa de Mestrado em Engenharia de Fiabilidade de Sistemas, para pessoal afeto às forças armadas e ao governo. O A.I.A.A. (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*), a S.A.E. (*Society of Automotive Engineers*) e a A.S.M.E. (*American Society of Mechanical*

Engineers) iniciaram a primeira Conferência Anual de Fiabilidade e Manutibilidade para dar ênfase à fiabilidade mecânica, tendo publicado as atas desta e das conferências seguintes, realizadas anualmente.

- Em 1963, o Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial da Universidade do Arizona [25], em Tucson, passou a lecionar cursos de Engenharia de Fiabilidade, com coordenação do Dr. Dimitri Kececioglu. Nesse mesmo ano, a NASA adotou uma série de linhas orientadoras para serem seguidas pelos fornecedores, de forma a assegurar a fiabilidade dos equipamentos dos sistemas espaciais, incluindo os níveis de fiabilidade dos componentes a serem utilizados, os testes a serem realizados e a apresentação de dados de aceitação de testes certificados.
- Em 1966, foi fundada, em Buffalo, Nova Iorque, a Sociedade dos Engenheiros de Fiabilidade [24].
- Em 1969, a Universidade do Arizona iniciou um programa de Mestrado em Engenharia Aeroespacial e Engenharia Mecânica com uma opção em Engenharia de Fiabilidade [24].
- Em 1972, a Conferência Anual de Fiabilidade e Manutibilidade do A.I.A.A., da S.A.E. e da A.S.M.E. fundiu-se com o Simpósio Anual em Fiabilidade [24], surgindo o atual Simpósio Anual em Fiabilidade e Manutibilidade, que assinalou a sua quinquagésima edição em Janeiro de 2004. Até ao fim da década de 80 continuaram a ser estabelecidas normas no âmbito da fiabilidade dos sistemas pelas forças armadas dos E.U.A.

A abreviatura RAMS foi introduzida no conjunto de normas emitidas pelo CENELEC - Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica na segunda metade da década de 90 do século passado e destinava-se ao uso das linhas de caminho-de-ferro.

Relativamente à análise de fiabilidade nas celas de proteção em Media e Alta Tensão a norma IEC 62271-200 [7], embora prevê este tipo de análise, não especifica qualquer tipo de requisitos ou metodologias a observar no respetivo análise.

Apenas existem as normas francesas como NH 64-S-40 [1] e NH 64-S-52 [2] que identificam as características, funções, classificação dos defeitos e os limites de tempo mínimo que uma

cela deve funcionar. As respetivas normas não definem os procedimentos a aplicar pois estes devem ser desenvolvidos para cada tipo de produto em particular.

Em termos de perspetiva futura, prevê-se que as empresas industriais que queiram sobreviver no mercado global terão de aprender a conceber, projetar, fabricar, testar, embalar e distribuir ao utilizador produtos que desempenhem a sua fiabilidade projetada para funcionamento, que sejam fáceis de manter (elevada manutibilidade) ou que não necessitem de manutenção para a sua vida projetada, que sejam seguros na sua operação e utilização e que sejam de elevada qualidade.

2.2. PROCESSO RAMS

RAMS como já referido é o acrónimo de *Reliability Availability Maintainability Safety* (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade, Segurança) [18] que consiste na aplicação de um conjunto de conceitos de engenharia, métodos, ferramentas e técnicas estabelecidas ao longo do ciclo de vida do sistema. O objetivo final é a maximização da produtividade e do lucro e a redução de riscos de avaria e acidente bem como dos custos.

O RAMS pode ser caracterizado como um indicador qualitativo e quantitativo do grau de fiabilidade em que o sistema, ou os subsistemas e componentes que o integram, possam funcionar como requerido, estando ao mesmo tempo disponível e seguro [6]. A implementação do RAMS deve ser efetuada nas primeiras fases do projeto, pois esta pode conduzir a grandes mudanças e mesmo em alguns casos a uma completa reestruturação dos sectores da empresa.

O RAMS pode ser aplicado tanto em novas unidades fabris, bem como noutras já integradas em sistemas existentes. Além disso permite ainda identificar equipamentos e respetivos componentes críticos, permitindo seleccionar as tarefas de manutenção e a sua frequência [3][10].

Esta aplicação pressupõe a realização dos seguintes documentos como:

- Livro de registo de situações potencialmente perigosas;
- Cadernos de segurança;

- Plano de segurança e *dossier* de segurança geral;
- Manual de segurança;
- Plano de instalação;
- Programa RAM:
 - ✓ Análise funcional;
 - ✓ Análise FMECA;
 - ✓ Análise MTTR;
 - ✓ Análise MTBF;
 - ✓ Atividades na fase de construção, monitorização da garantia;
 - ✓ Análise FTA;
- Plano de validação e plano de comissionamento.

Segundo Luís Andrade Ferreira [21], “Para um desenvolvimento correto de um Projeto RAMS é necessário:

- Definir o RAMS em termos de fiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança e as suas intenções;
- Definir um processo, baseado no ciclo de vida do sistema e nas suas tarefas, para a gestão do RAMS;
- Definir como os conflitos entre os elementos RAMS sejam controlados e geridos com eficiência;
- Definir um processo sistemático para especificar os requisitos do RAMS e para demonstrar que estes requisitos são alcançados.
- Definir os objetivos, quantidades, requisitos ou soluções específicas para o RAMS de aplicações particulares;
- Definir o processo de aprovação pelas autoridades responsáveis pela regulamentação da segurança.”

O RAMS é composto por uma série de etapas [19]:

- Primeira etapa é definir o produto (tipo de celas) a analisar e faz-se uma descrição funcional.

- Posteriormente procede-se à decomposição desse produto em equipamentos e componentes e realiza-se o respetivo diagrama funcional.
- Identificam-se, de seguida, as avarias, falhas (número de falhas), tempos medio de funcionamento do equipamento, tempo medio de manutenção de equipamento, defina-se os riscos associados, realiza-se um estudo FMECA e uma matriz de criticidade, define-se uma árvore de falhas e uma árvore de eventos.

Assim torna-se necessário o conhecimento das falhas mais comuns, das consequências para a unidade industrial e da sua frequência média de ocorrência (o que conduz a um tempo de manutenção mais baixo). Estão, portanto, presentes, tanto uma análise qualitativa, como também uma análise quantitativa, relacionada com os custos de ter um equipamento avariado (tanto na reparação do mesmo como na perda de produção causada pela avaria). Estas análises pressupõem um desdobramento do produto em equipamentos e componentes, analisando-se um a um e prevendo qual o mais provável de falhar, podendo ter assim armazenadas mais dessas peças.

Outro fator que nos faz abordar este tema é também o facto de que hoje em dia existe a necessidade de se ter em conta cada vez mais as questões de natureza estratégica, como sendo, as sociais, de segurança, de ética ambiental, etc., e não só e apenas no lucro gerado por um determinado projeto.

Hoje em dia, são muitos os sectores de atividade que têm integrado condições sobre os fatores RAMS nos contratos com os fornecedores de bens de equipamento, especificando e quantificando os critérios pretendidos.

2.3. FIABILIDADE

A Fiabilidade está relacionada com a probabilidade de que um dispositivo ou componente de um sistema funcione dentro dos parâmetros de qualidade definidos durante um determinado período de tempo, sob as condições de funcionamento pré-estabelecidas [19].

A engenharia de fiabilidade fornece as ferramentas teóricas e práticas em que a probabilidade e a capacidade de peças, componentes, equipamentos, produtos e sistemas para executar as

suas funções requeridas por períodos de tempo desejados sem falhas em ambientes específicos e com uma confiança desejada, possam ser especificados, projetados, testados e demonstrados como discutido nas normas utilizadas [20][19].

A avaliação da fiabilidade baseia-se nos dados referentes aos resultados do produto no campo de desempenho [22]. Os dados produzidos por essas fontes são utilizados para medir com precisão e melhorar a fiabilidade dos produtos que estão sendo produzidos. Isto é particularmente importante no que diz respeito ao mercado - conduzir um impulso constante para a redução de custos. É frequente a tentação de cortar custos e economizar nos custos iniciais através do uso de peças mais baratas ou efetuar ensaios superficiais em vez de ensaios específicos com uma precisão mais concreta. Infelizmente, peças mais baratas geralmente são menos confiáveis e programas de testes inadequados, podem permitir que os produtos com falhas não descobertas entrem no mercado. Uma rápida poupança no curto prazo com o uso de componentes mais baratos ou pequenas amostras de teste normalmente irá resultar em custos mais elevados a longo prazo na forma de custos de garantia ou perda da confiança do cliente. O equilíbrio deve ser atingido entre a Confiabilidade, satisfação do cliente, tempo de mercado, vendas e recursos.

PRINCIPAIS RAZÕES E VANTAGEM PARA ESTUDO DE FIABILIDADE

As principais razões para o estudo de fiabilidade são:

- Para uma empresa ter sucesso no ambiente altamente competitivo e tecnologicamente complexo de hoje, é "essencial" que saiba o nível de fiabilidade do seu produto e seja capaz de controlá-lo, a fim de produzir produtos a um nível de fiabilidade ideal [24];
- A nossa crescente dependência da tecnologia exige que os produtos que compõem as nossas vidas diárias, trabalhem com sucesso durante um período de tempo mínimo – o desejado. Não é aceitável para que um produto trabalhe um tempo de duração mais curto do que a sua missão, mas ao mesmo tempo, não há nenhuma necessidade de criar um produto que vai operar muito para além do seu tempo de vida previsto, uma vez que isto acarretaria custos adicionais ao fabricante;
- Estudo da fiabilidade pode e deve ser aplicado a qualquer produto. Falhas do produto têm efeitos diferentes, que vão desde as que causam perturbações ligeiras e noção de

perda de confiança ou preferência por parte do cliente até as falhas catastróficas envolvendo perda de vidas e bens;

- O exemplo de um controlo remoto para a TV com uma frequência de avaria elevada não tem consequências de vida e morte para o consumidor. No entanto, pode representar um risco de “vida ou morte” para a empresa que o produziu. Pode-se dizer que o consumidor de hoje é mais inteligente do que o consumidor de anos passados, com mais acesso e interesse no acesso a informação e histórico do produto. O consumidor moderno não vai mais tolerar produtos que não executam de forma confiável, ou como prometido ou anunciado. Insatisfação do cliente com a fiabilidade de um produto pode ter consequências financeiras desastrosas para o fabricante. As estatísticas mostram que quando um cliente está satisfeito com um produto, ele pode contar a outras oito pessoas, no entanto, um cliente insatisfeito irá contar a 22 pessoas, em média [24].

As principais vantagens para o estudo de fiabilidade são:

- Obtenção do período de ocorrência da avaria;
- Otimização do período de garantia e custos de garantia previstos;
- Tempo de substituição preventiva ideal para componentes de um sistema reparável;
- Peças requisitos e taxa de produção, resultando um melhor controlo de *stock* através da correta previsão das necessidades de peças de reposição;
- Melhor informação sobre os tipos de falhas por peças ou sistemas para minimizar essas falhas;
- Causas de que as falhas ocorrem e em que momento na vida de um produto e uma melhor preparação para lidar com eles;
- Estudos sobre os efeitos da idade, duração da missão e aplicação;
- A base para a comparação de dois ou mais projetos e escolher o melhor projeto do ponto de vista de fiabilidade;
- Orientação sobre decisões de ações corretivas para minimizar falhas e reduzir os tempos de manutenção e reparação, o que eliminará falhas de *overdesign* bem como de *underdesign* [24];
- Ajudar a fornecer diretrizes para práticas de controlo de qualidade;

- Otimização da meta de fiabilidade que devem ser incorporados em produtos e sistemas para o custo total mínimo de possuir, operar e manter por toda a vida;
- A capacidade de realizar um *trade-off* entre os estudos de parâmetros, tais como fiabilidade, manutenção, disponibilidade, custo, peso, volume, operacionalidade, manutenção e segurança para obter o projeto ótimo [25];
- Redução de custos de garantia ou, pelo mesmo custo, aumento do comprimento e da cobertura de garantia;
- Estabelecimento de diretrizes para avaliação de fornecedores a partir do ponto de vista da fiabilidade do produto;
- Promoção de vendas com base em índices de fiabilidade e métricas através de departamentos de vendas e marketing;
- Aumento da satisfação do cliente e um aumento das vendas como resultado da satisfação do cliente;
- Aumento dos lucros ou para o mesmo lucro, o fornecimento de produtos e sistemas mais fiáveis. Promoção da imagem positiva e reputação da empresa.

CURVA DA BANHEIRA (TAXA DE FALHA) DO PRODUTO

A maioria dos produtos, exibem características de falha como mostrado na curva da banheira representada na Figura 1 [25].

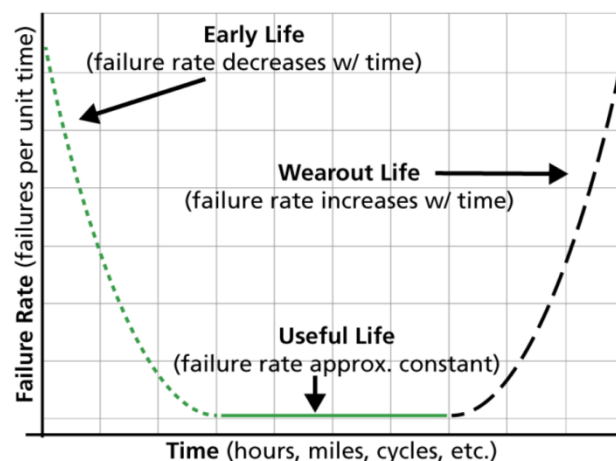


Figura 1 Curva da Banheira (Taxa de Falha) [25]

Esta curva é traçada com a vida útil do produto no eixo x e com a taxa de falhas no eixo y. A vida pode ser em minutos, horas, anos, ciclos, atuações ou qualquer outra unidade

quantificável de tempo ou utilização. A taxa de falha é dada como falhas entre unidades sobreviventes por unidade de tempo. Como pode ser visto a partir do Figura 1, muitos produtos vão começar as suas vidas com a maior taxa de falha (o que pode ser devido a defeitos de fabricação, acabamento pobre, pobre controle de peças recebidas, qualidade, etc.) e exibem uma taxa de falha decrescente. A taxa de falha, então, geralmente estabiliza e permanece constante na região de vida útil, onde as falhas são observadas.

A Figura 2 [25] mostra a fiabilidade do produto no eixo dos x e custo produtor sobre o eixo y.

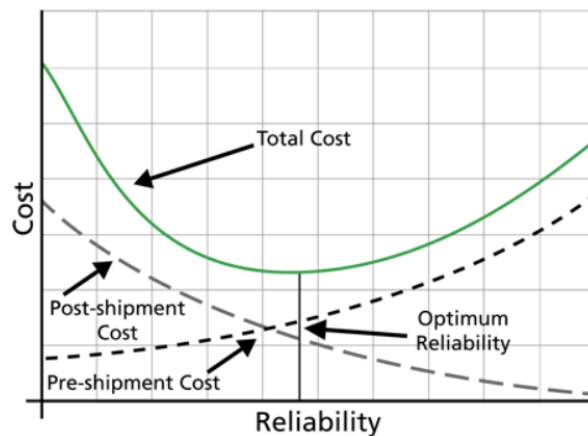


Figura 2 Nível ótimo de fiabilidade [25]

Se o produtor aumentar a fiabilidade do seu produto, ele vai aumentar o custo da produção do produto. No entanto, uma produção de baixo custo do projeto não implica um baixo custo global do produto. O custo global do produto não deve ser calculado como sendo apenas o custo do produto quando ele sai para mercado, mas como o custo total do produto através do seu tempo de vida. Isso inclui garantias e custos de substituição dos produtos defeituosos, os custos incorridos pela perda de clientes devido a produtos defeituosos, perda de vendas e outros motivos que podem aparecer o longo da vida do produto.

Aumentando a fiabilidade pode-se aumentar os custos iniciais, mas diminuir os custos de suporte. Uma otimização de custos pode ser determinada e implementada pelo cálculo da fiabilidade para um produto. A Figura 2 mostra um cenário como esse. O "nível de fiabilidade ótimo" é a que coincide com o mínimo custo total ao longo de todo o tempo de vida do produto.

Análise de dados de vida (análise de tempos de vida a partir de um conjunto significativo de dados) refere-se ao estudo e modelização do tempo de vida dos produtos observados/em estudo.

Dados de vida podem ser tempos de vida de produtos no mercado, como o tempo que o produto opera com sucesso ou o tempo que o produto é utilizado antes de ele falhar. Estes tempos de vida pode ser medido em horas, semanas, anos, ciclos até falha, ciclos de *stress* ou qualquer outra métrica com o qual a vida ou a exposição de um produto que pode ser medido [24]. Todos estes dados de tempos de vida do produto podem ser englobados no termo dados de vida ou, mais especificamente, os dados de vida dos produtos. A análise subsequente prevista e descrita como análise de dados de vida.

Além disso, é absolutamente necessário definir exatamente o que constitui uma falha. Em outras palavras, antes de realizar a análise, deve ser claro, quando é considerado ter ocorrido uma falha no produto. Isto pode parecer um pouco óbvio, mas não é incomum a ocorrência de problemas com as definições de falha ou discrepâncias de unidades de tempo, invalidando completamente os resultados de processos de análise dispendiosos [24].

De uma forma objetiva, assume-se que:

- O funcionamento de um dispositivo é satisfatório se cumpre os requisitos fixados, a cessação deste funcionamento satisfatório denomina-se falha [24].

CONCEITOS MATEMÁTICOS

A fiabilidade, função do tempo, comumente designada por $R(t)$ (do inglês *Reliability*) pode ser apresentada matematicamente sob a forma de uma probabilidade. Podemos desde já concluir que esta está associada com um fenómeno aleatório ou impossível de prever e que quanto mais próximo de 1 for o seu valor, mais fiável é o equipamento em questão e quanto mais perto de zero, mais falhas apresentará o aparelho ao longo do tempo.

Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial de fiabilidade é usada no caso quando o fluxo de falhas é o mais simples [22]. Normalmente, é usada para avaliar a fiabilidade de um único objeto de aplicação, bem como para avaliar a fiabilidade de objetos complexos sem ter em conta as especificidades dos dispositivos individuais no objeto de estudo.

Assume-se que todos os produtos têm uma distribuição exponencial de falhas, e o fluxo de falhas é o mais simples. Em cada tempo subsequente o fluxo de falhas não depende dos acontecimentos em épocas anteriores.

A distribuição exponencial é a distribuição mais usada em estudos de fiabilidade como adiante se poderá comprovar, onde se conclui que a probabilidade de um componente sobreviver até ao instante t , com uma taxa de avarias constante é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Onde:

$R(t)$ – Fiabilidade do componente

t – Tempo de funcionamento

λ – Taxa de avarias (constante)

A Figura 3 mostra graficamente a função $f(t)$:

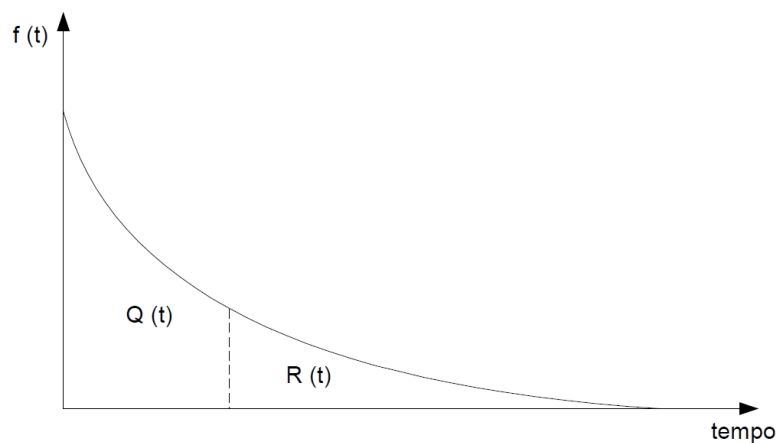


Figura 3 Função densidade probabilidade com distribuição exponencial [19]

A probabilidade de avariar (indisponibilidade) até ao instante t é dado por $Q(t)$, ou seja:

$$Q(t) = \int_0^t \lambda * e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Onde:

$Q(t)$ – Indisponibilidade do componente

A probabilidade de sobreviver até ao instante t é dado por $R(t)$, ou seja:

$$R(t) = \int_0^{\infty} \lambda * e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Logo, se confirma que a fiabilidade mais a indisponibilidade igual a 1:

$$R(t) + Q(t) = 1 \quad (4)$$

A fiabilidade de um sistema, constituído por vários componentes, depende da fiabilidade dos componentes do sistema, da forma de como os componentes estão ligados e da definição das condições de funcionamento do sistema.

É de toda a importância referir que a definição das estruturas resulta não só do tipo de ligação, mas também, das condições de trabalho impostas aos componentes. Desta forma poder-se-á obter um diagrama da fiabilidade diferente da associação real.

Associação série

Neste tipo de associação o critério de sucesso é todos os componentes a funcionar, bastará que um componente esteja avariado para que o sistema fique fora de serviço.

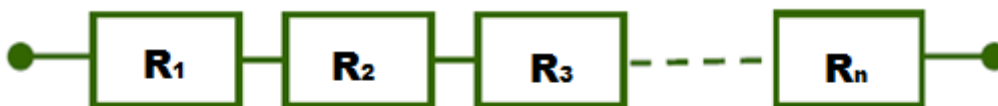


Figura 4 Representação de uma associação série dos componentes [24]

No caso da associação série, e generalizando para n componentes, a fiabilidade do sistema no período de vida útil e os acontecimentos independentes, é dada por:

$$R_s = R_1 * R_2 * R_3 * \dots * R_n = \prod_{i=1}^n R_i = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} \quad (5)$$

A equação (5) é conhecida como Lei do Produto das Fiabilidades.

No caso de os componentes serem iguais a fiabilidade será dada por:

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

Na associação em série é fácil concluir que a fiabilidade do sistema diminui à medida que o número de componentes aumenta uma vez que R_i é sempre menor que 1.

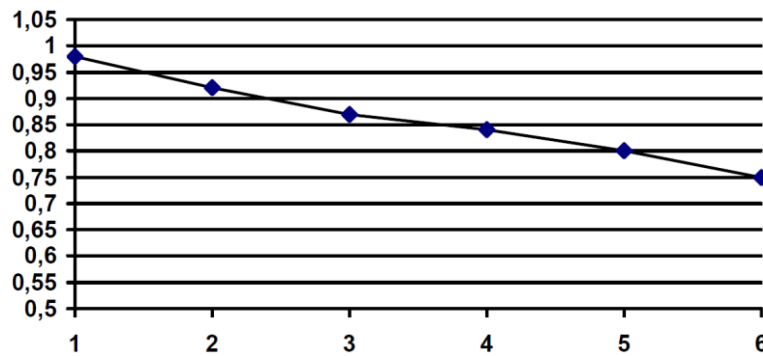


Figura 5 Dependência da fiabilidade com o número de componentes em série [19]

Associação em paralelo ou redundância completa

Neste tipo de associação o critério de sucesso é que pelo menos um componente funcione.

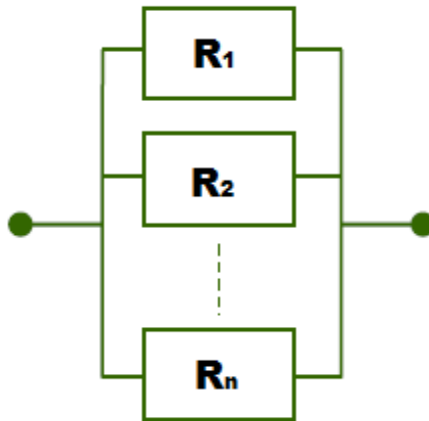


Figura 6 Representação de uma associação paralela de componentes [24]

No caso da associação paralelo a fiabilidade do sistema da Figura 6, no período de vida útil, 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. Generalizando para n componentes ligados em paralelo temos:

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

A equação (8) é conhecida como Lei do Produto das Indisponibilidades.

Por seu lado, a fiabilidade de um sistema com n componentes ligados em paralelo será:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (9)$$

Na associação paralelo é fácil concluir que a fiabilidade do sistema cresce à medida que o número de componentes aumenta.

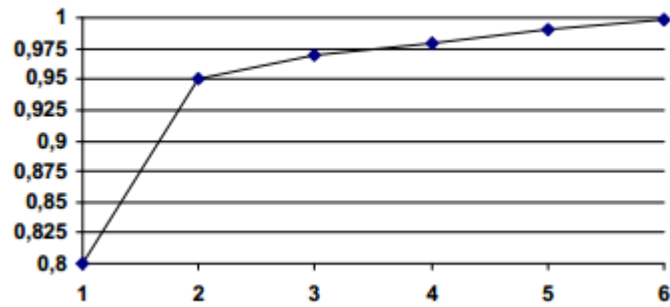


Figura 7 Dependência da fiabilidade - componentes em paralelo [19]

Deste gráfico poder-se-á concluir que a partir de um certo ponto, grandes investimentos conduzem a pequenos aumentos da fiabilidade de um sistema. Terá que haver uma solução de compromisso entre o nível de fiabilidade que se pretende e o investimento para o obter.

MTBF, MTTR e MTTF

De acordo com a bibliografia apresentada [19] definimos os tempos médios de funcionamento – m (MTTF – *Mean Time To Failure*), de avaria ou reparação – r (MTTR - *Mean Time To Repair*) – e o tempo médio entre avarias (MTBF – *Mean Time Between Failure*) ou período. Assim temos:

$$m = MTTF = \frac{\sum_{i=1}^{n_f} t_{fi}}{n_f} \quad (10)$$

$$r = MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} t_{ai}}{n_a} \quad (11)$$

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (12)$$

O tempo médio entre avarias (MTBF) só faz sentido ser definido em sistemas continuamente reparáveis.

Da expressão 12 é fácil determinar a frequência (f) de cada um dos estados que é dada pelo inverso do período, que, por sua vez, é igual á taxa de avarias λ :

$$f = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{MTTF + MTTR} = \lambda \quad (13)$$

Onde:

f - Frequência

λ - Taxa de avarias

Através do conhecimento destes tempos médios poder-se-á construir graficamente a “história” de funcionamento de um componente apresentado na Figura 8.

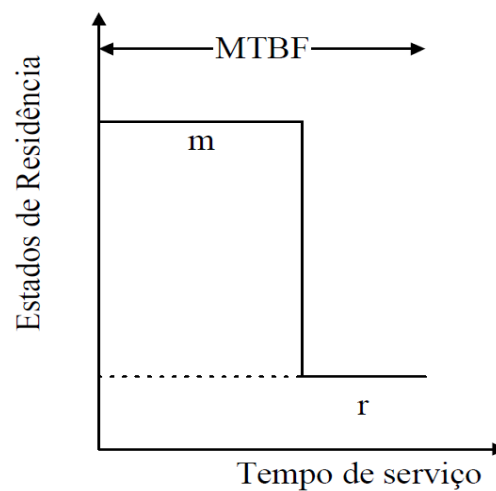


Figura 8 Representação gráfica MTBF (dois estados) [19]

Estas representações são obtidas pelo teste, ou registo de operação, de um grande número de componentes idênticos x horas tornando possível a estimação do MTTF e do MTTR e obter o ciclo médio.

Por último, o funcionamento do sistema com todos os estados disponíveis pode ser apresentados conforme a Figura 9.

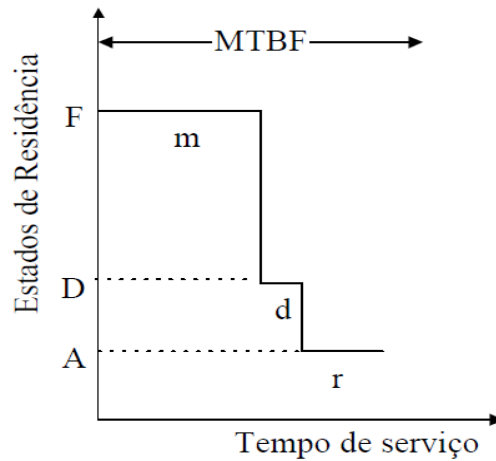


Figura 9 Representação gráfica MTBF (três estados) [19]

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)

2.4. DISPONIBILIDADE

Disponibilidade é a capacidade de uma unidade funcional permanecer em estado de realizar uma determinada função dentro de condições determinadas, num dado instante ou num dado intervalo de tempo, supondo que estão assegurados os necessários meios exteriores [17].

As paragens de um sistema referem-se ao período de indisponibilidade para operação regular desse sistema (dentro das suas especificações de funcionamento) resultante de uma incidência. Existe, assim, uma relação direta entre a fiabilidade e a disponibilidade de um sistema, uma vez que as falhas de um sistema, poderão dar origem a períodos de indisponibilidade.

Em termos algébricos a relação é a seguinte:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (14)$$

Onde:

D – Disponibilidade do sistema

A previsão de disponibilidade tem em conta a fiabilidade prevista e a análise de manutenção corretiva. Esta análise tem em consideração o suporte logístico e a organização operacional das equipas.

O objetivo desta análise é verificar se os valores contratuais, e não só, de disponibilidade do sistema/equipamento são atingidos.

2.5. MANUTIBILIDADE

Manutibilidade é a capacidade de uma unidade funcional, dentro de certas condições de utilização, ser mantida ou reposta num estado que lhe permita desempenhar uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições determinadas, com os procedimentos e os meios prescritos [17].

A manutibilidade é habitualmente medida pelo índice MTTR, ou seja, o tempo médio para reparar. Cada um dos períodos de reparação é medido desde o instante em que a equipa de manutenção inicia a intervenção até à sua conclusão com reposição da funcionalidade regular de sistema.

Através do conhecimento dos dados de funcionamento e reparação do equipamento poder-se-á construir graficamente a manutibilidade do equipamento conforme a Figura 10.

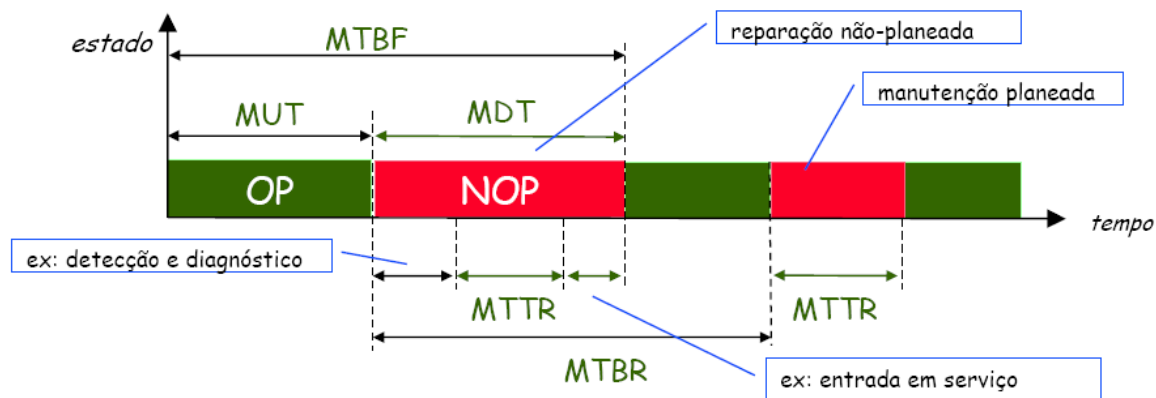


Figura 10 Representação gráfica da Manutibilidade do equipamento [24]

Onde:

MUT (Mean Up Time) - tempo médio em que o sistema está operacional

MDT (Mean Down Time) - tempo médio em que o sistema está não operacional

Análise de manutenção preventiva consiste numa lista de tarefas definidas para serem executadas num sistema ou equipamento, pode incluir:

- Inspeções;
- Verificações funcionais;
- Intervenções periódicas nas peças e respetivas correções e até mesmo a sua substituição.

A tarefa de manutenção preventiva estará baseada num intervalo de tempo regular. Para a análise de manutenção preventiva são fornecidos dados como:

- Intervalo entre atividades;
- Descrição de atividade a executar;
- Tempo, especialidade e número de pessoas precisas para as tarefas;
- Custo de material usado para as tarefas.

A Tabela 1 apresenta um formulário possível para aplicação na manutenção preventiva.

Tabela 1 Formulário de manutenção preventiva [25]

Manutenção Preventiva									
Código RAM	Descrição do item	Tipos de manutenção	Descrição da tarefa	Tempo de Operação (h)	Número de funcionarios	Especialidade	Periodicidade	Ferramentas especiais	Comentários

Análise de manutenção corretiva consiste em ações de manutenção (remoção, substituição, reparação, etc.), e na definição de ferramentas, equipamentos de teste, e do tempo gasto para executar as tarefas.

Para a análise da manutenção corretiva são fornecidos dados como:

- Taxa de avarias
- Tempo médio de reparações
- Número de funcionários para execução da determinada tarefa de manutenção
- Especialidade dos funcionários implicados
- Trabalho a executar para reparar a avaria

A Tabela 2 apresenta um formulário possível para aplicação na manutenção corretiva.

Tabela 2 Formulário de manutenção corretiva [25]

Manutenção Corretiva										
Código RAM	Descrição do item	Modo de Avaria	Descrição da tarefa	Substituível (S/N)	Reparável (S/N)	MTTR	Número de funcionarios	Especialidade	Ferramentas especiais	Comentários

2.6. SEGURANÇA FUNCIONAL

Segurança é a ausência das condições que podem causar a morte, lesão, doença profissional, danos, perdas de equipamentos, bens ou danos ambientais [8].

Parte do *overwall* de segurança relativas à EUC (*equipment under control*) e do sistema de controlo que depende do bom funcionamento do E/E/PE (*electrical/electronic/programmable electronic*), sistemas relacionados com segurança, outras tecnologias de sistemas relacionados com segurança e redução de riscos externos nas instalações [5].

É também, definida como a confiança no funcionamento relativamente à não ocorrência de avarias catastróficas (avarias que colocam em causa a vida humana ou o ambiente).

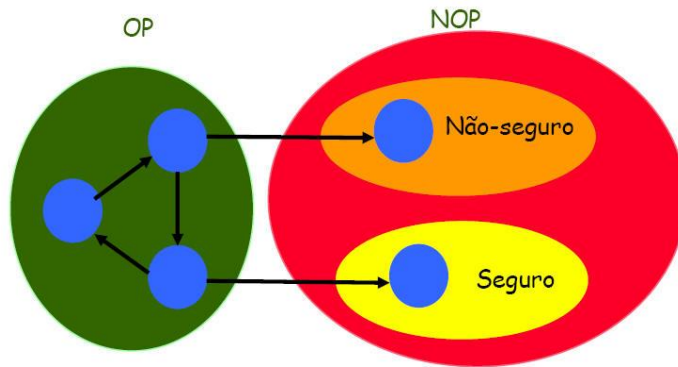


Figura 11 Estados de segurança [24]

Onde:

OP - Sistema está operacional

NOP - Sistema está não operacional

Normalmente, a análise de segurança tem como objetivos:

- Pesquisa, Listagem e Registo de Riscos
 - ✓ Listar e registar os Riscos
 - ✓ Caracterizar as situações de Risco
 - ✓ Documentar o progresso na resolução do risco associado às diversas situações
- Análise de Riscos
 - ✓ Avaliação das situações de Risco
 - ✓ Identificar as áreas críticas em termos de segurança
 - ✓ Determinar os critérios de segurança a adotar no projeto
- Análise de Riscos de Operação e Manutenção
 - ✓ Identificar situações de risco durante atividades de operação e manutenção
 - ✓ Indicar possíveis ações corretivas
- Avaliação das situações de Risco
 - ✓ Avaliação das atividades de segurança, definir o seu *status*, progresso e resultados atingidos
 - ✓ Identificar as áreas críticas em termos de segurança
- Sub-relatório de Segurança
 - ✓ Resumir as atividades de segurança

2.7. FMECA - ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS, EFEITOS E CRITICIDADE

A FMECA é um procedimento para analisar cada modo de falha potencial no sistema/equipamento para determinar os resultados ou efeitos no sistema/equipamento. A análise é estendida para classificar cada modo de falha potencial de acordo com a sua severidade e probabilidade de ocorrência [8].

O FMECA pode ser usado para analisar qualquer sistema, subsistema, componente ou processo. Durante as fases iniciais de concepção, a análise de falhas potenciais estará a um nível elevado cobrindo um âmbito largo (todo o sistema). O FMECA deverá sempre ser executada por equipa de engenharia multidisciplinar.

Causas potenciais de modos de falha do produto ou processo esta apresentada na Figura 12.

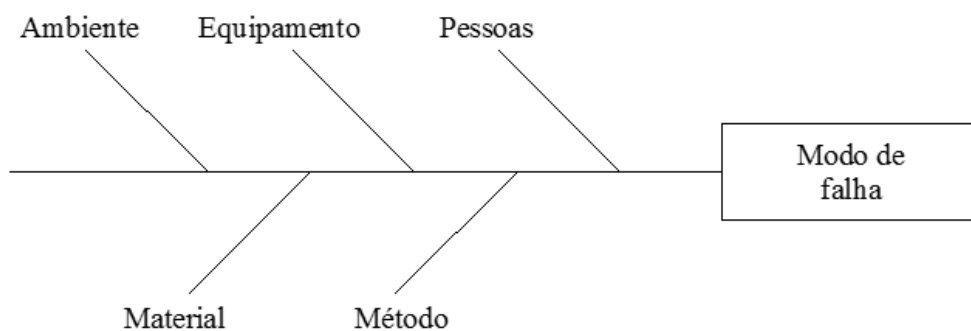


Figura 12 Causas potenciais de modos de falhas [24]

Trata-se de uma técnica utilizada na análise da condição de falhas, tendo por objetivo a análise mais detalhada possível de falhas dos componentes e estabelecer os seus efeitos e sua criticidade.

Este método põe ênfase na identificação das causas das falhas e na correção para melhoria da fiabilidade. Tratando-se de uma ferramenta que é parte integrante do processo de concepção, mas também muito útil nas restantes fases do ciclo de vida de um equipamento, esta deve ser atualizado regularmente de forma a refletir as evoluções e ou mudanças no produto. Este processo revela-nos informações que podem minimizar os riscos, definindo testes específicos, pontos de inspeção da qualidade, ações de manutenção preventiva, etc.

A FMECA determina dados para:

- Melhoria do equipamento/subsistema;
- Análise da segurança do equipamento / subsistema;
- Análise de disponibilidade;
- Análise da manutenção preventiva;
- Análise da manutenção corretiva.

O processo poderá ter duas abordagens:

- Desempenho de um modo de avaria e análise de seus efeitos (FMEA)
- Desempenho da análise de criticidade

Em função da exigência do cliente, os *templates* não são *standards* rígidos, contudo andam à volta dos seguintes parâmetros: modo de avaria, causa da avaria, modo de deteção, efeitos de falha (locais, e nível superior).

Nos sistemas ferroviários para análise FMECA é muito habitual a utilização do *template* apresentado na Tabela 3.

Nos sistemas espaciais (ESA - Agência Espacial Europeia) para análise FMECA é muito habitual a utilização de dois *templates*, o *standard* e um outro de acordo com a norma ABU-JPT-SP-0394, como demonstrado na Tabela 4.

A Tabela 5 mostra um FMEA de Processo amostra no formato *Automotive Industry Action Group (AIAG) FMEA-4*.

Tabela 3 FMECA para sistemas ferroviários [25]

ANALISE CRITICA DE MODOS DE AVARIA E SEUS EFEITOS (FMECA)														
Projeto:										Emitido em:			Folha:	
Fornecedor:					Diagrama funcional:					Compilado por:			Revisão:	
Unidade:					Subsistema:					Aprovado por:				
Código RAM	Nº	Descrição do item	Modo de Avaria	Causa da avaria	Modo de detecção	Sinal de saída da detecção	Efeito local	Efeito nível superior	Efeito no topo	Código de Severidade	Código de Disponibilidade	Taxa de Avaria	Número de Prioridade de Risco	Notas

Tabela 4 FMECA para sistemas espaciais [25]

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)														
Product:										Prepared by:				
Project / Phase:										Approved by:				
System / Subsystem / Equipment:														
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								

Tabela 5 FMEA no formato Automotive Industry Action Group [26]

**POTENTIAL
FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS
Front Door L.H.**

FMEA Type _____ FMEA Number 1450
 Item 1.1.1 - Front Door L.H. Process Responsibility Body Engineering Page 1 of 1
 Model Year(s)/Vehicle(s) 20XX/Lion 4dr/Wagon Key Date 3/10/2015 Prepared By J. Ford - X6521 - Assy Ops
 Core Team A. Tate Body Engrg, J. Smith - OC, R. James - Production, J. Jones - Maintenance FMEA Date (Orig.) 3/10/2015 (Rev) 3/21/2015

Name / Function Requirements	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	SEVi	Classification	Potential Cause(s) of Failure	OCCi	Current Process Controls (Prevention)	Current Process Controls (Detection)	DETi	RPNi	Recommended Action(s)	Responsibility & Planned Completion Date	Action Results				
													Actions Taken & Actual Completion Date	SEVr	OCCr	DETr	RPNr
1.1.1 - Front Door L.H.																	
Op. 70 Manual application of wax inside door/ cover inner door, lower surfaces with wax to specification thickness.	Insufficient wax coverage over specified surface	Allows integrity breach of inner door panel. Corroded interior lower door panels. Deteriorated life of door leading to: - Unsatisfactory appearance due to rust through paint over time - Impaired function of interior door hardware	7		Manually inserted spray head not inserted far enough	8		Visual check each hour - 1/shift for film thickness (depth meter) and coverage.	5	280	Add positive depth stop to sprayer.	Mfg Engrg - 3/10/2003	Stop added, sprayer checked on line.	7	2	5	70
							Spray head clogged- Viscosity too high- Temperature too low- Pressure too low.	5	Test spray pattern at start-up and after idle periods, and preventive maintenance program to clean heads.	5	175	Use Design of Experiments (DOE) on viscosity vs. temperature vs. pressure.	Mfg Engrg - 3/10/2003	Temp and press limits were determined and limit controls have been installed - control charts show process is in control Cpk = 1.85.	1	5	35
		Spray head deformed due to impact	2	Preventive maintenance program to maintain heads.	5	70	Visual check each hour - 1/shift for film thickness (depth meter) and coverage.			2	5	70					

SEVi – severity values; OCCi – occurrence values; DETi – detection values; RPNi – Risk Priority Number;
 SEVr - severity values after the preventive/corrective action; OCCr - occurrence values after the preventive/corrective action;
 DETr - detection values after the preventive/corrective action; RPNr - Risk Priority Number after the preventive/corrective action.

No preenchimento destas tabelas, é usado um sistema de avaliação que caracteriza o nível de ocorrências, o grau de severidade e a probabilidade de detecção.

Para a análise FMECA, existem vários tipos de *software* da Item, dependendo das normas pretendidas e mercados específicos, permitindo exportar em tabelas toda a análise feita ao sistema.

Relembrando que:

- Falha é a extinção/cessação da capacidade de um equipamento executar a função requerida, conforme as especificações [3].
- Modo de falha é maneira da qual o item falha [3].
- Efeito da falha é consequência do modo de falha em termos de operação, função ou *status* do item [3].
- LRU é unidade projetada para ser removida no seu ambiente operacional após uma falha [8].

A análise FMECA do sistema é elaborada a fim de identificar todos os potenciais modos de avarias, respectivas causas e efeitos no nível em análise e as suas repercussões nos níveis superiores.

FMECA é considerado um método para identificar a severidade de potenciais modos de falha e fornecer um *input* para medidas de mitigação para redução do risco. Também inclui uma estimativa da probabilidade de ocorrência dos modos de falha. Este método trata modos de falha individuais e efeitos desses modos de falha no sistema. Cada modo de falha é tratado independentemente.

O conteúdo de cada coluna das tabelas do estudo da análise FMECA do sistema é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 Descrição das tabelas FMECA

Nº Coluna	Campo	Descrição Campo
(1)	Referência	Código de referência da decomposição hierárquica. É uma referência única para o item em análise, expressa por numeração decimal.
(2)	Componente	Descrição do item referenciado em desenhos técnicos / documentos relevantes.
(3)	Função	Uma descrição sucinta da função desempenhada pelo item.
(4)	Modo de Falha	Potenciais modos de avaria do item em análise.
(5)	Potencial Causa	Principais causas prováveis de modos de avaria (se necessário ir até ao nível do componente). No geral, pode ser um processo físico ou químico, defeito do projeto, ou outros processos que são a razão da avaria.
(6)	Efeito local	O efeito da avaria no LRU em análise.
(7)	Efeito no nível topo	O efeito da avaria no nível de topo - sistema.
(8)	Método de deteção	Como o operador ou técnico de manutenção reconhecerá a avaria e identifica a sua causa. Nota: Quer de forma direta, como exemplo sinais discretos (Luminosos, sonoro, ON/OFF, etc.), quer indireta.
(9)	Probabilidade de Ocorrência (PN)	Uma avaliação da probabilidade de ocorrência do modo de falha assumida deve ser feito e um atribuído um PN relevante. A classificação da probabilidade de ocorrência está apresentado na Tabela 7.
(10)	Nível de severidade (SN)	Avaliação da importância do efeito do modo de avaria na operação, de acordo com os níveis definidos na Tabela 8.
(11)	Número de Deteção (DN)	Estimativa da mudança para identificar e eliminar a falha antes que o sistema ou cliente sejam afetados, de acordo com os níveis definidos na Tabela 9.
(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 poderá ajudar a compreender a análise.

Ocorrência é a probabilidade de que uma causa/mecanismo específico irá ocorrer durante a vida do projeto. Prevenir ou controlar uma ou mais causas/mecanismos do modo de falha através de uma mudança de concepção ou *design* é a única maneira para redução da classificação de ocorrência.

Probabilidade da ocorrência (PN) é classificada de "1" a "10" conforme a Tabela 7.

Tabela 7 Classificação da Probabilidade de Ocorrência

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 é uma avaliação da gravidade do efeito do modo da potencial falha acontecer para o próximo componente, subsistema, sistema ou cliente se ele ocorre. A severidade aplica-se somente ao efeito. Uma redução no nível de severidade pode ser efetuada através de uma alteração de *design* que faz com que o modo de falha desapareça.

O nível de severidade (SN) é classificado de "1" a "10" conforme a Tabela 8.

Tabela 8 Classificação do Nível de Severidade

Efeito	Critério: 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 é uma avaliação da capacidade das verificações de projeto e implementar ações corretivas para detetar uma potencial causa ou capacidade das verificações de projeto para detetar o modo de falha subsequente, antes do componente, subsistema, ou sistema é enviado para a produção.

Para conseguirmos uma classificação mais baixa, geralmente as verificações de *design* tem que ser melhorada.

A classificação do nível de deteção também pode influenciar na avaliação da probabilidade de ocorrência.

O nível de deteção (DN) é classificado de "1" a "10" conforme a Tabela 9.

Tabela 9 Classificação do Nível de Detecção

Detecção	Critério: 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
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

O Número de Prioridade de Risco (RPN) é a multiplicação da classificação de probabilidade da ocorrência (PN), do nível de severidade (SN), e do nível de detecção (DN).

$$RPN = PN * SN * DN \quad (15)$$

O número de prioridade de risco é uma medida de risco do projeto. Esse valor pode ser usado para classificar as prioridades dos problemas a serem resolvidos no projeto (por exemplo, em forma de Diagrama de Pareto²).

O Número de Prioridade de Risco será classificado entre "1" e "1000".

Para maiores valores de RPN, a equipa da qualidade deve implementar ações corretivas com fim de diminuir os valores considerados inaceitáveis. Na prática geral, independentemente do resultado do RPN, a atenção especial é dada quando:

- A classificação da severidade é muito alta - ou seja, 9 ou 10;
- A classificação da severidade é da ocorrência é alta;
- RPN acima de 100.

A intenção de qualquer ação recomendada é reduzir a classificação da severidade e da probabilidade de ocorrência. Quando a severidade é da ordem 9 ou 10, a atenção especial deve ser dada para assegurar que o risco é analisado através do controlo do projeto e existentes ações preventivas / corretivas independentemente do RPN. Em todos os casos onde o efeito de um potencial modo de falha identificado pode ser um perigo para o utilizador final, ações preventivas / corretivas devem ser consideradas para eliminar, mitigar ou controlar as causas. Em situações onde temos um RPN superior a 100 e a equipa de verificação não irá ou não consegue detetar as causas deve-se avançar com o processo da revisão do projeto.

Um aumento de ações de validação/verificação do projeto irá resultar numa redução na classificação do nível de detecção. Uma redução na classificação da probabilidade de ocorrência pode ser feita apenas por remover ou controlar uma ou mais das

² O Diagrama de Pareto é uma ferramenta que apresenta um gráfico de barras que permite determinar, por exemplo, as prioridades dos problemas a serem resolvidos, através das frequências das ocorrências.

causas/mecanismos do modo de falha através de uma revisão do projeto ou melhoria do conhecimento fundamental.

Em alguns casos, uma redução da classificação da detecção pode também melhorar a classificação da probabilidade de ocorrência com novos cálculos ou testes realizados.

Somente uma revisão de projeto pode trazer uma redução na classificação de nível de severidade. No nosso caso, as principais ações recomendadas para melhorar o nível de severidade são:

- Revisão do plano dos ensaios a realizar;
- Revisão do projeto, geometria e/ou tolerâncias;
- Especificações dos materiais utilizados.

O principal objetivo das ações recomendadas é para reduzir os riscos e aumentar a satisfação do cliente, melhorando o projeto.

Todas as ações recomendadas devem ter um indivíduo responsável e a data de conclusão. Depois que a ação corretiva ser identificada, deve-se estimar e registrar as classificações de severidade, ocorrência e da detecção resultantes. Calcular e registrar o RPN resultante. Todos os RPN resultantes devem ser registados e analisados. O responsável do projeto é responsável para garantir que todas as ações recomendadas foram implementadas ou adequadamente tratadas.

O FMEA é um documento “vivo” e deve refletir sempre o mais recente nível do projeto, bem como as últimas ações relevantes, incluindo os que ocorrem após o início da produção.

2.8. FTA – ÁRVORES DE FALHAS

Esta metodologia propõe a análise para determinar quais os modos de falha do produto, subprodutos ou acontecimentos externos ou combinações destes, que podem resultar num estado de avaria do produto, apresentado em forma de uma representação gráfica arborizada [18].

Em 1962, o método de análise da árvore de falhas (*fault tree analysis, FTA*) foi utilizado pela primeira vez pela empresa Bell Labs para a Força Aérea dos Estados Unidos, que hoje é amplamente utilizado para a análise das causas de falhas em sistemas estáticos.

Este método é uma parte de uma norma nacional, nomeadamente uma, norma dos Estados Unidos da América, *MIL-HDBK-217 Reliability prediction of electronic equipment*, e também uma norma russa, *Методических указаний по проведению анализа риска опасных производственных объектов №РД 03-418-01*.

As árvores de falha são usadas, nos estudos da fiabilidade e nas avaliações de risco de segurança, para representar graficamente as interações lógicas e probabilidades de ocorrência de falhas de componentes, e outros eventos no sistema.

As árvores de falha usam estruturas em árvore para decompor os níveis de falha no sistema em combinações de eventos de baixo nível, e *Boolean Gates* para modelizar as interações.

Existem dois modelos para análise de falhas: qualitativos e quantitativos.

- A análise qualitativa determina a probabilidade de falha do sistema (evento de topo) baseado na causa de falha única (evento básico) ou causa potencial comum; a combinação de falhas de componentes; a importância da classificação das contribuições para a falha do sistema. Através da análise qualitativa é possível obter expressões lógicas que definem as causas que levam à avaria do sistema.
- A análise quantitativa foca-se na probabilidade do sistema e nos cortes de falha estabelecidos, ou na ocorrência do evento de topo baseado na probabilidade de falha do evento básico. Através da análise qualitativa é possível obter expressões analíticas.

O ponto de partida na construção da FTA é muitas vezes a FMECA e RBD. A FMECA é o primeiro passo para a compreensão do sistema. A seguir é utilizado um modelo matemático baseado em diagrama de blocos para obter os valores da fiabilidade e da disponibilidade. A Figura 13 mostra a construção de um diagrama FTA.

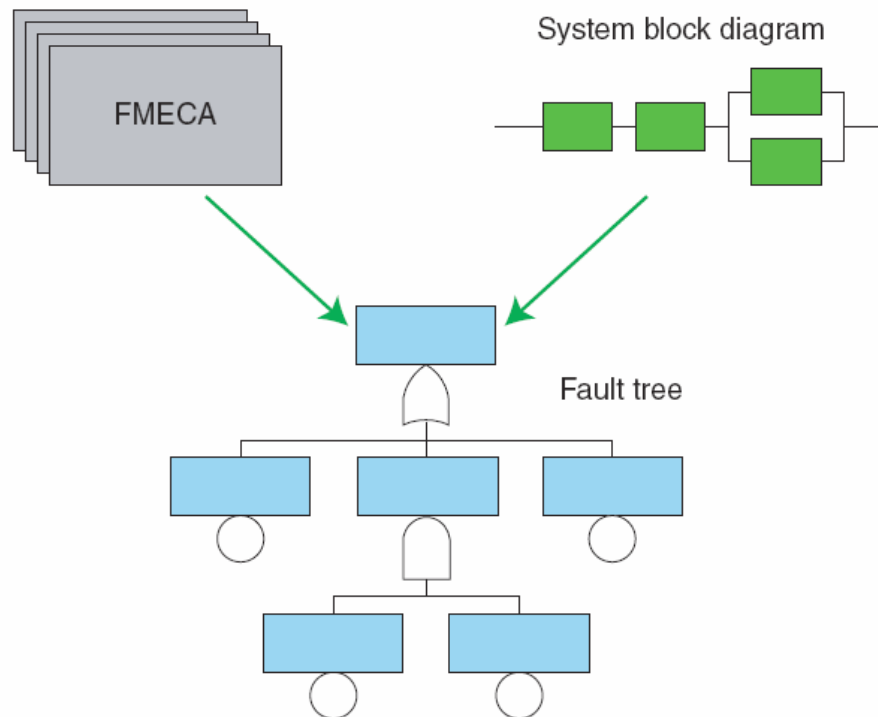


Figura 13 Exemplo – Construção FTA [24]

Os blocos são interligados de forma a representar a estrutura lógica de funcionamento do sistema. O sistema está operacional enquanto existir um percurso, sem interrupções, entre a entrada e a saída.

Neste processo é implementado o método dedutivo (causa-efeito) onde são colocados os mais complexos desafios para encontrar as causas dos eventos para os sistemas estáticos, o resultado é um diagrama claro e detalhado das relações dos elementos da infraestrutura e eventos que afetam sua fiabilidade.

As vantagens do método de análise da árvore de falhas são:

- A análise é focada em encontrar falhas;
- Permite identificar os locais não confiáveis;
- Fornece gráficos e material visual para os profissionais que estão envolvidos na manutenção do sistema;
- É possível a realização de uma análise qualitativa ou quantitativa da fiabilidade do sistema;

- O método permite que os engenheiros de fiabilidade analisem alternadamente certas falhas específicas do sistema;
- Fornece conhecimento sobre o comportamento do sistema e uma visão clara sobre o processo do seu trabalho;
- Dedutivamente ajuda a detetar as falhas;
- Facilita a análise da fiabilidade dos sistemas complexos.

A principal vantagem da árvore de falhas (em comparação com outros métodos) é que a análise está limitada á identificação apenas daqueles elementos do sistema e os eventos que levam à insuficiência ou falha do sistema específico.

As desvantagens do método de análise da árvore de falhas são:

- A implementação do método requer tempo e custos significativos, bem como uma progressão geométrica do número de eventos que influenciam;
- A árvore de falhas é um diagrama de uma lógica booleana, que mostra apenas dois estados de funcionamento ou de falha;
- É difícil de considerar o estado da falha parcial dos elementos, uma vez que a utilização do método define que o sistema está em funcionamento ou em condição de falha;
- Exige uma compreensão total do sistema e uma abordagem específica para cada falha específica;
- Descreve uma árvore de falha do sistema a qualquer momento (geralmente em estado estacionário), e a sequência de eventos pode ser indicada com grande dificuldade, às vezes é impossível. Isto é verdade para sistemas com circuitos de controlo complexos, em tais casos, referem-se geralmente a métodos baseados em processo estocásticos (aleatórios).

2.9. AÇÕES CORRETIVAS E PREVENTIVAS

Estas ações têm como objetivo: evitar a repetição de situações indesejáveis; adotar medidas para identificar e eliminar causas de potenciais situações indesejáveis.

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

As ações definidas podem ser do tipo:

- Ações de reparação, correção ou contenção - plano que corrige de forma imediata o problema detetado ou de outra situação indesejável, sem eliminar as causas ou recorrências.
- Ações corretivas - as ações corretivas que forem consideradas adequadas serão implementadas e os resultados revistos e documentados. A eficácia da ação corretiva será avaliada através da análise posterior da repetibilidade da ocorrência sendo suscetível de discussão nos fóruns adequados.
- Ações preventivas - as situações deverão ser avaliadas pelo detentor do processo em causa para fazer uma avaliação do risco. Caso seja determinado que atendendo às potenciais consequências, dificuldades de deteção ou probabilidades de ocorrência, esta situação deva ser atendida então serão avaliadas e determinadas ações preventivas adequadas e os resultados revistos e documentados.

A definição dos planos de ação pressupõe:

- A identificação de um responsável;
- A atribuição de datas limite para a execução do plano;
- O registo dos custos de não qualidade inerentes (quando aplicável);
- O acompanhamento das ações;
- A análise da respetiva eficácia das ações.

2.10. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo abordamos o aparecimento do conceito RAMS – a história do seu aparecimento e suas implicações na gestão da manutenção. Foram também introduzidos e descritos de forma sucinta os conceitos de fiabilidade, manutibilidade, disponibilidade e segurança.

Foram apresentadas as definições conforme a bibliografia e as normas disponíveis no sistema central da EFACEC.

O procedimento para análise dos potenciais modos de falhas, FMECA, é descrito de forma sucinta, sendo que uma análise mais detalhada pode ser encontrado em bibliografia sobre o tema. Foi detalhado o procedimento FMECA, as etapas da sua realização e o seu interesse no âmbito deste trabalho.

Foi descrito o procedimento FTA para análise e para determinar quais os modos de falha do produto, subprodutos ou acontecimentos externos ou combinações destes.

Todos os procedimentos referidos vão ser aplicados nos casos da análise prática, que vai ser apresentado nos capítulos seguintes.

Com esta abordagem teórica, foi possível criar as condições para a correta utilização destas ferramentas no decorrer do trabalho. Estão apresentados os métodos de cálculo de suporte ao caso prático tratado neste trabalho.

3. PRODUTO EM ESTUDO

3.1. DISTRIBUIÇÃO SECUNDARIA

Para gama de soluções de Distribuição Secundária existem soluções para instalação interior ou exterior, de entre as quais se destacam as celas isoladas a gás (RMU) ou as isoladas a ar com diversas funções disponíveis.

De entre as celas isoladas a gás salienta-se a solução com isolamento integral em SF₆, utilizada em soluções modulares.

O respeito absoluto pelas orientações ambientais está patente nas soluções desenvolvidas em todo o tempo de vida útil dos equipamentos, desde a sua conceção e produção até à sua colocação em funcionamento.

3.2. FLUOFIX GC - QUADROS MODULARES / COMPACTOS

As Fluofix GC designam as celas modulares ou compactas [Figura 14] com isolamento integral em SF₆ para colocação em redes de Média Tensão até 36 kV.

A solução modular é de fácil instalação devido às suas dimensões e peso. A segurança de operação é garantida pelos ensaios realizados em conformidade com as mais exigentes normas bem como pela construção e estanquidade das soluções. Esta solução permite diversas configurações bem como a incorporação de opções variadas conforme exigências do cliente.

Estão disponíveis soluções extensíveis e não extensíveis. A solução compacta pode incorporar até cinco funções numa só cuba de aço inoxidável, com isolamento integral em SF6 à pressão relativa de 0,3 bar (a 20°C).

As celas Fluofix GC caracterizam-se por serem particularmente insensíveis face às condições ambientais mais agressivas, possuem uma longa vida útil e ausência de manutenção das partes ativas proporcionadas pelo isolamento integral em SF6.



Figura 14 Fluofix GC – Celas modulares e compactas [25]

Esta gama de soluções para a Distribuição Secundária tem as seguintes características [25]:

- Quadros compactos ou modulares com isolamento em SF6;
- Equipado com interruptor seccionador de corte em SF6;
- Desenvolvido segundo a norma internacional IEC 62271-200 [7];
- Versão compacta ou modular;
- Vida elétrica e mecânica acrescida classe E3 M2 [7];
- Tanque em inox;
- Categoria de perda de continuidade de serviço LSC 2A segundo CEI 62271-200;
- Classe de separação PI segundo CEI 62271-200;
- Índice de proteção [CEI 60529 e EN50102] IP 67 / IK 09 para compartimento de MT, IP 3XC para compartimento mecanismo de comando e compartimento de cabos;
- A segurança do operador e da instalação é garantida pelo ensaio de arco interno, classes de acessibilidade AFL [7] com duração até 1 s;
- A continuidade de serviço está presente no desenho do equipamento, com várias hipóteses de supervisão do estado;
- A vida útil prevista para este equipamento é de 30 anos.

Tabela 10 Características do equipamento Fluofix GC [25]

Tensão nominal	12kV	17,5kV	24kV	36kV
Nível de isolamento				
à frequência industrial (50Hz-1min)	28kV	38kV	50kV	70kV
ao choque (1,2/50µs)	75kV	95kV	125kV	170kV
Corrente nominal				
Barramento	630A	630A	630A	630A
Chegada / saída	630A	630A	630A	630A
Proteção por fusível	200A	200A	200A	200A
Proteção por disjuntor	630A	630A	630A	630A
Corrente de curto-circuito	16kA (3s) 20kA (1s)	16kA (3s) 20kA (1s)	16kA (3s) 20kA (1s)	16kA (3s) 20kA (1s)
Poder de fecho	40kA 50kA	40kA 50kA	40kA 50kA	40kA 50kA
Frequência	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
Arco interno (IAC A-FL)	Até 20kA 1s	Até 20kA 1s	Até 20kA 1s	Até 20kA 1s
Temperatura ambiente	-25 a 40°C	-25 a 40°C	-25 a 40°C	-25 a 40°C
Pressão de enchimento nominal (a 20 ° C)	0,3 bar rel	0,3 bar rel	0,3 bar rel	0,3 bar rel

3.3. FLUOFIX GC - MONTAGEM E ENSAIOS

O principal objetivo dos ensaios é obter informação válida e confiável acerca da conformidade do produto e do seu desempenho, além da utilizada para o acompanhamento à qualidade do produto, determinando causas para eventuais não conformidades.

Em diversas fases da montagem [Figura 15] são feitos análises e ensaios de rotina como:

- Confirmação da continuidade elétrica em todos os *bushings* e porta-fusíveis;
- Medição da resistência de isolamento, respeitando sequência da ficha de controle [25] de cada tipo de aparelho;
- Ensaio de fugas SF₆ no sistema automático KONTIKAB conforme esta apresentada no Anexo C e Anexo D;
- Ensaio de fugas SF₆ na zona da válvula, utilizando detetor de fugas SF₆;
- Medição de velocidade de disparo (controle dos interruptores ISFG);
- Verificação da conformidade de montagem do equipamento de BT;
- Verificação da correta ligação e execução da cablagem de acordo com o esquema elétrico;
- Verificação do funcionamento mecânico e construtivo;
- Ensaio da motorização, verificação das sinalizações, manobra elétrica e manual.

Na Figura 15 estão apresentados todos os passos da montagem e tipos de ensaios realizados referentes ao equipamento Fluofix GC.

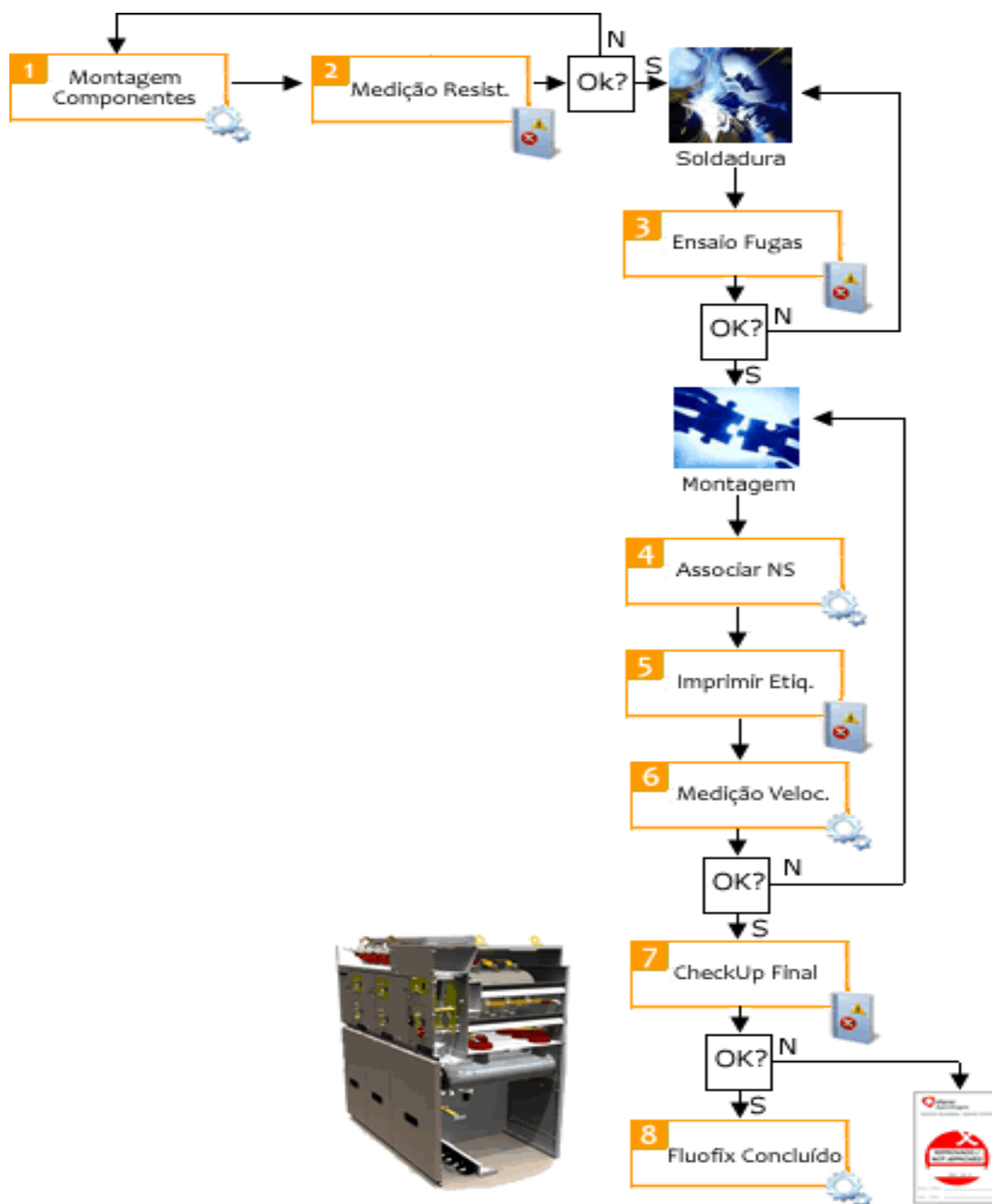


Figura 15 Fluxograma Operacional do Fluofix GC [25]

4. ESTUDO FLUOFIX GC

4.1. RECOLHA DE DADOS

Na realização do cálculo da fiabilidade para este produto/sistema foi utilizada a base de dados de ocorrência do SiGefa [25] e as normas apresentadas na parte teórica deste trabalho.

Para comparação dos dados obtidos vamos utilizar as normas francesas NH 64-S-40 [1] e NH 64-S-52 [2] que identificam as características, funções, classificação dos defeitos e os limites de tempo mínimo que uma cela (produto de estudo) deve funcionar. Estas normas são normalmente utilizadas devido ao facto de serem as mais exigentes e completas, pelo que se garante, aquando da exportação de produtos para uma qualquer parte do mundo, que irá cumprir as especificações ali descritas.

O estudo vai ser desenvolvido conforme os métodos de cálculo apresentados pelo Dr. Polovko, A. M. no livro “*Fundamentals of Reliability Theory. Academic Press*” [23].

A Efacec dispõe de ferramentas informáticas para realização do RAMS:

- Para o cálculo de fiabilidade deste equipamento de proteção em Média e Alta Tensão foi utilizado o *software* da Reliasoft, Weibull ++9 fornecido pela Efacec Energia.

Este módulo pode ser utilizado para realização da fiabilidade e manutibilidade de produto/cartas eletrônicas/sistemas, ou seja, permite efetuar o cálculo do λ e consequentemente do MTBF, assim como do MTTR, através de análise de dados de avarias em campo. Consegue apresentar resultados avaliando qual a melhor distribuição a aplicar dentro das inúmeras distribuições (normal, Weibull, exponencial, chi-quadrado, etc.) aos dados introduzidos.

- Para o cálculo do FMECA foi utilizado o módulo FMECA ITEM *Software*. Este módulo permite definir para os diversos níveis hierárquicos do sistema, dados como avaria, causas de avaria, modo deteção, severidade, criticidade, etc. usa como base a normas: MIL-STD-1629A; IEC 61508 e BS 5760 Parte 5.
- Para o cálculo do FTA foi utilizado o módulo FTA ITEM *Software*. Este módulo efetua a análise de falhas de um sistema numa estrutura em árvore. O FTA é uma técnica que partindo de um evento inicial – avaria ou acidente denominado de “top-raiz” tenta determinar todos os eventos imediatos que lhe podem dar origem. As relações existentes entre os vários eventos são definidas através de portas lógicas – *gates*. Ou seja, parte das consequências até atingir as causas.

Os dados da produção dos equipamentos e a sua industrialização são obtidos pelo sistema de gestão central *Synergynet* [25]. A informação relativa à assistência no cliente é obtida através do departamento de *Servicing*. Esta informação é posteriormente filtrada, separando a informação relativo ao produto (equipamento) em estudo dos outros produtos, separando os vários tipos de assistência dada e tratada através do sistema de gestão central *GlobalTracking* [25].

A informação é obtida e tratada de uma forma sistemática, como descrito no subcapítulo seguinte.

4.2. TRATAMENTO DOS DADOS

Para o estudo apresentado seguidamente, foi efetuado um tratamento de dados onde foram excluídas as seguintes causas de avaria:

- Externa, vandalismo;
- Externa, descarga atmosférica;
- Externa, transporte;
- Externa, oxidação;
- Externa, outra;
- Testes.

Foram analisadas as seguintes causas de avaria, registo a registo, considerando apenas aquelas que eram intrínsecas ao equipamento em análise:

- Falhas elétricas no circuito principal:
 - Descargas parciais na zona do barramento;
 - Arco elétrico entre fases e fase-terra;
 - Disrupção componente em resina;
- Falhas elétricas no circuito de controlo e auxiliar:
 - Parametrização das proteções instaladas;
 - Avaria do motor e circuitos de motorização;
 - Falha de resistências de aquecimento;
 - Falha de transformadores de medida e erros de leitura;
 - Falha de bobinas abertura/fecho ou mínima tensão;
 - Isoladores condensadores.
- Falhas do mecanismo de operação, *padlocks* e *interlocks*:
 - Falha de manobras manuais de fecho/abertura;
 - Falha de manobras elétricas de fecho/abertura;
 - Falha das molas de rearme;
 - Falha do veio da bobina de disparo;
 - Falha no encravamento, fechadura ou cadeado
 - Falha no disparo por fusão de fusível;
 - Manobra do comando.

- Fuga no sistema SF6;
- Falha no indicador de presença de tensão;
- Falha na presença de média tensão ou detetor de ausência.

Os dados obtidos foram registados numa folha de cálculo em Excel que indicam o número de série, data de fabrico, data de avaria, tipo de avaria e número de horas em funcionamento do respetivo equipamento (celas Fluofix GC).

Depois analisa-se as falhas que ocorreram nas celas produzidas nos últimos sete (7) anos, ou seja, desde a entrada em serviço até o final de 2016 (data final considerada para estudo). A Tabela 11, apresentada abaixo, é um “modelo tipo” resultante que nos permite facilmente perceber a forma da separação das falhas e o registo de todas as falhas até à data atual.

Tabela 11 Identificação da avaria, tempo de funcionamento (tabela tipo)

Nº Série EFACEC	Data fabrico	Data avaria	Tipo avaria	Nº horas em funcionamento [horas]
E18300096	28-01-2010	05-04-2012	Fuga no sistema SF6	19152
E18311035	27-11-2010	17-04-2012	Falhas elétricas no circuito principal	12168
E70301145	04-12-2010	14-05-2011	Falhas elétricas no circuito de controlo e auxiliar	3864
E18300801	06-02-2011	18-08-2012	Falhas do mecanismo de operação, <i>padlocks</i> e <i>interlocks</i>	13416
E18600853	15-05-2012	15-12-2013	Falha no indicador de presença de tensão	13896
E11803367	28-03-2013	06-02-2015	Falha na presença de média tensão ou detetor de ausência	16320

Posteriormente estes dados obtidos são utilizados para os cálculos de MTBF. Dependendo do produto (equipamento) em estudo podem existir outros tipos de falhas.

A quantidade de ocorrências verificadas para cada modo de falha conforme a norma HN64-S-52 [2] está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 Falhas conforme a norma HN64-S-52 [2]

Modos de Avaria	Quantidade
Falhas elétricas no circuito principal	2
Falhas elétricas no circuito de controlo auxiliar	3
Falhas do mecanismo de operação, <i>padlocks e interlocks</i>	2
Fuga no sistema de SF6	7
Falha no indicador de presença de tensão	3
Falha na presença de média tensão ou detetor de ausência	3

A Figura 16 ilustra a evolução da quantidade (cumulativa) de equipamentos Fluofix GC instalados.

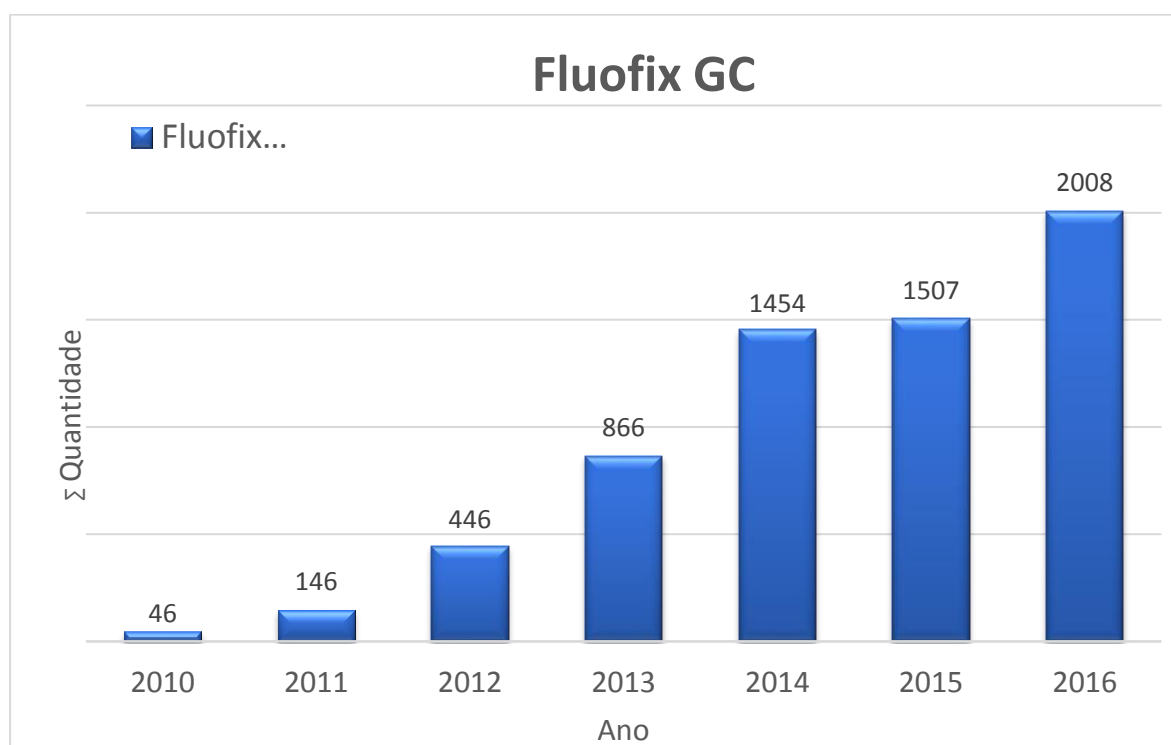


Figura 16 Quantidade instalada de Fluofix GC

Concluimos que as primeiras celas em estudo foram produzidas em janeiro de 2010. O período de avaliação, conforme considerado anteriormente, é até ao final de dezembro de

2016, que corresponde a 7 anos. Ao longo do tempo foram produzidas e instaladas 2008 celas Fluofix GC.

Conforme a bibliografia [20][23][25] recomendada, primeiro transforma-se o comportamento das celas Fluofix GC produzidas ao longo do tempo em estudo num comportamento tipo para uma cela produzida nesse período. Isto corresponde à avaliação de uma cela-tipo durante 7 anos (T_f).

$$T_{f\ 2016} = n^{\circ} \text{ anos} * n^{\circ} \text{ celas instaladas} \quad (16)$$

$$T_f = 7 \text{ (ano)} * 8760 \left(\frac{\text{hora}}{\text{ano}} \right) * 2008 \text{ (cela)} = 123130560 \text{ (hora * cela)} \quad (17)$$

Analisa-se as falhas ocorridas, determinando os tempos de funcionamento correspondentes.

Ex: Tempo correspondente à falha 1 e à falha n:

$$T_1 = T_{AAF} \times Q_{AAF} \quad (18)$$

$$T_n = T_{AAF_n} \times Q_{AAF_n} \quad (19)$$

Onde:

T_{AAF} - Tempo de bom funcionamento da cela até acontecer a falha “1”.

Q_{AAF} - Quantidade de celas instaladas até acontecer a falha “1”.

T_{AAF_n} - Tempo de bom funcionamento da cela até acontecer a falha “n”.

Q_{AAF_n} - Quantidade de celas instaladas até acontecer a falha “n”.

De mesma forma calcula-se para todas as falhas verificadas. A Tabela 13 apresentada abaixo é um “modelo tipo” resultante que nos permite facilmente perceber a forma de cálculo dos tempos de funcionamento de todas as celas que tiveram uma falha.

Tabela 13 Tempo de funcionamento (tabela tipo)

Anomalia	Nº horas em funcionamento [horas]	Celas instaladas a quanto a falha [unidades]	Tempo funcionamento T_i [nº horas]
T1	19152	302	5783904
T2	12168	369	4489992
T3	3864	142	548688
T4	13416	433	5809128
T5	13896	752	10449792
T6	16320	1481	24169920

Quando todas as anomalias estão calculadas, determina-se os TBF's (Tempos de Bom Funcionamento) para cada tipo de defeito, que são os intervalos de tempos entre os vários pontos desde as 0 horas até 123130560 horas (T_f).

Se tudo foi devidamente efetuado, deveremos ter o mesmo número de T's quantas as anomalias verificadas e devemos ter mais um TBF [Tabela 14] do que as anomalias verificadas.

Exemplo:

$$TBF1 = T1 - 0 \quad (20)$$

$$TBF2 = T2 - T1 \quad (21)$$

$$TBFn = T_n - T_{n-1} \quad (22)$$

$$TBFf = T_f - T_n \quad (23)$$

Tabela 14 Tempo de bom funcionamento (tabela tipo)

Tempo de Bom Funcionamento	TBF [horas] Total defeitos
TBF1	5783904
TBF2	1293912
TBF3	3941304
TBF4	5260440
TBF5	4640664
TBF6	13720128
TBF f	55038000

De mesma forma calcula-se os TBF's [Tabela 14] para cada tipo de defeito.

De seguida, os valores de TBF's devem ser tratados. Os TBF's nulos, se existentes, são eliminados. Este tratamento é feito utilizando um *software* para cálculo de fiabilidade, da empresa Reliasoft, Weibull ++7, programa disponibilizado pela Efacec Energia. Este *software* permite ainda calcular a taxa de avarias (λ) correspondente fazendo a aproximação a uma distribuição exponencial assim como os parâmetros de uma distribuição de Weibull.

4.3. MANUTIBILIDADE

Como já abordado, o conceito de Manutibilidade é uma medida básica de manutenção/capacidade/facilidade de manter. A soma dos tempos de manutenção corretiva, em qualquer nível específico de reparação, dividido pelo número total de falhas no interior de um item reparado nesse nível, durante um determinado intervalo indicado sob condições [8].

O MTTR exprime o tempo médio necessário para reparar uma avaria, ou seja, o tempo durante o qual, pelo menos, um funcionário da manutenção executa o trabalho de reparação [19].

Este tempo de reparação agregará, naturalmente:

- O tempo necessário para conseguir diagnosticar a causa da falha;
- O tempo necessário para obter ou fornecer as peças necessárias para realizar a reparação;
- O tempo necessário para obter acesso à parte ou partes da falha;
- O tempo necessário para remover os componentes com falha e substituí-los por novos;
- O tempo envolvido em trazer o sistema de volta ao estado de funcionamento;
- O tempo que leva para verificar que o sistema está a funcionar dentro das especificações;

Para o defeito tipo “Disjuntores MT”, “Sistema de pressão (fugas SF6)” e “Ampola do disjuntor MT” não existe tempo de diagnóstico e tempo de ensaio devido a facto de a cela ser substituída, logo, estes ensaios foram realizados na fase do fabrico.

Refira-se que na área da MT e AT recorre-se bastante, devido aos custos envolvidos da não operabilidade de um sistema, à Manutenção Preventiva – manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com os parâmetros de condição dos equipamentos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem [18].

Admitimos que o tempo médio necessário para reparar uma avaria MTTR e muito pequeno conforme podemos identificar na Tabela 15 em comparação com o tempo de bom funcionamento [Tabela 16] MTBF, logo, este tempo para o cálculo de disponibilidade pode ser desprezado.

4.4. CÁLCULO DA FIABILIDADE

Como os parâmetros da distribuição estão calculados, pode-se gerar gráficos e obter resultados que avaliam as características de vida do produto, tais como a taxa de avarias para cada tipo de falha. Os gráficos são gerados automaticamente pelo programa, selecionando o tipo de distribuição pretendida.

Falhas elétricas no circuito principal

A Figura 17 mostra o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Conforme se pode constatar foram identificadas 2 unidades com falhas elétricas no circuito principal. A taxa de avarias obtida foi de $4,85 * 10^{-8} (h^{-1})$.

A fiabilidade do produto diminui com o tempo de utilização conforme era esperado.

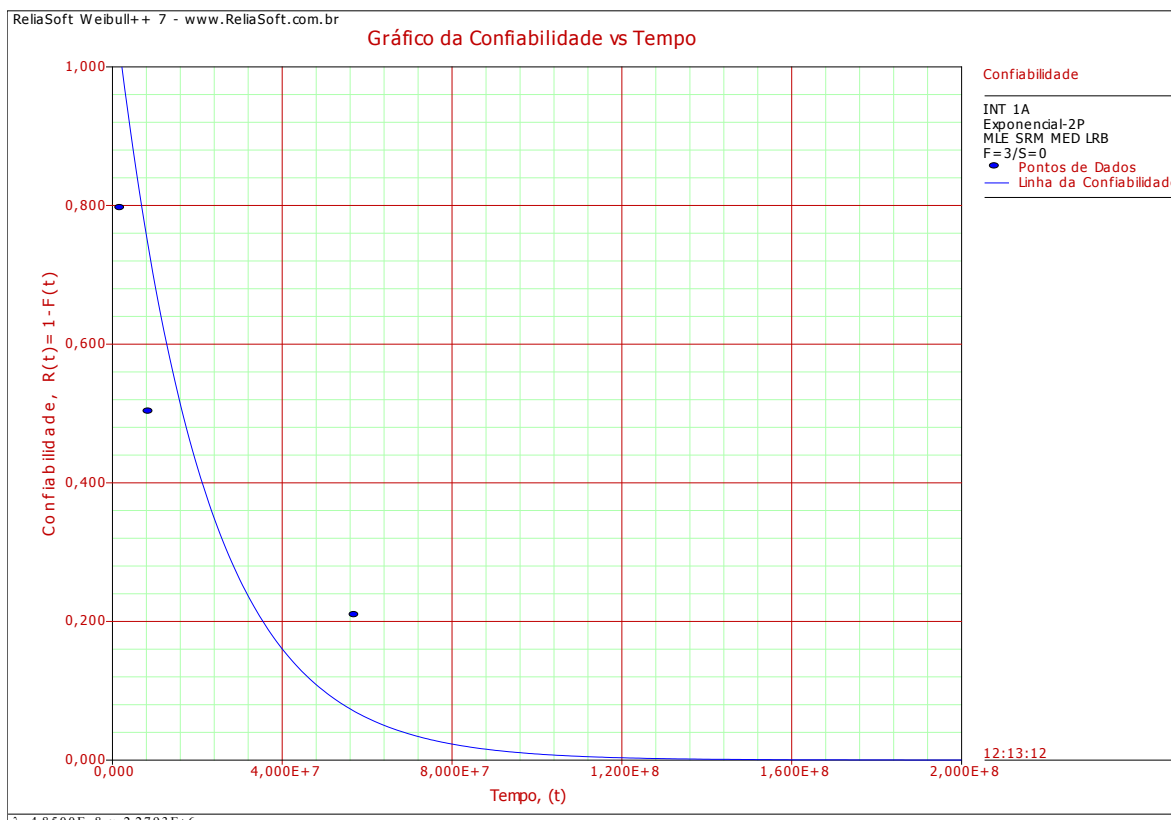


Figura 17 Fiabilidade vs Tempo – Falhas elétricas no circuito principal

Pelo inverso do valor da taxa de avarias (λ) se consegue obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (24)$$

$$MTBF = \frac{1}{4,85 * 10^{-8}} = 20618556.7 \text{ horas}$$

No passo seguinte, o valor calculado é comparado e verifica-se se esta dentro dos valores padrão de acordo com o indicado pelas normas francesas [1][2] utilizadas.

Falhas elétricas no circuito de controlo auxiliar

A Figura 18 mostra o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Conforme a figura apresentada, as falhas elétricas no circuito de controlo auxiliar foram identificadas num total de 3 unidades. Obteve-se uma taxa de avarias igual a $4,1429 * 10^{-8} (h^{-1})$.

A fiabilidade do produto diminui com o tempo de utilização conforme era esperado.

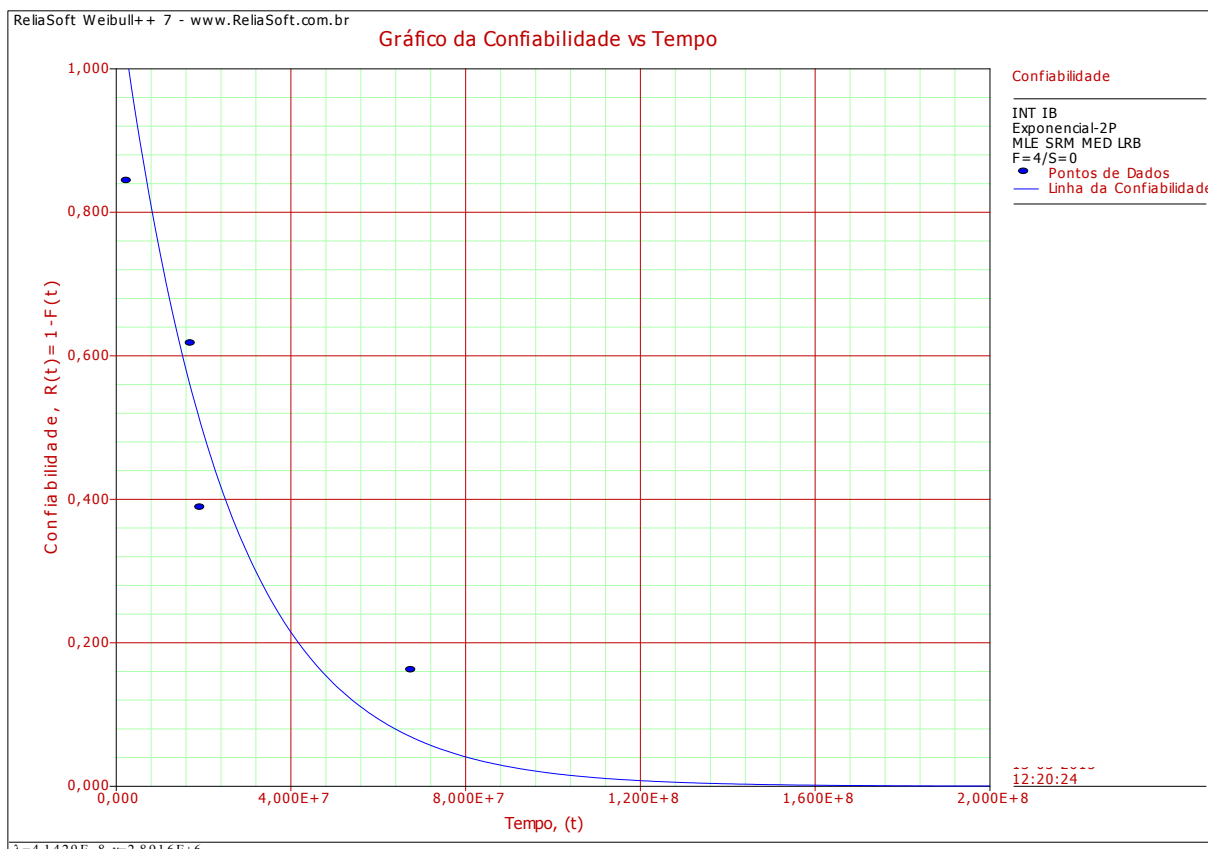


Figura 18 Fiabilidade vs Tempo – Falhas elétricas no circuito de controlo auxiliar

Pelo inverso do valor da taxa de avarias (λ) consegue-se obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (25)$$

$$MTBF = \frac{1}{4,1429 * 10^{-8}} = 24137681,3 \text{ horas}$$

No passo seguinte, o valor calculado é comparado e verifica-se se esta dentro dos valores padrão de acordo com o indicado pelas normas francesas [1][2] utilizadas.

Falhas do mecanismo de operação, *padlocks* e *interlocks*

A Figura 19 mostra o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Conforme a figura apresenta, as falhas do mecanismo de operações, *padlocks* e *interlocks* foram identificadas num total de 2 unidades. Obteve-se uma taxa de avaria igual a $4,3672 * 10^{-8} (h^{-1})$.

A fiabilidade do produto diminui com o tempo de utilização conforme era esperado.

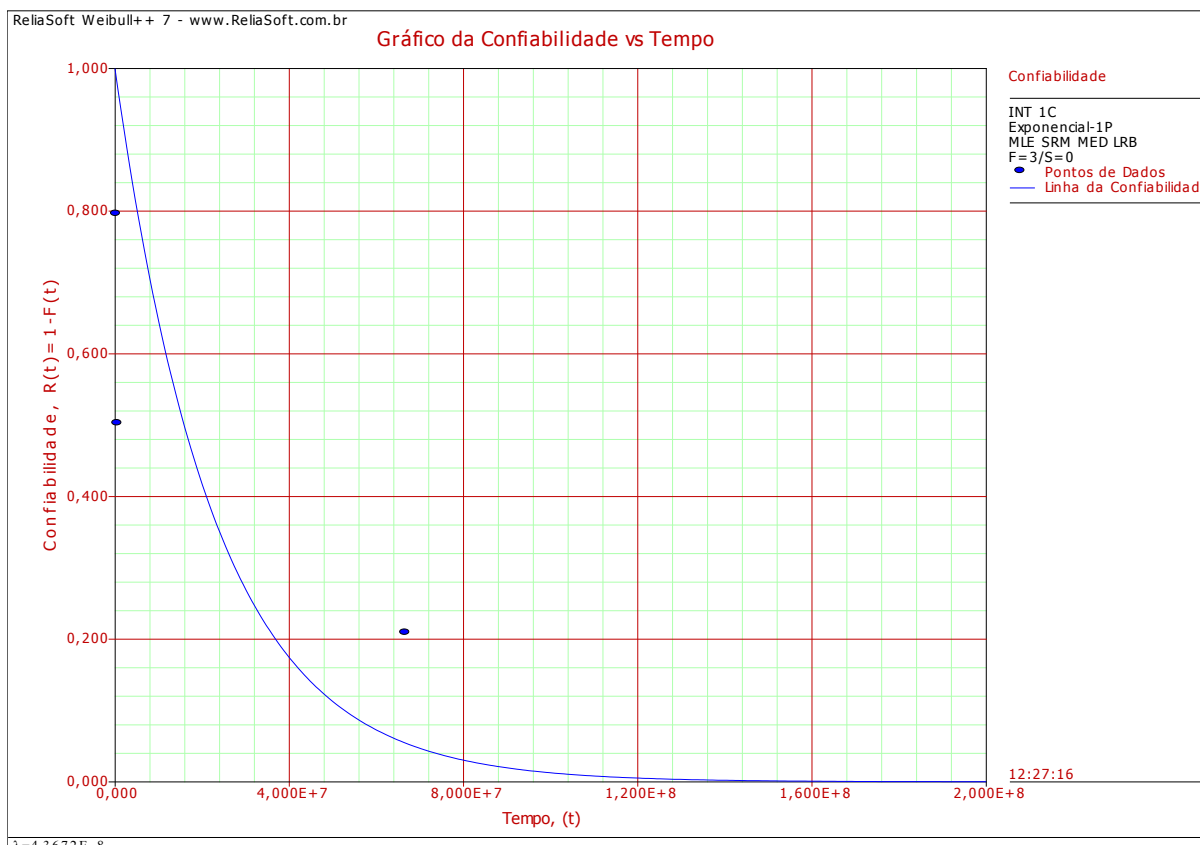


Figura 19 Fiabilidade vs Tempo – Falhas do mecanismo de operação

Pelo inverso do valor da taxa de avaria (λ) consegue-se obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (26)$$

$$MTBF = \frac{1}{4,3672 * 10^{-8}} = 22897966,7 \text{ horas}$$

De seguinte, o valor calculado é comparado e verifica-se se esta dentro dos valores padrão de acordo com o indicado pelas normas francesas [1][2] utilizadas.

Falhas tipo Fuga no sistema de SF6 (isolamento)

A Figura 20 mostra o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Conforme a figura apresenta, as falhas do tipo “fugas no sistema de SF6 (isolamento)” foram identificadas um total de 7 unidades. Verifica-se que este número é muito mais alto em comparação com outras falhas detetadas anteriormente. Obteve-se uma taxa de avaria igual a $6,6101 * 10^{-8}(h^{-1})$.

A fiabilidade do produto diminui com o tempo de utilização conforme era esperado.

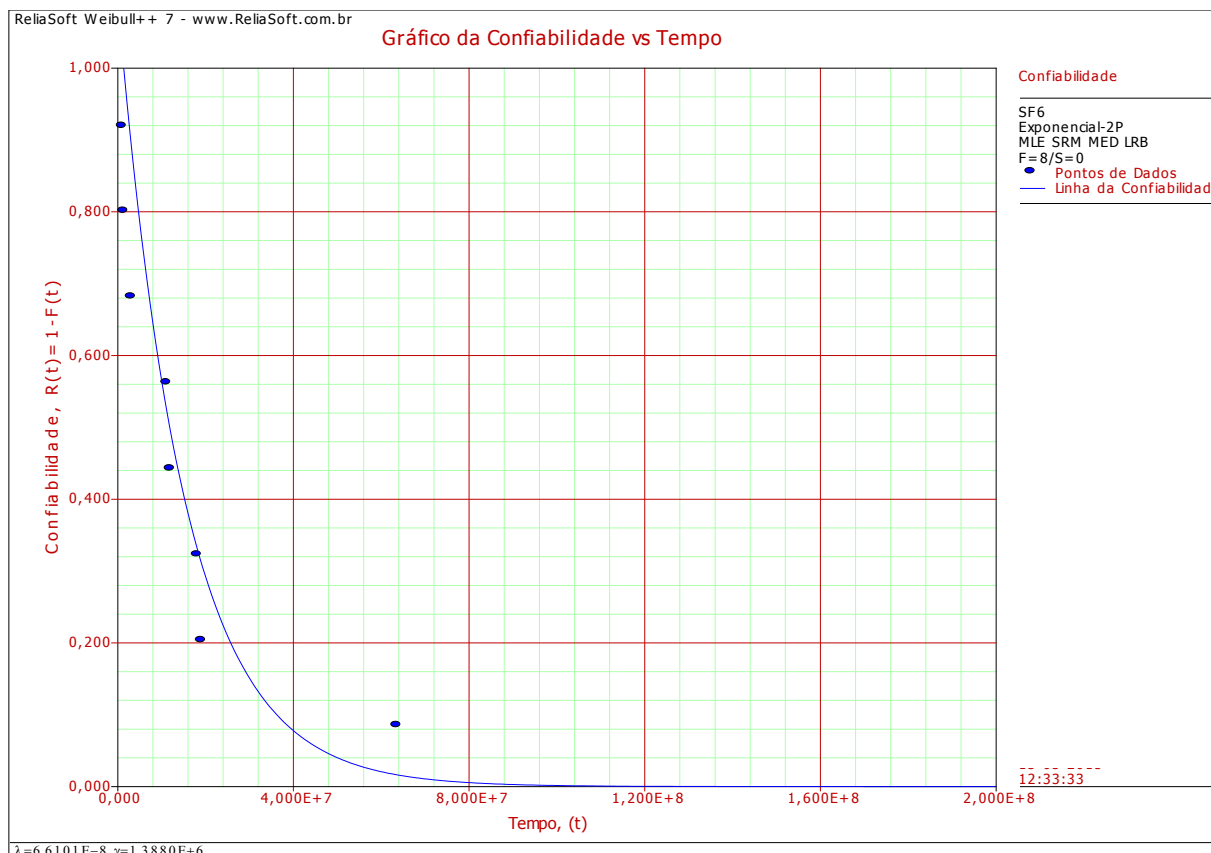


Figura 20 Fiabilidade vs Tempo – Falhas tipo fuga no sistema SF6

Pelo inverso do valor da taxa de avaria (λ) consegue-se obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (27)$$

$$MTBF = \frac{1}{6,6101 * 10^{-8}} = 15128364,2 \text{ horas}$$

De seguinte, o valor calculado é comparado e verifica-se se esta dentro dos valores padrão de acordo com o indicado pelas normas francesas [1][2] utilizadas.

Falha no indicador de presença de tensão

A Figura 21Figura 20 mostra o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Conforme a figura apresenta, as falhas no “indicador de presença de tensão” foram identificadas num

total de 3 unidades. Verifica-se que este número é inferior a falhas de tipo fugas. Obteve-se uma taxa de avaria igual a $2,2407 * 10^{-8} (h^{-1})$.

A fiabilidade do produto diminui com o tempo de utilização conforme era esperado.

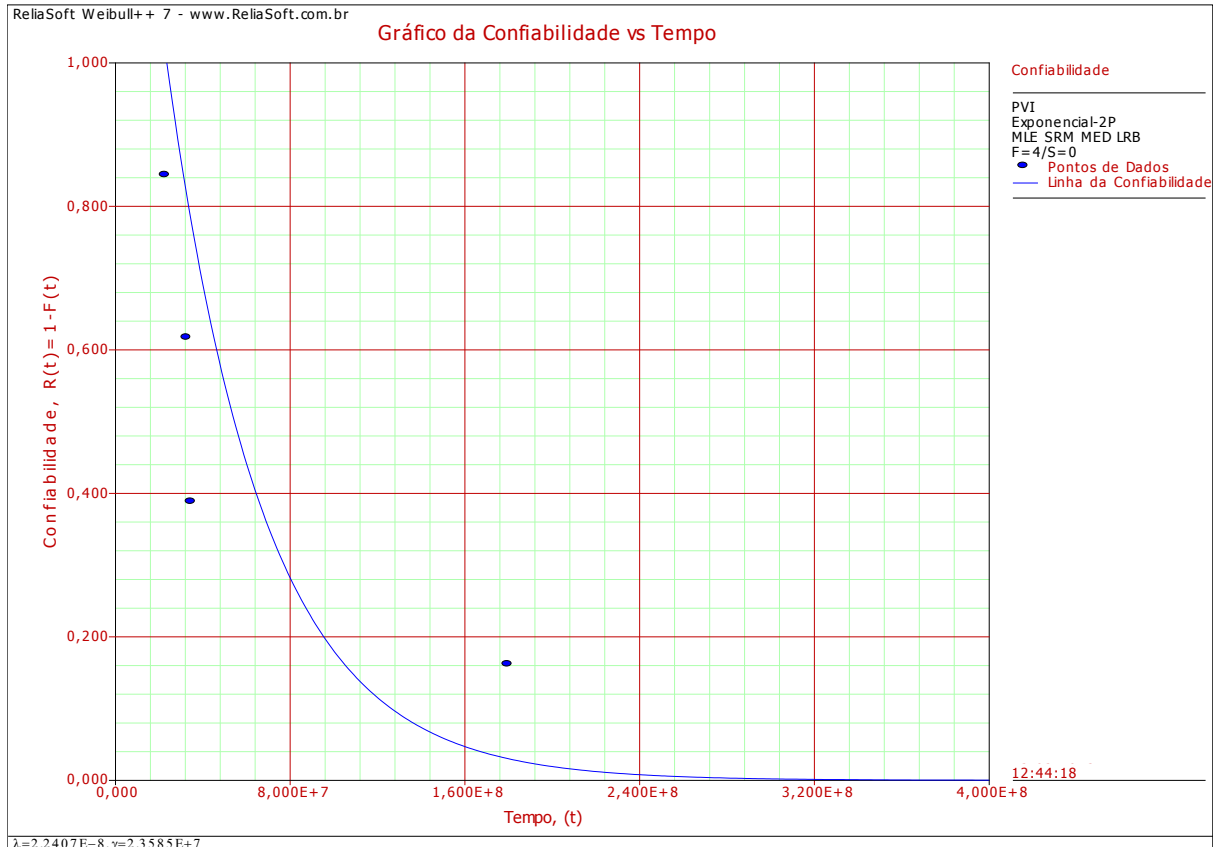


Figura 21 Fiabilidade vs Tempo – Falha no indicador de presença de tensão

Pelo inverso do valor da taxa de avarias (λ) se consegue obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (28)$$

$$MTBF = \frac{1}{2,2407 * 10^{-8}} = 44628910,6 \text{ horas}$$

De seguinte, o valor calculado é comparado e verifica-se se esta dentro dos valores padrão de acordo com o indicado pelas normas francesas [1][2] utilizadas.

Falha na presença de média tensão ou detetor de ausência

A Figura 22 mostra o extrato da solução obtida para este tipo de falhas. Conforme a figura apresenta as falhas na presença de média tensão ou detetor de ausência foram identificadas num total de 3 unidades. Verifica-se que este número é igual as falhas no indicador de presença de tensão. Obteve-se uma taxa de avaria igual a $1,9410 * 10^{-8} (h^{-1})$.

A fiabilidade do produto diminui com o tempo de utilização conforme era esperado.

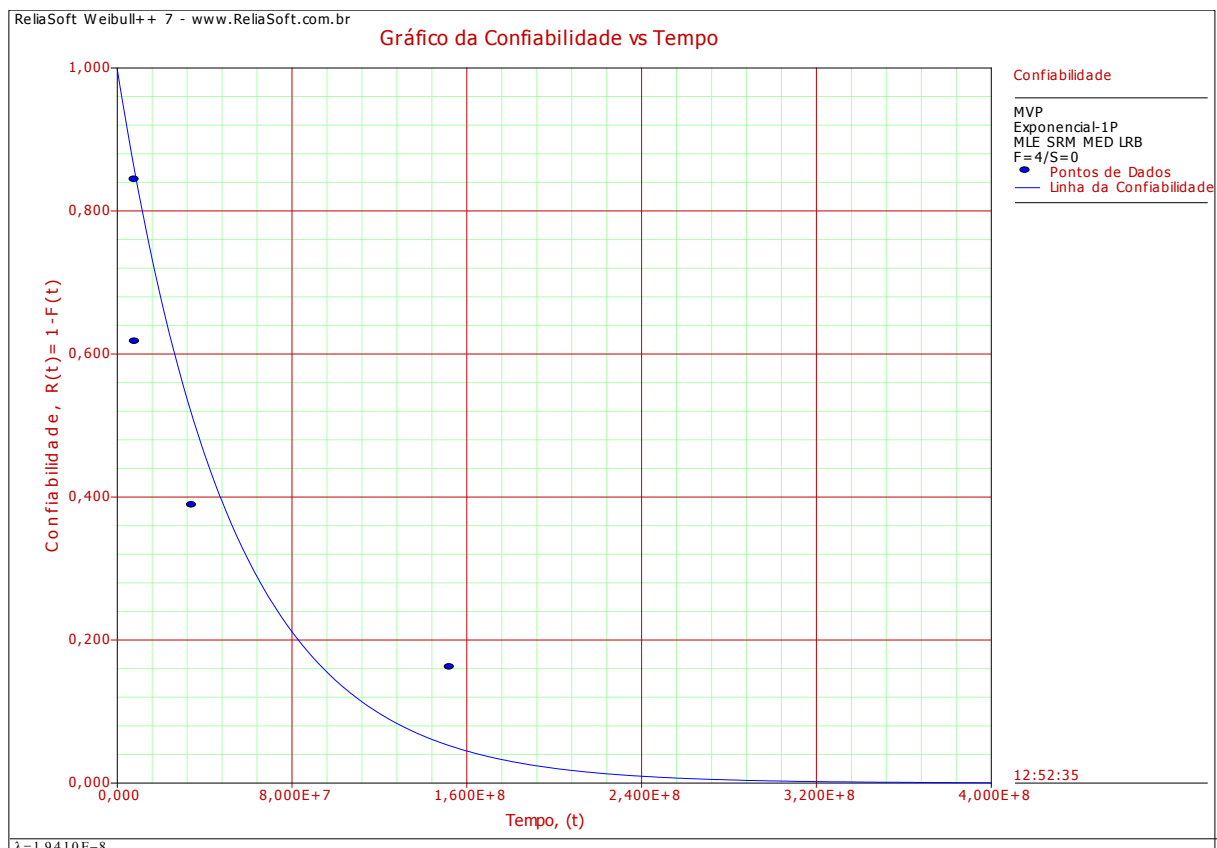


Figura 22 Fiabilidade vs Tempo – Falha na presença de média tensão

Pelo inverso do valor da taxa de avarias (λ) consegue-se obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (29)$$

$$MTBF = \frac{1}{1,9410 * 10^{-8}} = 51519835,1 \text{ horas}$$

De seguinte, o valor calculado é comparado e verifica-se se esta dentro dos valores padrão de acordo com o indicado pelas normas francesas [1][2] utilizadas.

Falhas totais para o produto – Fluofix GC

Por fim, a Figura 23 mostra o extrato da solução obtida para as falhas totais do produto Fluofix GC. Conforme a figura apresenta as falhas totais foram identificadas num total de 20 unidades.

Obteve-se uma taxa de avaria igual a $6,2717 * 10^{-8} (h^{-1})$. A fiabilidade do produto é inferior em comparação com o caso anterior dado que o número de falhas aumentou significativamente, dado que são consideradas a soma das falhas totais identificadas.

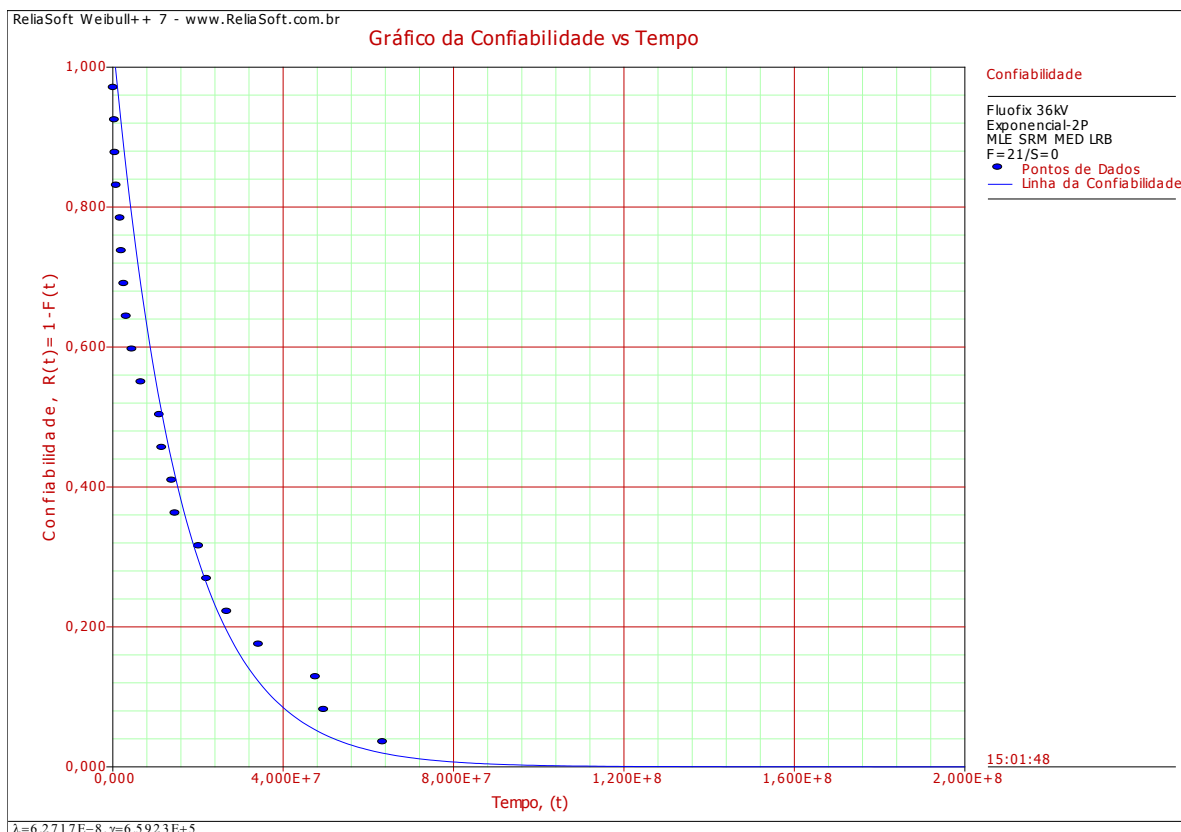


Figura 23 Fiabilidade vs Tempo – Fluofix 36kV

Pelo inverso do valor da taxa de avaria (λ) consegue-se obter o valor de MTBF.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (30)$$

$$MTBF = \frac{1}{6,2717 * 10^{-8}} = 15944640,2 \text{ horas}$$

Os valores obtidos serão registados, comentados e comparados com os valores normalizados [1][2].

A Tabela 16 apresenta a quantidade de ocorrências verificadas para cada modo de falha, as respetivas taxas de avaria e os valores de referência conforme as normas utilizadas neste estudo [1][2].

Tabela 16 MTBF, Taxa de avaria dos modos de Avaria – Fluofix 36kV

Modos de Avaria	Quantidade	MTBF (h)	λ - Taxa de avaria (h^{-1})	HN 64-S-52 Valores de Referência (h^{-1})
Falhas elétricas no circuito principal	2	20618556,7	$4,85 \times 10^{-8}$	1×10^{-7} por hora de operação
Falhas elétricas no circuito de controlo auxiliar	3	24137681,3	$4,1429 \times 10^{-8}$	1×10^{-7} por hora de operação
Falhas do mecanismo de operação, <i>padlocks</i> e <i>interlocks</i>	2	22897966,7	$4,3672 \times 10^{-8}$	1×10^{-7} por hora de operação
Fuga no sistema de SF6	7	15128364,2	$6,6101 \times 10^{-8}$	$0,3 \times 10^{-7}$ por hora de operação
Falha no indicador de presença de tensão	3	44628910,6	$2,2407 \times 10^{-8}$	$0,5 \times 10^{-8}$ por hora de operação (por cada unidade funcional)
Falha na presença de média tensão ou detetor de ausência	3	51519835,1	$1,9410 \times 10^{-8}$	$0,5 \times 10^{-7}$ por hora de operação (por cada detetor)

Numa primeira comparação temos o valor de λ (taxa de avaria) com um valor igual ou inferior ao correspondente aos requisitos da norma HN 64-S-52 Anexo B ou Anexo A para cálculos em anos. Na Tabela 16 podem-se verificar os números de defeitos, os valores do MTBF obtidos, a taxa de avaria obtida através do *software* Weibull ++7 e os valores da taxa de avaria tabelada conforme a norma utilizada [2].

Identifica-se com facilidade que os valores calculados são inferiores aos valores tabelados. O número de defeitos não é significativo face ao número de celas instaladas, mas por outro

lado há que notar que o número de unidades instaladas é reduzido e que este é um produto “jovem”, ou seja, com um tempo reduzido de funcionamento.

Também é possível confirmar que foram identificadas sete falhas do tipo “fugas no sistema SF6”. Isto permitiu a projeção de um posterior estudo com vista à diminuição deste número passando naturalmente ainda pela identificação das causas destes defeitos. Este estudo deve trazer melhoria do equipamento e uma diminuição das despesas de manutenção.

A verificação das condições, assim como o preenchimento das tabelas Excel, está automatizada pela incorporação de programação em “VBA for Applications”, o que atualmente permite um trabalho mais rápido e fácil, o que nos facilita nos cálculos para futuros estudos para outros equipamentos – a tarefa morosa de importação e sinalização é agora feita automaticamente.

O inverso da taxa de avaria (λ) obtida pela distribuição exponencial dá-nos o MTBF. Como admitimos que $\lambda(t)$ é uma constante, é possível calcular a fiabilidade do produto Fluofix GC.

A fiabilidade de um sistema, constituído por vários componentes, depende da fiabilidade dos componentes do sistema, da forma de como os componentes estão ligados e da definição das condições de funcionamento do sistema. Tendo em conta todas as ocorrências registadas, que colocam em causa a fiabilidade e disponibilidade do equipamento Fluofix GC, aplicando a distribuição exponencial obtém-se os seguintes valores de MTBF, Taxa de avaria e Fiabilidade apresentado na Tabela 17:

Tabela 17 MTBF, Taxa de Avaria e Fiabilidade para o produto – Fluofix GC

Item	Descrição	λ =Taxa de avaria (h ⁻¹)	MTBF (h)	MTBF (anos)	Fiabilidade (%)	Origem dos Dados
1	Fluofix GC	6,2717x10 ⁻⁸	15944640,2	1820,16	99,97%	Complaints _Amt_2010_ 2016

Obtemos um valor da fiabilidade para as celas Fluofix GC de 99.97% que é considerado como um valor excelente. O valor expectável antes da realização deste estudo era que fosse superior a 99,00%.

4.5. DISPONIBILIDADE

O conceito de disponibilidade define a capacidade do produto se encontrar num estado de poder executar uma função requerida, sob dadas condições e num determinado momento ou intervalo de tempo, assumindo que os recursos externos necessários são fornecidos [18].

Assim como existe uma relação direta entre a fiabilidade e a disponibilidade de um sistema, uma vez que as falhas de um sistema poderão dar origem a períodos de indisponibilidade.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF} \approx 100\% \quad (31)$$

4.6. SEGURANÇA FUNCIONAL

Segurança é a ausência de risco não aceitável [18].

A Integridade da Segurança é o grau de segurança de um sistema desempenhar satisfatoriamente as funções de segurança requeridas nas condições estabelecidas e durante um período de tempo determinado [18].

A equipa da qualidade é responsável pelo Plano de Segurança. Este plano é um conjunto de atividades documentadas e programadas, recursos, processos e acontecimentos destinados a implementar a estrutura organizacional, responsabilidades, procedimentos, atividades, capacidades e recursos, que juntos garantem que um item irá satisfazer os requisitos relevantes num dado contrato ou projeto.

Os requisitos ambientais e de segurança e saúde no trabalho e as práticas de prevenção respetivas são descritas, nomeadamente, nos documentos disponíveis junto dos postos de trabalho dos funcionários. Os funcionários devem ter periodicamente, conforme necessário e programado pelo Departamento da Qualidade, formação em segurança e ambiente no posto de trabalho. As instruções de segurança devem ser cumpridas por parte dos colaboradores intervenientes, para o correto e seguro desempenho das atividades.

Tabela 18 Requisitos de atuação em caso de emergência [25]

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 Energia 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 ao Gestor Qualidade Ambiente e Segurança (QAS), de forma a serem analisadas de acordo com cada situação.

Os colaboradores recebem indicações como devem proceder em qualquer caso de situação de emergência. Na Tabela 18 esta descrito qual o procedimento em caso de emergência.

O arquivo de registos associados a qualquer emergência é feito de acordo com a Descrição de Atividade Controlo dos registos da Qualidade, Ambiente e Segurança.

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

Após a análise das falhas e identificadas as causas de defeitos são propostas medidas corretivas - embora algumas medidas são referentes a mais do que um tipo de defeito. Também foi constatado que a maior parte das avarias estão na fase de fabrico, logo, esta parte deve ser melhorada com maior urgência. A seguir seguem-se as medidas propostas e implementadas:

- Ministar formação aos novos funcionários ao nível da montagem;
- Inspeção na Receção de Materiais;

- Realização de Ensaios que comprovem (ou não) a qualidade de determinado artigo/fornecedor;
- Verificar as manobras mecânicas mais uma vez depois dos ensaios finais;
- Melhorar as qualificações da equipa de manutenção;
- Enviar sempre aos clientes, junto com as celas Fluofix GC, o manual de instruções das manobras, funcionamento e locais da instalação adequados.
- Realizar um ensaio de deteção de fugas suplementar depois dos ensaios finais, antes da expedição;
- Aumentar a taxa de pressão no caso de ensaio, mas dentro de valores normativos;
- Melhorar o condicionamento das matérias para exportação.

Uma das medidas já implementadas tem a ver com o facto de todos funcionários poderem dar a sua opinião referente à melhoria dos processos de fabrico através da intranet [25].

Todas as manifestações das partes interessadas – reclamações de clientes - são registadas na ferramenta SiGefa QES [24] na intranet, onde é feita a sua gestão:

As reclamações recebidas quanto à operacionalidade do produto, isto é, reclamações de anomalias detetadas nos equipamentos em serviço no cliente, incluindo eventuais ocorrências durante os trabalhos de entrada em serviço caso este trabalho seja efetuado pelo cliente.

Todas as reclamações são encaminhadas para o Controlo da Qualidade, onde o responsável pelo Controlo da Qualidade ou colaborador com delegação, será responsável por dar o respetivo seguimento, tipificando a ocorrência como reclamação. O recetor da reclamação anexa toda a informação pertinente à reclamação. Todas as atividades descritas são documentadas no SiGefa QES. Nos casos onde não é possível usar a aplicação será utilizado a Ficha de Registo de Ocorrências, em formato papel. A ficha em questão será enviada ao (s) responsável (eis) de Gestão da Qualidade, Ambiente, Segurança e Saúde no Trabalho ou Investigação, Desenvolvimento e Inovação (QAS + IDI) e é registada no SiGefa QES, sempre que possível.

No SiGefa QES, pode-se ainda consultar os indicadores distribuídos por: causa e subcausa, cliente, fornecedor, linha de produto (por componente ou defeito), processo, responsabilidade, severidade e tipo de ocorrência.

4.7. FMECA

O objetivo é apresentar os resultados da análise FMECA para o produto Fluofix GC, produzido pela Efacec Energia. O propósito desta análise é a identificação de falhas, causas e efeitos do produto Fluofix GC, permitindo uma abordagem mais sistemática à análise RAMS.

A Tabela 19 apresenta a estrutura funcional das celas Fluofix GC.

Tabela 19 Estrutura funcional – Fluofix GC

ITEM	DESCRIÇÃO
1	Cuba
2	Interruptor - Seccionador ISFG
3	Disjuntor M.T.
3.1	Motor
3.2	Bobina de abertura
3.3	Bobina de fecha
3.4	Comando
3.5	Ampola de corte em vacuum
4	Conjunto de isoladores-condensadores
5	Sinalizador de presença de tensão LED
6	<i>Bushings</i>
7	Encravamentos mecânicos
8	Termostato
9	Resistência de aquecimento
10	Disjuntores B.T.
11	Transformadores de corrente (TI)
12	Transformadores de tensão (TT)
13	Fusíveis M.T.

A análise FMECA é efetuada com uma metodologia de análise *Bottom-Up* e registados os resultados em tabelas. O ponto de partida desta análise é a estrutura funcional definida na Tabela 19.

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

Para cada componente é descrito sua função, modo de falha que pode ocorrer, as potenciais causas destas falhas, qual o efeito local para cada modo de falha, qual o efeito final pressuposto da respectiva falha, método de detecção da falha, a classificação da probabilidade da ocorrência (PN), do nível de severidade (SN), do nível de detecção (DN), cálculo do número de Prioridade de Risco (RPN) e as ações recomendadas para reduzir os riscos.

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)												
Sistema: Fluofix GC Subsistema / Equipamento: Celas MT Projecto / Fase: Produção							Preparada: Ion Gordiciuc Aprovado: Santos Carlos Data: 2016-08-16 Ver:00					
Ref.	Componente	Função	Modo de Falha	Potencial Causa	Efeito Local	Efeito Final	Método de Detecção	PN	SN	DN	RPN	Notas
1.1	Cuba	Isolamento do circuito de MT em SF6	Fugas	Falha nos o-rings; Fuga na válvula de enchimento	Redução da longevidade	Possibilidade da cela ficar indisponível	Ensaio de fuga	5	8	2	80	Formação aos colaboradores dos ensaios
			Ruptura do tanque sob pressão inferior à projetada	Fabricação com defeito (soldadura)	Explosão da cuba	Cela indisponível	Visual ou ensaio de fuga	5	9	2	90	Verificar o processo de soldadura
1.2	Interruptor ISFG	Interrupção / protecção do circuito MT	Falha da ligação	Lubrificação deficiente Procedimentos de manobra errados Encravamento forçado	Incapaz de manobrar o interruptor	Inacessibilidade ao local	Visual ou sinalização eléctrica	4	4	1	16	
1.3	Disjuntor MT	Protecção do circuito MT	Incapacidade de abrir o circuito	Falha no comando ou a abrir a bobine	Cela indisponível	Possibilidade da cela ficar indisponível	Teste de parâmetros dinâmicos do disjuntor ou sinalização visual ou eléctrica	2	8	1	16	
			Incapacidade de fechar o circuito	Falha no comando ou a fechar a bobine	Cela indisponível	Cela indisponível	Visual ou sinalização eléctrica	4	4	1	16	
1.3.1	Motor	Rearme da mola do disjuntor MT	Falha ao rearmar a mola do disjuntor MT	Falha do circuito de motor Falha ao rearmar o mecanismo Motor "queimado"	Incapacidade de rearmar molas Incapacidade de fechar disjuntor Incapacidade de rearmar molas	Disjuntor MT indisponível	Verificar o circuito eléctrico e inspeção visual do sistema mecânico de rearme	4	4	1	16	
1.3.2	Bobina de abertura	Abertura eléctrica do disjuntor MT	Falha ao abrir electricamente o disjuntor MT	Falha em circuito aberto e/ou falha de bobina	Incapacidade de abrir electricamente o disjuntor MT	Disjuntor eléctrico indisponível	Verificar a abertura do circuito eléctrico da bobina e resistencia de isolamento da bobina	2	8	1	16	

Por exemplo, o componente Cuba: o componente 1.1 (Cuba) tem a função de isolamento em SF6 de todas as partes ativas em MT. Para este componente podem existir dois modos de falhas distintos:

- Fugas
- Rutura do tanque subpressão inferior projetada.

O modo de falha “fugas SF6” que tem como potenciais causas os *o-rings* utilizados ou válvula de enchimento montada para a respetiva cuba. Caso isso aconteça temos um efeito local de redução de longevidade, mas também temos um possível efeito final como a possibilidade da cela ficar indisponível. O método de deteção deste modo de falha é a realização de ensaio de fugas na fase inicial do processo, ou seja antes da montagem de todos os componentes.

Este modo de falha tem uma classificação da probabilidade da ocorrência (PN) igual a 5 dado que este tipo de falha acontece ocasionalmente com uma probabilidade de 1 em 400 unidades instaladas (em funcionamento).

A classificação do nível de severidade (SN) é igual a 8 dado que com este modo de falha o sistema fica inoperacional, com perda de funções primárias sem comprometer a segurança.

A classificação do nível de deteção (DN) é igual a 2 dado que esta falha tem uma probabilidade muito alta de ser identificada na fase de montagem, antes de estar em funcionamento.

O número de Prioridade de Risco (RPN) será:

$$RPN = 5 * 8 * 2 = 80 \quad (32)$$

Na última coluna serão apresentadas as ações recomendadas para reduzir este risco. As ações podem passar por exemplo pela aplicação de um novo plano de manutenção preventiva, pela introdução de novas ações na Ficha de Manutenção Autónoma do equipamento, pelo estabelecimento de ações de engenharia, geridas pelo departamento técnico ou de manutenção.

Na tabela seguinte está apresentado a tabela FMECA realizada para os componentes bobina de fecho (1.3.3), comando (1.3.4), ampola de corte em vacuum (1.3.5), isoladores-condensadores (1.4), sinalizadores (1.5) e os *busing*s (1.6).

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)												
Sistema: Fluofix GC Subsistema / Equipamento: Celas MT Projecto / Fase: Produção							Preparada: Ion Gordiciuc Aprovado: Santos Carlos Data: 2016-08-16 Ver:00					
Ref.	Componente	Função	Modo de Falha	Potencial Causa	Efeito Local	Efeito Final	Método de Detecção	PN	SN	DN	RPN	Notas
1.3.3	Bobina de fecha	Fecho eléctrica do disjuntor MT	Falha ao fechar electricamente o disjuntor MT	Falha em circuito fechado e/ou falha de bobina	Incapacidade de fechar electricamente o disjuntor MT	Disjuntor eléctrico indisponível	Verificar o fecho do circuito eléctrico da bobina e resistencia de isolamento da bobina	4	4	1	16	
1.3.4	Comando	Operação mecânica do disjuntor MT	Incapacidade de executar a operação mecânica do disjuntor MT	Regulação defeituosa; fratura de algum componente interno do mecanismo	Indisponibilidade de operar o disjuntor mecanica ou electricamente	Disjuntor indisponível	Manutenção preventiva para verificar a regulação; parametros de ensaio do disjuntor	5	4	1	20	
1.3.5	Ampola de corte em vacuum	Abrir e fechar o disjuntor MT	Falha ao abrir os contactos do disjuntor MT	Falha no mecanismo de controlo; dissociação da ampola de vacuum, perda ao esvaziar a âmpola de vacuum	Cela indisponível	Possibilidade de ficar indisponível	Teste de parâmetros dinâmicos do disjuntor, medição de resistência de contacto do disjuntor e resistência de isolamento. Sinais eléctricos	3	8	1	24	
			Falha ao fechar os contactos do disjuntor MT		Cela indisponível			Possibilidade de ficar indisponível	4	7	1	28
1.4	Conjunto de isoladores-condensadores	Divisão do MT para BT para ligação do indicador	Falha na divisão de MT para BT	Falha no isolador capacitivo, falha na electrificação	Não assinala a presença de tensão na cela parcial ou total	Disponível	Visual	3	2	1	6	
1.5	Sinalizador de presença de tensão LED	Indicação da presença de tensão nos cabos MT	Não indica a presença de tensão nos cabos MT	Falha no isolador capacitivo, falha na electrificação, falha na carta	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	Falha no isolamento em compartimento de cabos	Condições ambientais, incorrecta montagem	Cela indisponível	Cela indisponível	Detecção por ultrasom, medição de resistencia de isolamento, presença de O3	4	4	1	16	

Por exemplo, o componente Ampola de corte em vacuum: o componente 1.3.5 tem a função de abrir e fechar o disjuntor MT e possui isolamento em SF6. Conforme se verifica acima para este componente podem existir dois modos de falhas distintos:

- Falha ao abrir os contactos do disjuntor MT
- Falha ao fechar os contactos do disjuntor MT

O modo de falha Abrir/Fechar os contactos do disjuntor MT tem como potenciais causas as falhas no mecanismo de comando ou esvaziamento da ampola. Caso se verifica o esvaziamento, é considerado um defeito de fabrico (fornecedor). Neste caso, abre-se uma ficha de não conformidade (FNC) e a respetiva ampola é devolvida ao fornecedor. O efeito local é a cela ficar indisponível. O método de deteção deste modo de falha é através da realização, em fábrica, dos testes de parâmetros dinâmicos do disjuntor MT, medição de resistência de contacto do disjuntor e resistência de isolamento. Também este modo de falha pode ser identificado na fase de verificação dos sinais elétricos.

Este modo de falha tem uma classificação da probabilidade da ocorrência (PN) igual a 3 ou 4 dado que este tipo de falha acontece ocasionalmente com uma probabilidade de 1 em 15000/ou 2000 unidades instaladas (em funcionamento).

A classificação do nível de severidade (SN) é igual a 7 ou 8 dado que com este modo de falha o sistema fica inoperacional e com danos no equipamento.

A classificação do nível de deteção (DN) é igual a 1 dado que na verificação do projeto a equipa de verificação final, provavelmente, irá detetar este modo de falha.

O número de Prioridade de Risco (RPN) será:

$$RPN = 3 * 8 * 1 = 24 \quad (33)$$

$$RPN = 4 * 7 * 1 = 28 \quad (34)$$

As ações recomendadas para reduzir este risco são a verificação dos materiais na fase de receção e a formação sistemática da equipa de inspeção e ensaios

Na tabela seguinte está apresentado a tabela FMECA para os restantes componentes.

Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)

Sistema: Fluofix GC Subsistema / Equipamento: Celas MT Projecto / Fase: Produção							Preparada: Ion Gordiciuc Aprovado: Santos Carlos Data: 2016-08-16 Ver:00					
Ref.	Componente	Função	Modo de Falha	Potencial Causa	Efeito Local	Efeito Final	Método de Detecção	PN	SN	DN	RPN	Notas
1.7	Encravamentos mecânicos	Encravamento mecânico para segurança do operador	Falha no encravamento mecânico	Desregulação do sistema mecânico no disparo do disjuntor	Cela indisponível	Cela indisponível	Visual	2	4	5	40	
1.8	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 da cela ficar indisponível	Na manutenção preventiva deve ser verificado o circuito eléctrico do termostato	2	2	2	8	
1.9	Resistência de aquecimento	Sistema de aquecimento para prevenir a condensação	Falha no aquecimento permitindo a condensação	Falha da resistência; falha na alimentação da resistência de aquecimento	Cela disponível mas não a 100%	Possibilidade da cela ficar indisponível	Na manutenção preventiva deve ser verificado o circuito eléctrico do termostato	2	2	2	8	
1.10	Disjuntores BT	Protecção do circuito BT	Falha na protecção do circuito BT	Falha no disjuntor BT	Cela disponível mas não a 100%	Cela disponível mas não a 100%	Manutenção preventiva deve verificar o disjuntor BT	3	3	2	18	
1.11	Transformadores de corrente (TI)	Transformação de corrente MT para BT, medição e protecção	Falha no isolamento	Saturação do enrolamento. Abertura do TI secundário	Cela disponível (compartimento de cabos afectado)	Possibilidade da cela ficar indisponível	Ensaio TI na manutenção preventiva	2	4	2	16	
			Erro na relação de transformação	Saturação do enrolamento	Erro na medição e protecção	Leitura de valores errados	Ensaio TI na manutenção preventiva	2	3	2	12	
1.12	Transformadores de tensão (TT)	Transformação de tensão MT para BT, medição e protecção	Falha no isolamento	Sobretensão	Cela disponível (compartimento de cabos afectado)	Possibilidade da cela ficar indisponível	Ensaio TT na manutenção preventiva	2	4	2	16	
			Erro na relação de transformação	Saturação do enrolamento	Erro na medição e protecção	Leitura de valores errados	Ensaio TT na manutenção preventiva	2	3	2	12	
1.13	Fusíveis M.T.	Protecção do transformador de tensão	Falha na protecção do transformador de tensão	Falha do fusível	TT indisponível	Possibilidade da cela ficar indisponível	Indicação de fusão do fusível por sinalização eléctrica	2	4	1	8	

Por exemplo, o componente Encravamentos mecânicos: o componente 1.7 tem a função de encravamento mecânico para segurança do operado durante exploração. Conforme se verifica para este componente pode existir apenas um modo de falha:

- Falha no encravamento mecânico

O modo de falha “encravamento mecânico” tem como potencial causa a desregulação do sistema mecânico no disparo do disjuntor. Caso isso aconteça temos um possível efeito final como a possibilidade da cela ficar indisponível. O método de detecção deste modo de falha é visual e é assegurado pela equipa de montagem ou pela equipa de verificação final.

Este modo de falha tem uma classificação da probabilidade da ocorrência (PN) igual a 2 dado que acontecem relativamente poucas falhas deste tipo com uma probabilidade de 1 em 150000 unidades instaladas (em funcionamento).

A classificação do nível de severidade (SN) é igual a 4 dado que com este modo de falha o sistema mantém-se operacional mas com um nível significativo de degradação da sua performance.

A classificação do nível de detecção (DN) é igual a 5 dado que esta falha tem uma moderada probabilidade de ser detetada a causa/mecanismo potencial e modo de falha subsequente.

O número de Prioridade de Risco (RPN) será:

$$RPN = 2 * 4 * 5 = 40 \quad (35)$$

As ações recomendadas para reduzir este risco são a verificação dos materiais na fase de receção e a formação sistemática da equipa de montagem e da equipa de inspeção e ensaios.

Pela análise de resultados, verifica-se que existe um conjunto de modos de avarias, pertencentes a diversos subsistemas, que necessitam de uma análise profunda e determinação de um plano de ações corretivas robusto.

Assim sendo, pode-se afirmar que não é somente importante atuar a nível da falha crítica, mas sim sobre os diversos modos de falhas críticas do sistema no seu conjunto.

4.8. FTA

O Método de Análise da Árvore de Falhas (*fault tree analysis, FTA*) promove uma análise exaustiva das causas de falhas de sistemas e o desenvolvimento de medidas que são mais eficazes para a sua eliminação.

Esta análise deverá ser realizada para cada período de operação de cada parte ou de todo o sistema.

Com os dados da análise FMECA e a identificação de falhas, causas e efeitos do produto Fluofix GC, permite-nos uma abordagem mais sistemática para a análise FTA.

Identificaram-se primeiramente as falhas que podem provocar um arco interno, pois quando estes tipos de falhas acontecem o produto é normalmente substituído, dado que está sujeito a uma destruição total ou parcial. Ou seja, este é o caso de indisponibilidade total.

Após a identificação das falhas possivelmente causadoras de arco interno, foram geradas várias árvores de falhas. As árvores de falha obtidas apresentavam uma estrutura mais horizontal do que vertical, isto é, ocorreram poucos desdobramentos dos níveis hierárquicos. A grande maioria dos eventos está relacionada com a porta lógica “ou”. Isso demonstra que a maioria dos eventos, do mesmo nível hierárquico, são independentes e não-mutuamente exclusivos.

A Figura 24 mostra o diagrama das falhas correspondentes ao estudo FMECA (com os respetivos números associados) que podem provocar um arco interno.

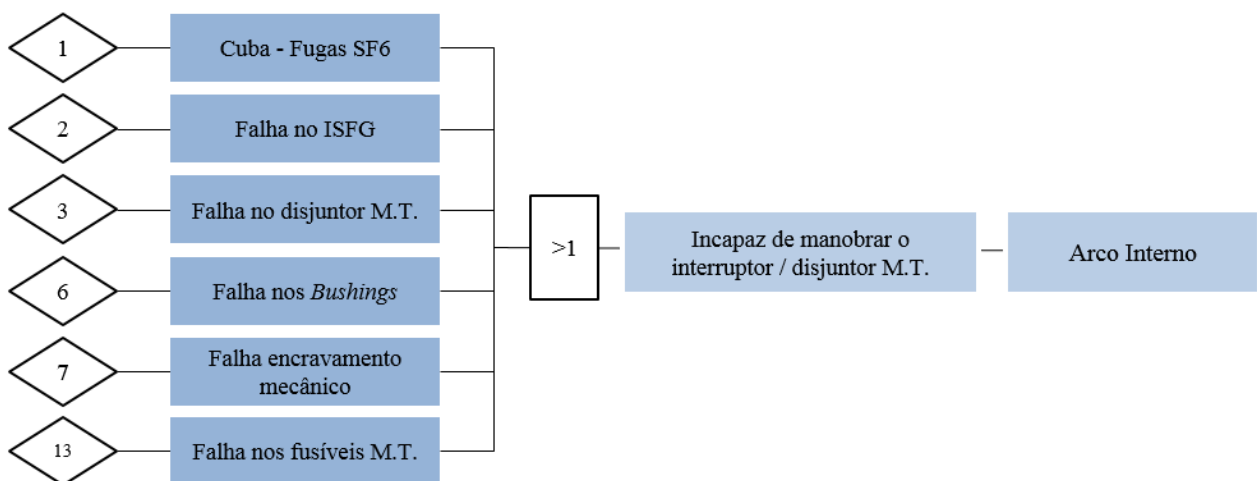


Figura 24 Falhas que podem provocar arco interno (indisponibilidade total)

De seguida identificaram-se as falhas que podem provocar uma indisponibilidade parcial. Estas falhas devem ser eliminadas o quanto antes para que o efeito não se prolongue e não prejudique o bom funcionamento do equipamento.

A Figura 25 mostra o diagrama das falhas correspondentes ao estudo FMECA que podem provocar uma indisponibilidade parcial.

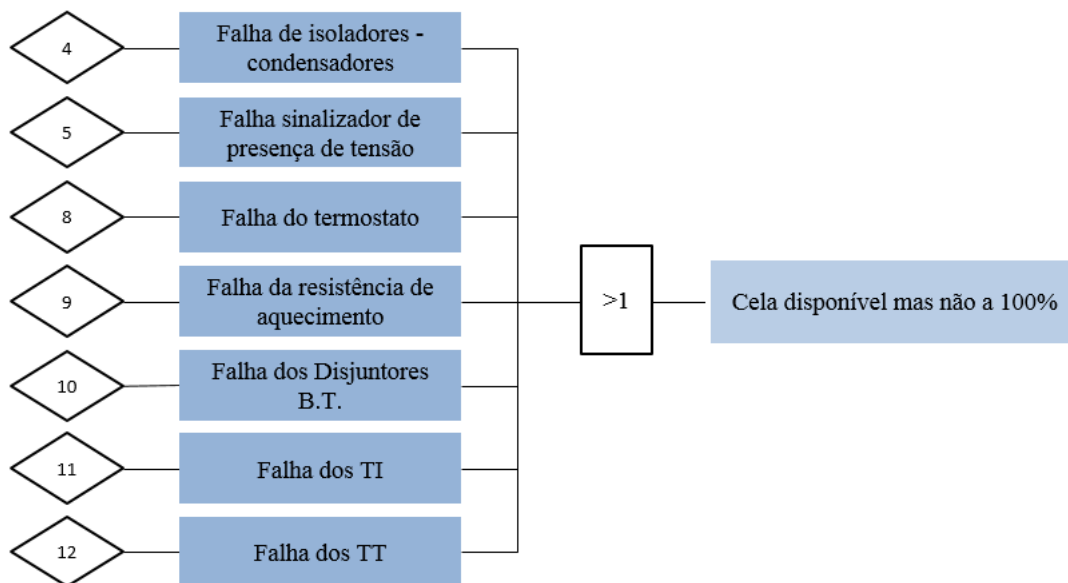
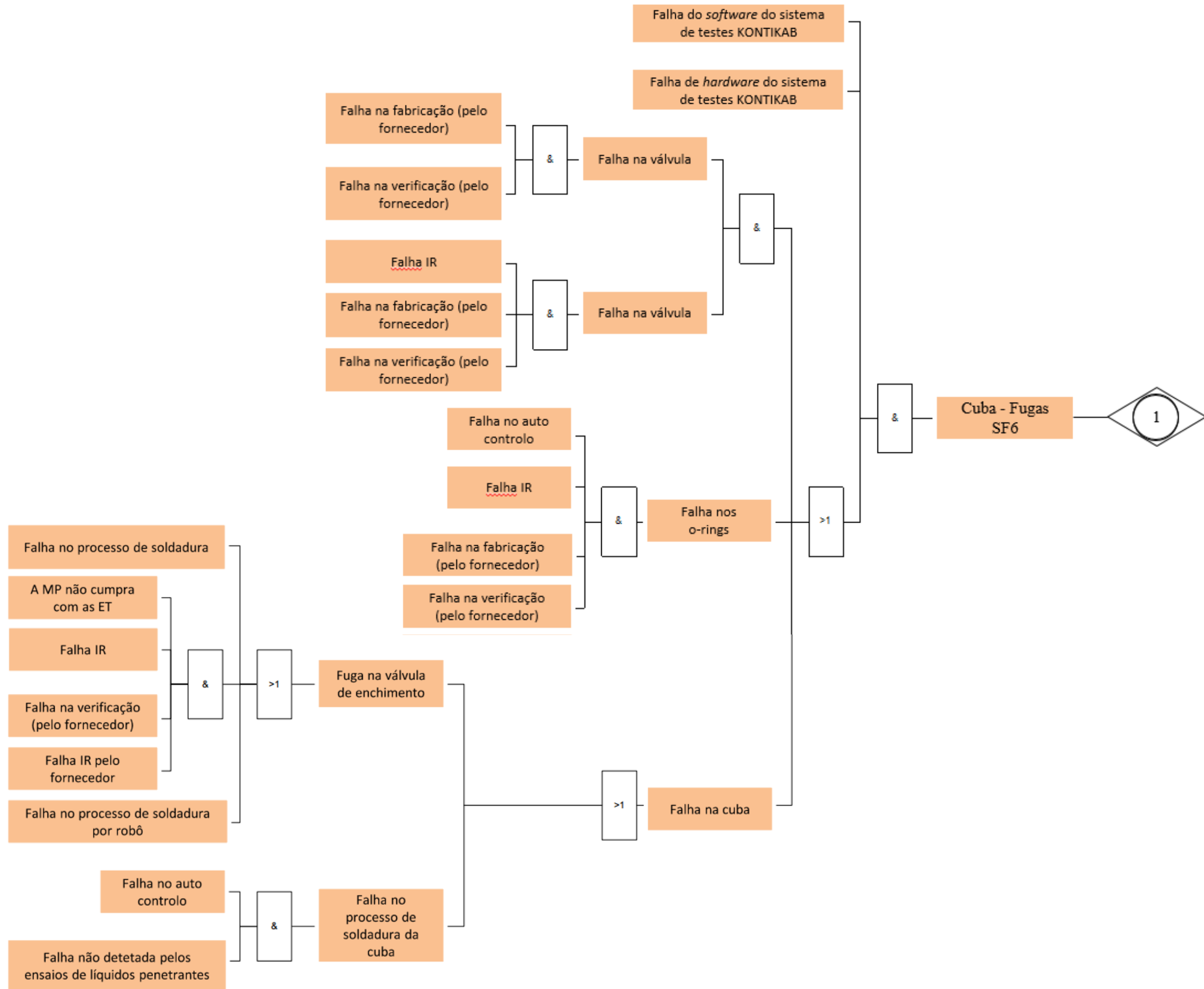


Figura 25 Falhas que podem provocar uma indisponibilidade parcial

A figura abaixo apresenta a diagrama FTA para o componente Cuba (Ref. 1.1 correspondente ao estudo FMECA). Repare-se que é possível constatar que a análise FTA é uma ferramenta bastante útil e que fornece dados (relacionados e relacionáveis) em diversas vertentes, pois é possível identificar as possíveis falhas com uma visão mais alargada e esse conhecimento é muito importante a fim de não perder as razões que afetam o evento indesejável.

O sistema KONTIKAB é um sistema automático para a deteção de fugas. As etapas do ensaio de fugas e a diagrama de funcionamento deste sistema automático esta apresentado no Anexo C e Anexo D. A probabilidade de avaria deste sistema é muito baixa.



O processo de soldadura dos tanques Fluofix GC está a cargo da produção, no entanto, também uma parte de soldadura é realizada por subcontratados. Os subcontratados devem cumprir com a instrução operacional disponibilizada onde serão descritos os requisitos de âmbito geral a serem aplicados na produção das cubas para a Fluofix GC, de forma a garantir um nível adequado de resistência mecânica, estabilidade dimensional, operacionalidade e durabilidade.

Todos os materiais de base fornecidos pelo subcontratante deverão estar em conformidade com o respetivo desenho da cuba ou do componente a ser fabricado. Ao fornecedor poderá ser solicitado a apresentação do respetivo certificado de qualidade de material de acordo com a norma EN 10204.

O material deverá ser armazenado em local abrigado das condições atmosféricas, claramente identificado / etiquetado, afastado de qualquer fonte de contaminação – o procedimento escrito de identificação e etiquetagem a ser implementado é da responsabilidade do fornecedor e deverá encontrar-se acessível para consulta.

Na eventualidade de ser detetada uma imperfeição, esta poderá ser corrigida, contudo, apenas através de um procedimento previamente aprovado pela Efacec Energia.

A árvore de falhas indica um numero grande de possíveis falhas que podem ocorrer para este tipo de componente dado que este processo e um processo muito complicado e requer uma verificação especifica.

Da Figura 26 até Figura 39 apresentam-se os diagramas FTA para restantes componentes (correspondente ao estudo FMECA).

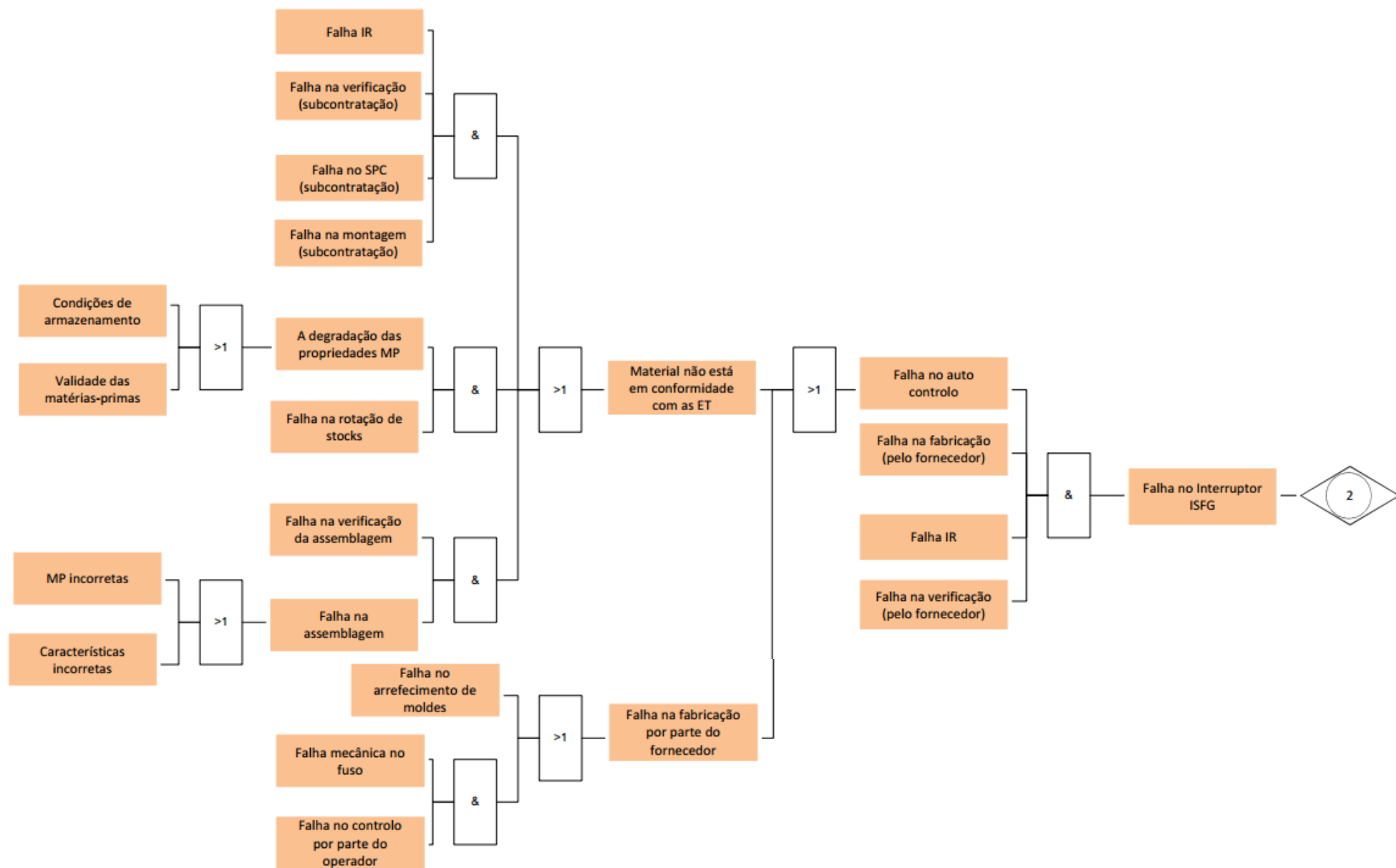


Figura 26 FTA – Interruptor ISFG

O diagrama FTA para o componente disjuntor MT (Ref. 3 correspondente ao estudo FMECA).

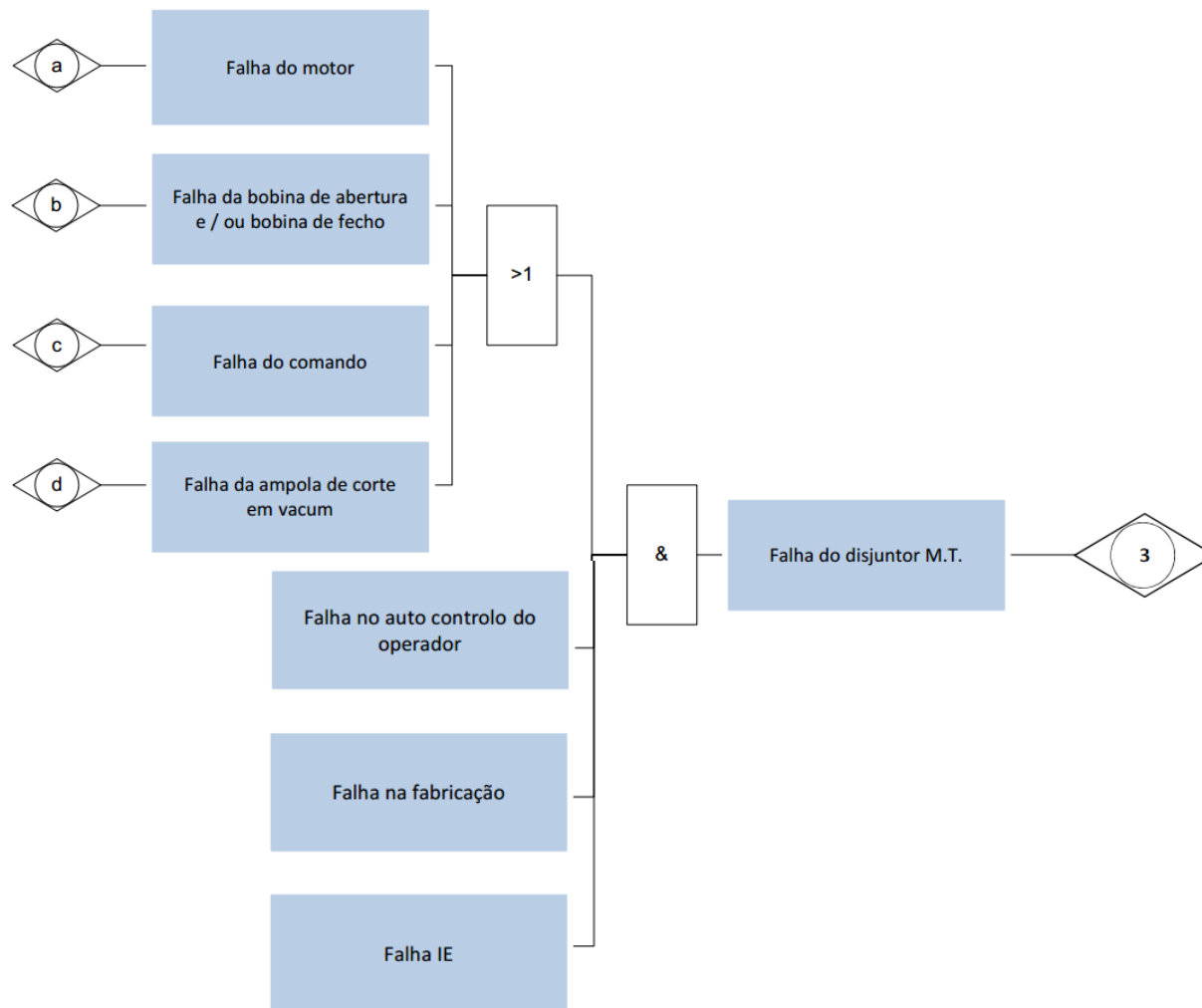


Figura 27 FTA – Disjuntor M.T.

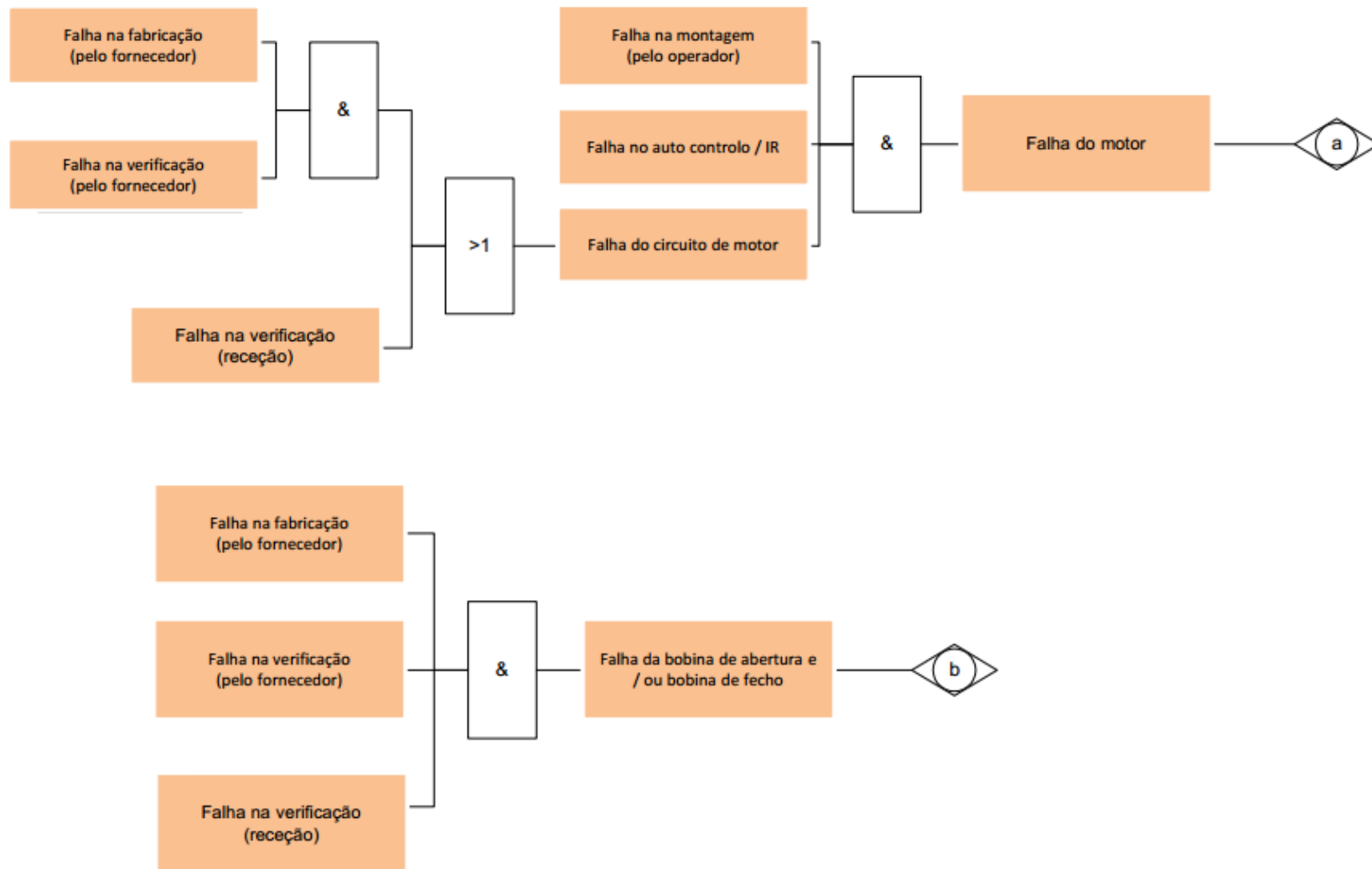


Figura 28 FTA – Motor/bobinas (Disjuntor M.T.)

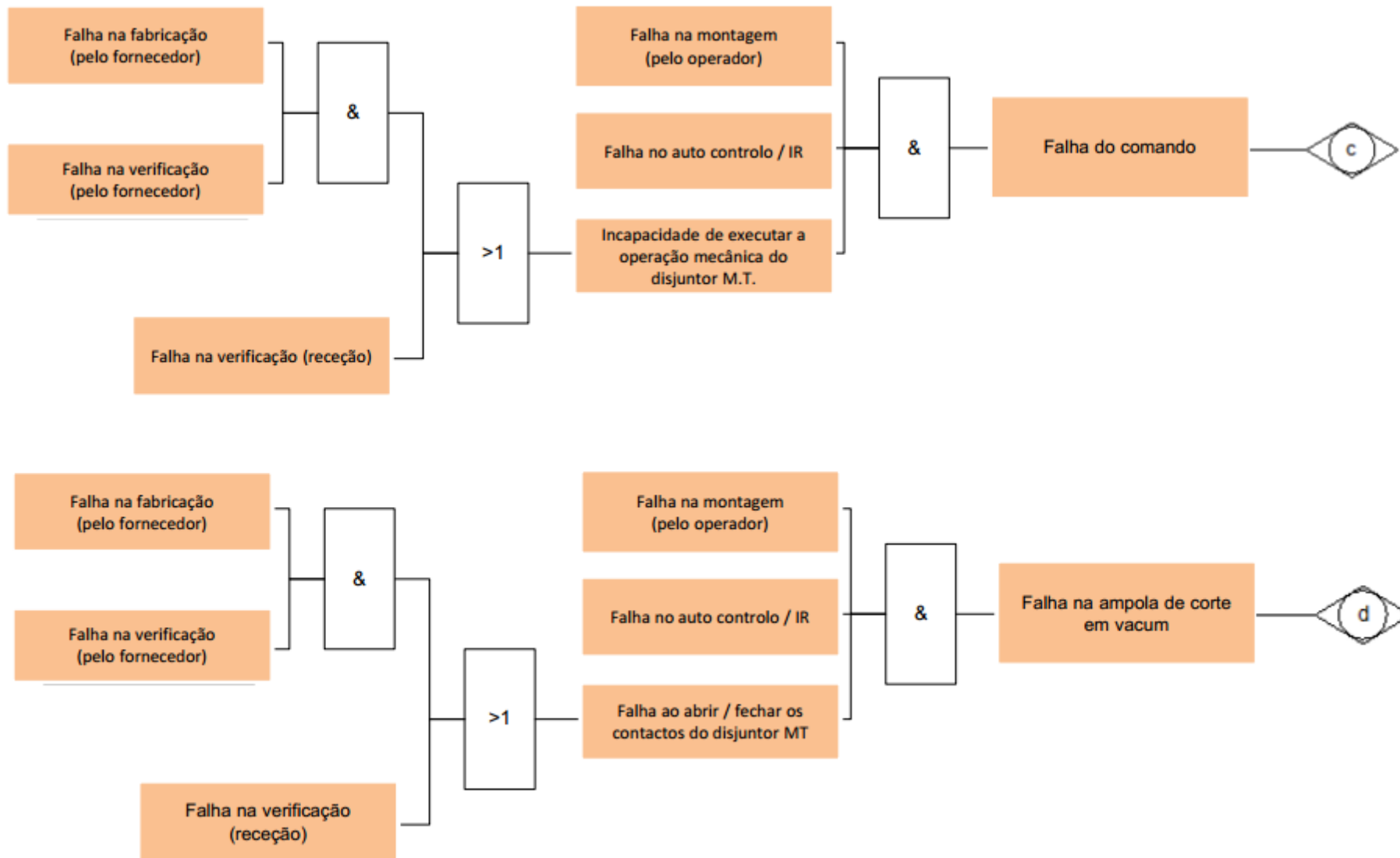


Figura 29 FTA – Comando/ampola (Disjuntor M.T.)

O diagrama FTA para o componente Conjunto de isoladores – condensadores (Ref. 4 correspondente ao estudo FMECA)

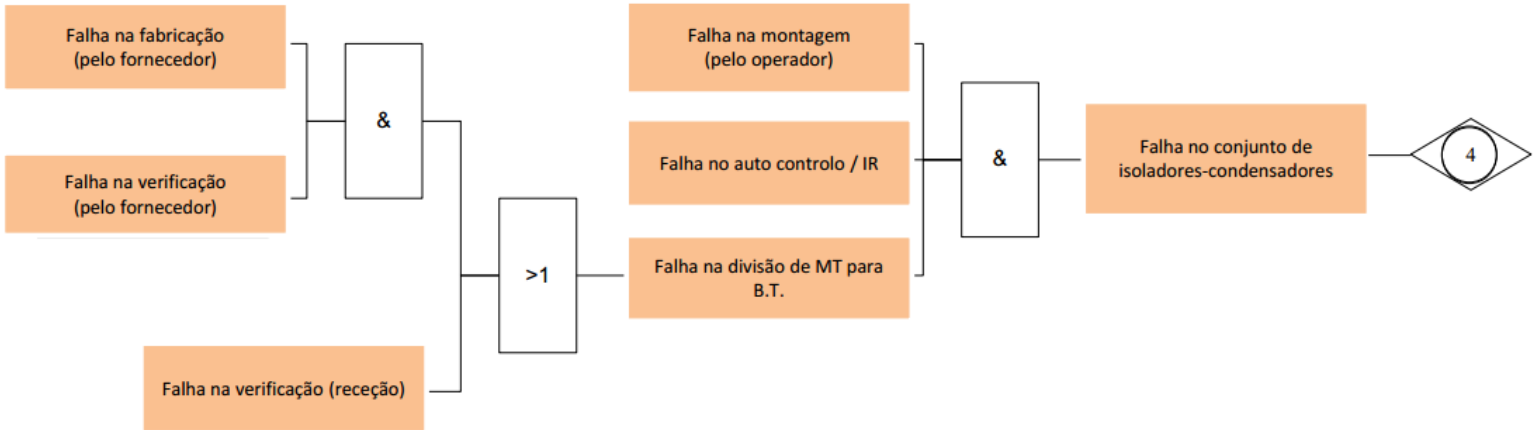


Figura 30 FTA – Isolador Condensador

O diagrama FTA para o componente Indicadores de tensão (Ref. 5 correspondente ao estudo FMECA)

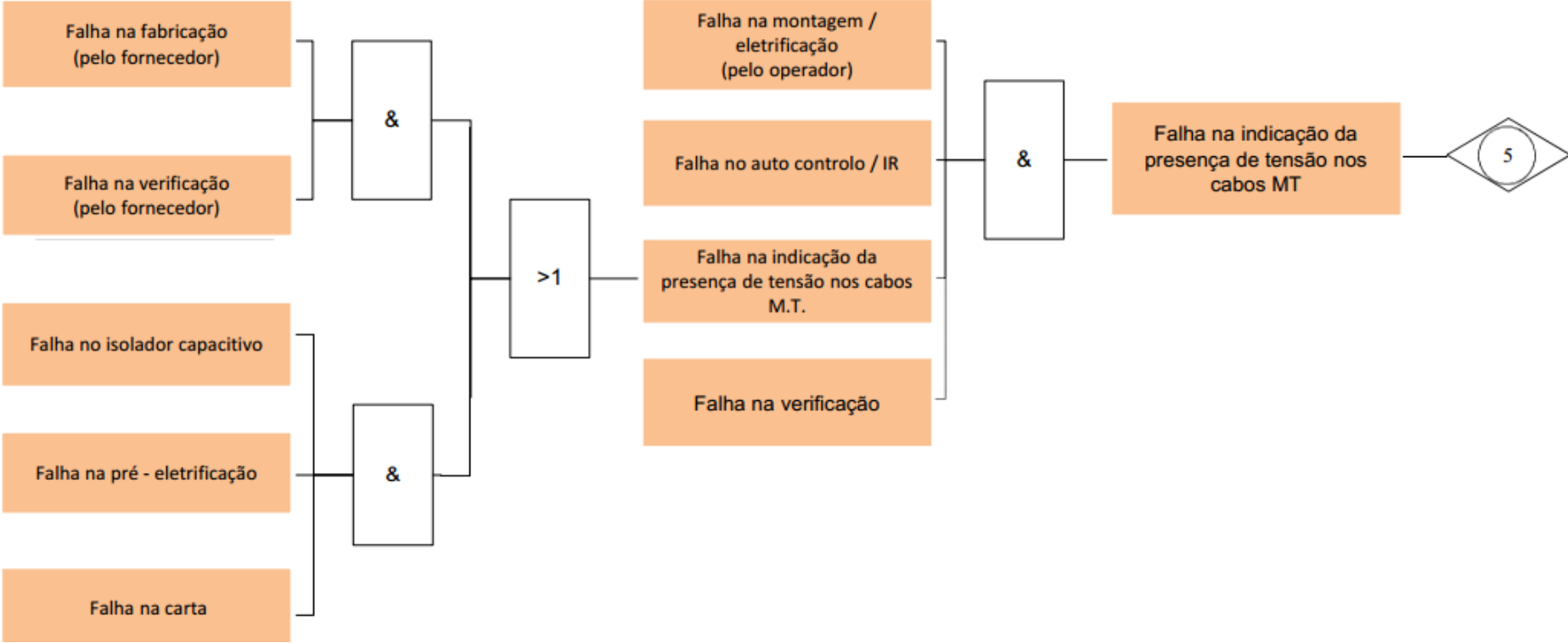


Figura 31 FTA – Indicadores de tensão (nos cabos MT)

O diagrama FTA para o componente *Bushings* (Ref. 6 correspondente ao estudo FMECA)

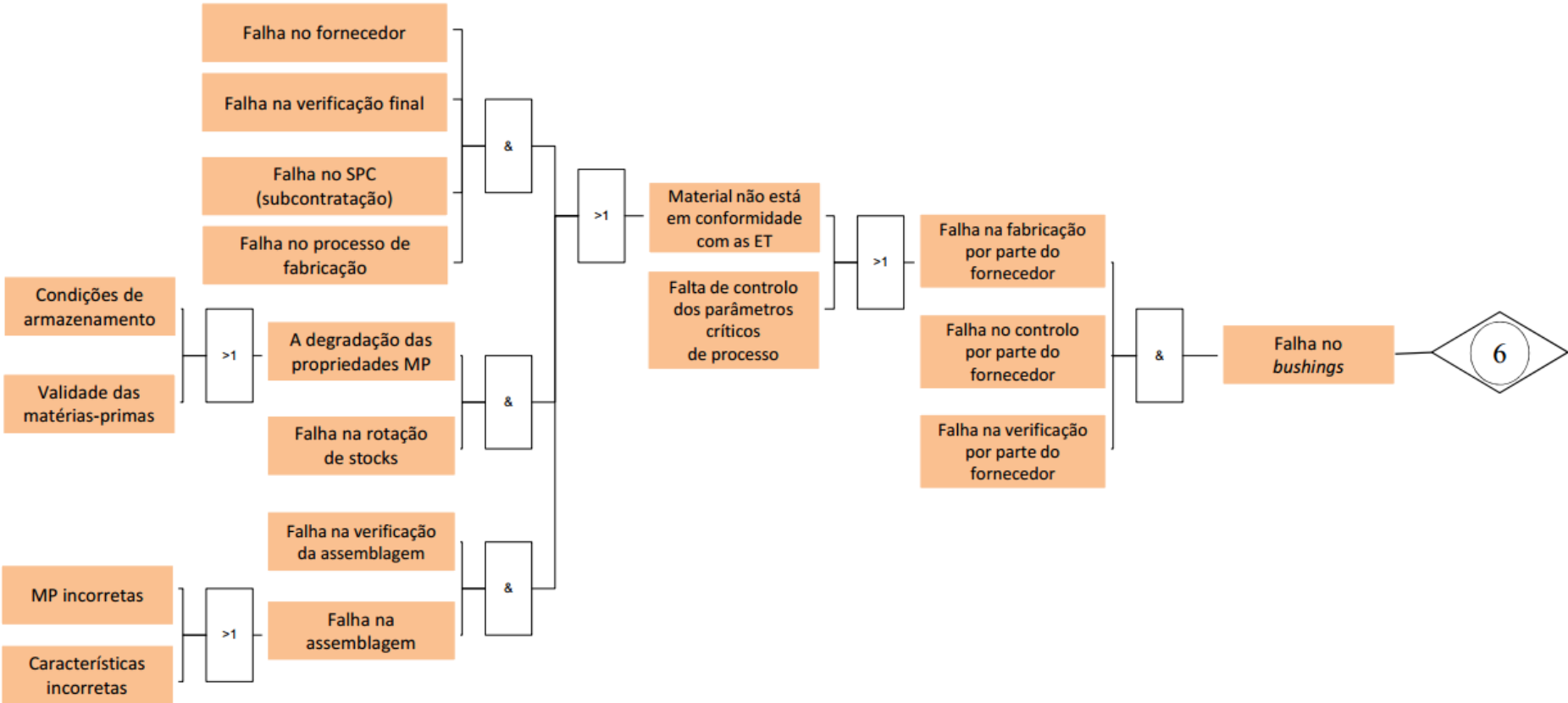


Figura 32 FTA – *Bushings*

O diagrama FTA para o componente Encravamentos Mecânicos (Ref. 7 correspondente ao estudo FMECA)

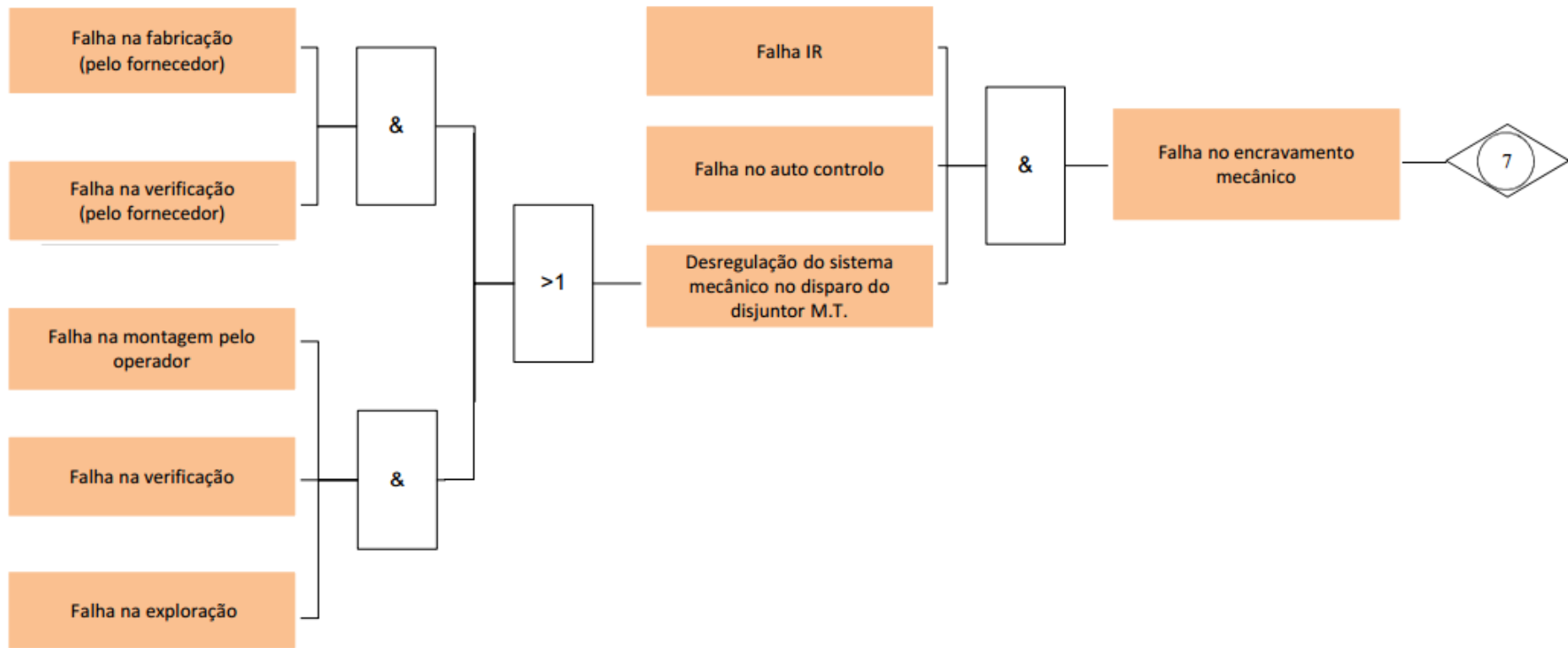


Figura 33 FTA – Encravamentos Mecânicos

O diagrama FTA para o componente Termostato e Resistência de Aquecimento se apresenta a seguir (Ref. 8 e 9 correspondente ao estudo FMECA).

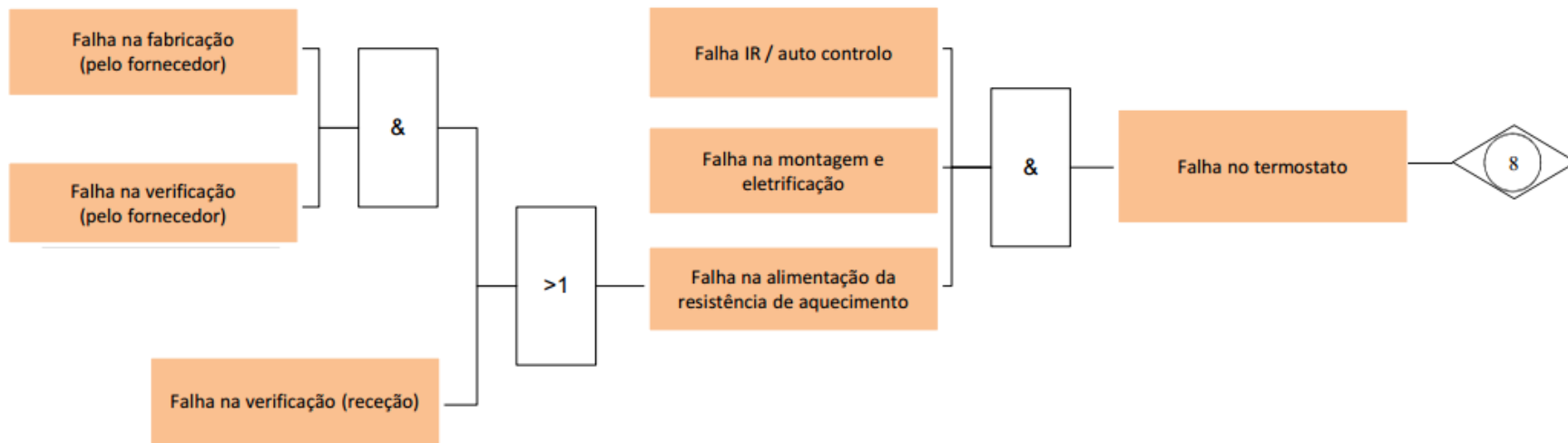


Figura 34 FTA – Termostato

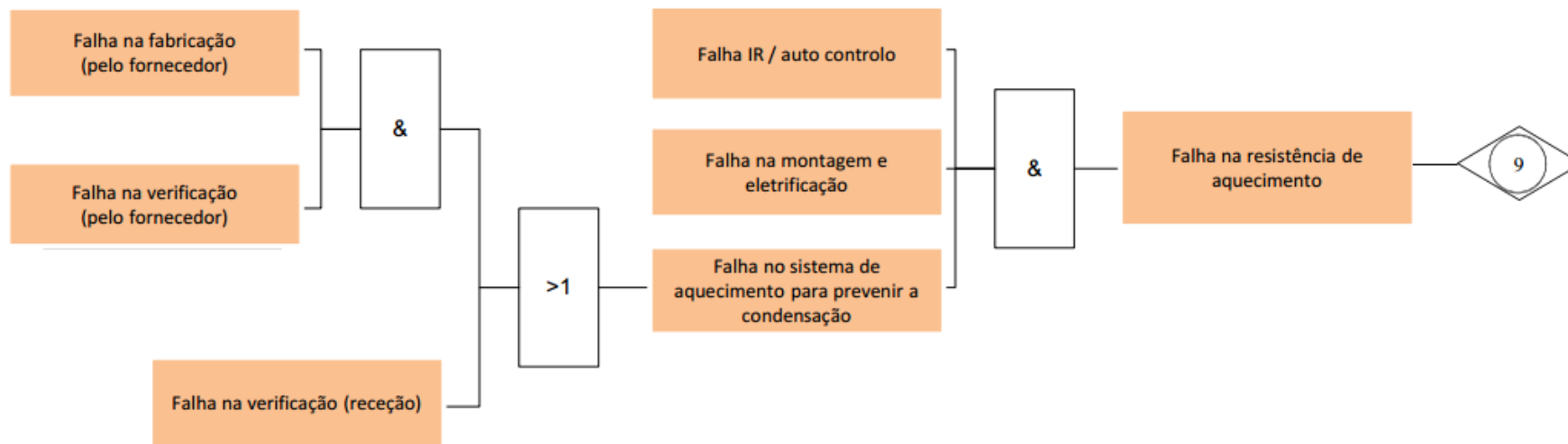


Figura 35 FTA – Resistência de Aquecimento

O diagrama FTA para o componente Disjuntor B.T. (Ref. 10 correspondente ao estudo FMECA)

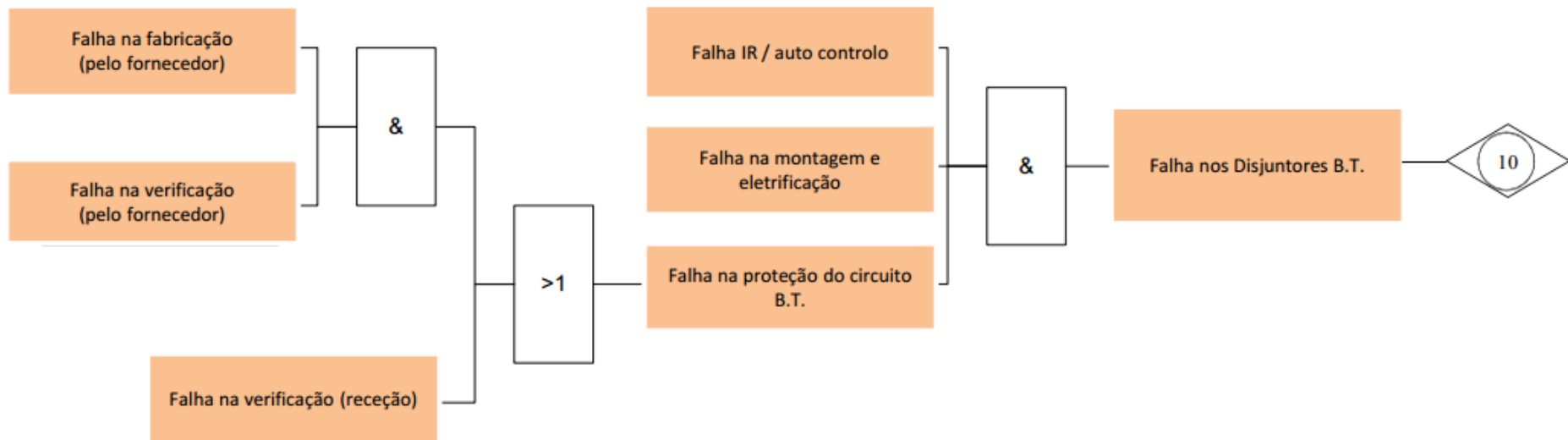


Figura 36 FTA – Disjuntores B.T.

O diagrama FTA para o componente Transformador de corrente (TI) (Ref. 11 correspondente ao estudo FMECA)

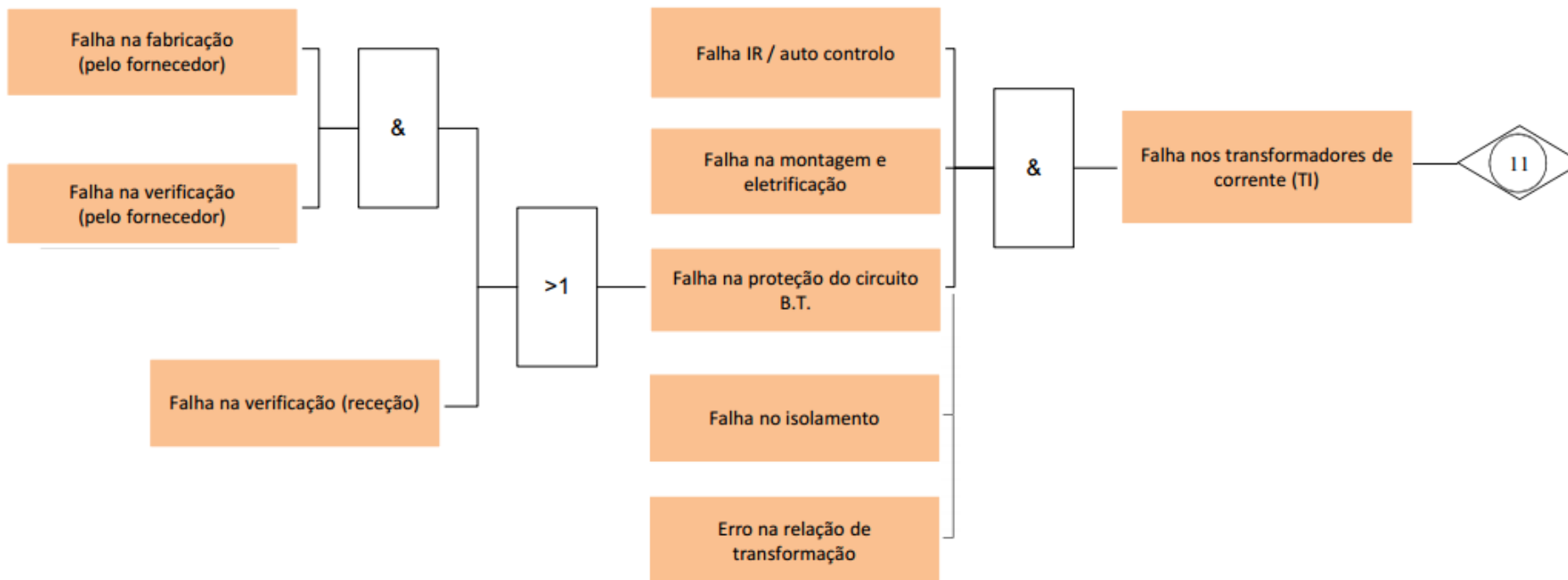


Figura 37 FTA – Transformadores de corrente (TI)

O diagrama FTA para o componente Transformador de tensão (TT) (Ref. 12 correspondente ao estudo FMECA)

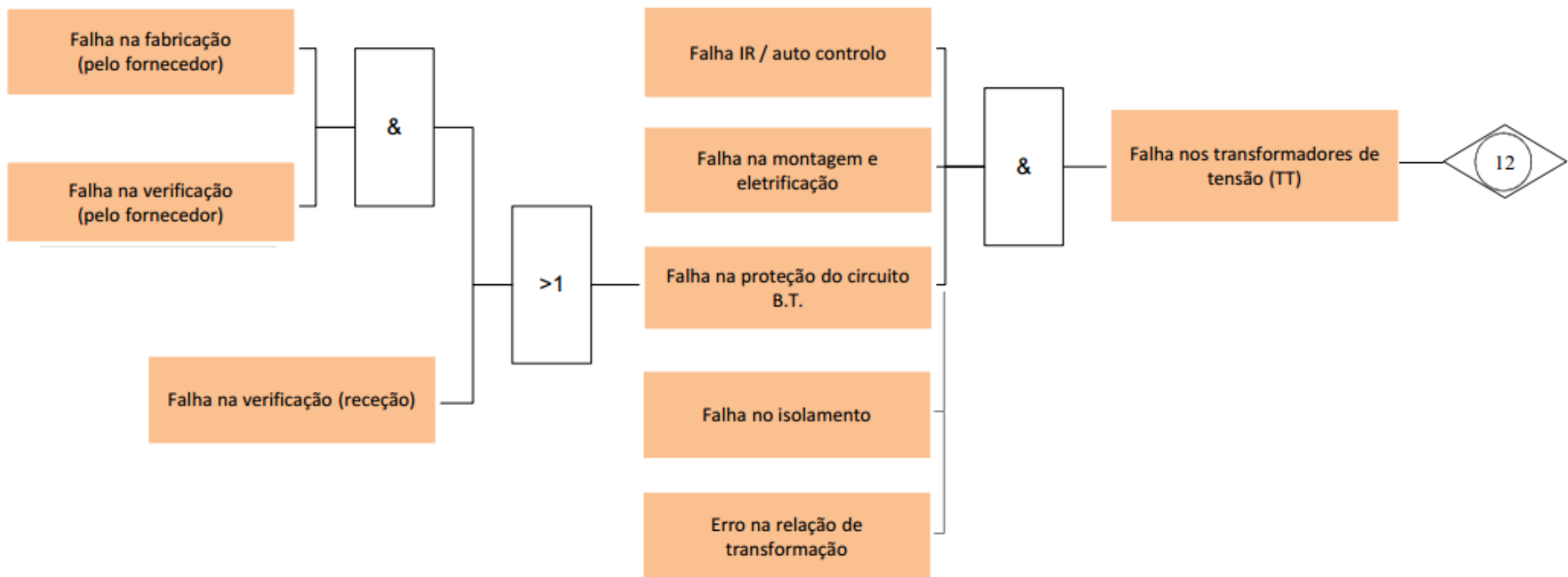


Figura 38 FTA – Transformadores de tensão (TT)

O diagrama FTA para o componente Fusíveis MT (Ref. 13 correspondente ao estudo FMECA)

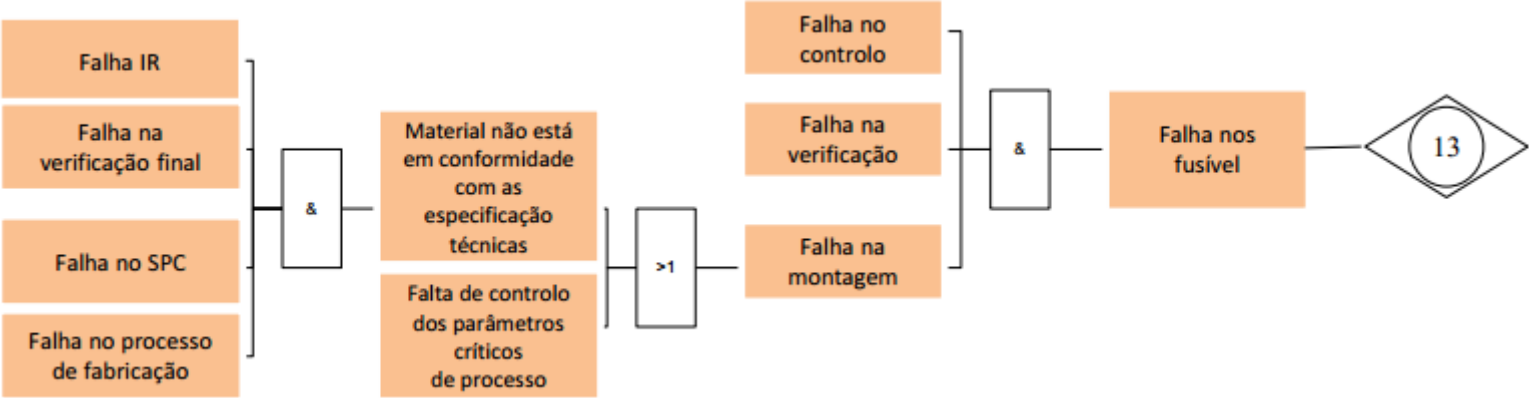


Figura 39 FTA – Fusíveis

Como conclusão final e através da análise dos diagramas acima apresentados podemos identificar os pontos críticos de controlo/mitigação de falhas que são:

- Escolha correta da matéria-prima (MP);
- Autocontrolo, verificação, montagem e exploração;
- Ensaios de rotina;
- Armazenamento das matérias-primas e dos componentes;

Dado que o componente Disjuntor [Figura 27] é composto por vários componentes mais pequenos as diagramas FTA foram desenvolvidos separadamente para cada componente [Figura 28 e Figura 29] e, posteriormente, o conjunto completo.

Após a construção e análise de um conjunto de árvores de falhas de um sistema, a sua implementação e integração num sistema especializado (e.g. software, ferramentas de cálculo) torna-se bem mais simples. Além disso, se o sistema especialista possuir árvores de falhas incorporadas no código (construção, importação, exportação e sistemas de interface para outras ferramentas), permite obter respostas para os problemas de uma forma integrada, rápida e direta. Note-se que isto acontece porque as perguntas que são feitas, vão seguindo as ramificações e, dependendo das respostas, as várias ramificações (possíveis causas) podem ser eliminadas, dado que um modo de falha pode estar em vários pontos, dentro de uma árvore de falhas.

4.9. MEDIDAS PROPOSTAS

Após a análise das falhas e identificadas as causas de defeitos foram propostas medidas corretivas para as falhas com elevada prioridade de risco (RPN). Note-se que é comum, acontecendo também aqui neste caso prático, que algumas medidas são referentes a mais do que um tipo de defeito.

Na Tabela 20 podemos visualizar as medidas propostas para melhoria de processos. Também foi identificado que a maior parte das avarias estão na fase de fabrico, logo, devem ser implementadas medidas prioritárias neste setor.

Tabela 20 Medidas de Melhoria Propostas

Componente	Medidas Propostas
<p>Cuba</p> <p>[Isolamento do circuito de MT em SF6]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os soldadores e operadores de soldadura envolvidos no fabrico das cubas deverão estar qualificados por uma entidade acreditada no âmbito do sistema português da qualidade (IPAC), em conformidade com os requisitos de um referencial normativo internacionalmente reconhecido tal como, EN 287, ISO 9606, AWS D1.1 ou ASME Sec. IX. • Todos os detalhes de soldadura deverão estar validados por uma qualificação de procedimento de soldadura, aprovada em conformidade com um referencial normativo internacionalmente reconhecido, tal como, EN ISO 15614, EN ISO 15613, AWS D1.1 e ASME Sec. IX. • Todos os parâmetros e detalhes de soldadura utilizados pelo fornecedor durante a produção da cuba da aparelhagem de corte deverão estar dentro dos limites de aprovação dos registos de qualificação de procedimento de soldadura. Qualquer alteração dos detalhes ou do processo de soldadura para além dos limites permitidos, deverá ser validada através da realização da qualificação de um novo procedimento de soldadura. • Os procedimentos de soldadura deverão ser qualificados por uma entidade acreditada no âmbito do sistema português da qualidade (IPAC). Por opção da EFACEC Energia – UN Aparelhagem, poderá ser prescindido o envolvimento de um organismo de qualificação acreditado. • Os registos de qualificação do procedimento de soldadura deverão estar disponíveis para consulta da EFACEC Energia – UN Aparelhagem em qualquer momento. • A limpeza das juntas antes de soldadura deverá ser cuidadosamente verificada (a presença de gorduras, lubrificantes ou de qualquer outro contaminante não é permitida). • Formação sistemática aos funcionários ao nível da montagem; • Inspeção na Receção de Materiais (inox, componente para soldadura); • Aumentar a taxa de pressão no caso de ensaio (mas dentro de valores estabelecidas pelas normas).

Várias destas medidas propostas para melhoria de processos já se encontram em fase de aplicação.

Está previsto um estudo mais aprofundado referente ao processo de soldadura das cubas ainda este ano, que vai reunir vários departamentos e analisar as causas de defeito ao pormenor, propondo medidas de melhoria.

Uma das medidas já implementadas tem a ver com o facto de todos funcionários poderem dar a sua opinião referente à melhoria dos processos de fabrico através da intranet [24]. A medida implementada já esta a dar “bons frutos”, tendo sido alguns dos processos já revistos.

Outra medida importante é o desenvolvimento de um *software* para integrar as informações do projeto (funções e especificações) e a partir disto, gerar as árvores de falhas e formulários FMEA/FMECA. O *software* deveria permitir incorporar as informações de campo, como taxa de falhas num banco de dados para cálculo da fiabilidade. Tendo um serviço informatizado, o desenvolvimento dos FMEA/FMECAs e FTAs seria executado em menos tempo, facilitaria o trabalho de atualização dos formulários e também o desenvolvimento das árvores de falhas.

5. CONCLUSÕES

O estudo decorreu de forma bastante positiva, pois foi um contacto com o mundo profissional de uma forma bastante ativa e integrada, com a possibilidade de estudar processos existentes, avaliar a viabilidade e formular propostas de melhoria em condições reais. Foi uma excelente oportunidade de adquirir conhecimentos e hábitos de trabalho na área.

A ligação das várias matérias abordadas ao longo do curso, com a realidade do dia-a-dia, estão a ser extremamente gratificantes pela partilha e aprofundar de conhecimentos o que traz uma maior motivação profissional para continuar esta progressão. Refere-se ainda a satisfação pela importância do trabalho realizado na e para a empresa.

Para uma correta compreensão dos vários tópicos abordados no capítulo de aplicação prática é recomendável a consulta dos Anexos. Estas tabelas ou diagramas de grande dimensão, que sendo essenciais para o tema tratado, não são fáceis de intercalar com as várias partes escritas, podendo levar a que o estudo prático tenha uma dimensão aparentemente menor dimensão devido a esse fator.

Além disso, tentou-se apresentar o conteúdo de forma clara e concisa, dada a elevada quantidade de informação que resultou do estudo essencialmente prático e aplicado desenvolvido ao longo dos primeiros 18 meses.

Como referido o estudo da fiabilidade é muito importante para qualquer empresa que pretende ter sucesso no mercado atual altamente competitivo e exigente.

O cliente cada vez mais tem atenção aos dados históricos de desempenho do produto e experiências dos seus pares com determinado produto e empresa.

Na área da MT e AT onde os equipamentos assumem um papel crítico no funcionamento de uma rede complexa que envolve elevados encargos e penalizações contratuais pela falha de subpartes, o estudo de fiabilidade de cada equipamento deve ser rigoroso e exaustivo de forma a verificar, prever, planear e agir.

Este estudo procurou demonstrar que, por meio do estudo da fiabilidade, utilizando metodologias apropriadas, pode-se criar a estrutura de informação necessária e que permite identificar de uma forma mais fácil e exata os defeitos principais e prioritários e as suas causas, permitindo de seguida tomar decisões sobre o planeamento e aplicação de medidas de correção.

A metodologia RAMS, o procedimento de análise FMECA e a análise FTA são ferramentas de extrema importância no processo de análise de fiabilidade.

O procedimento de análise FMECA é uma ferramenta que foi adaptada para o estudo em causa. Verificamos que pode contribuir para a melhoria dos projetos, para produtos e processos, resultando, melhor qualidade, maior segurança, maior satisfação do cliente e custos reduzidos. Fornece uma base do modo de falha e informações de ação corretiva que podem ser usadas como um recurso em futuros casos como solução de problemas e como uma ferramenta de treinamento para novos engenheiros de qualidade.

Além disso, a FMECA é muitas vezes necessária para cumprir os requisitos de segurança e qualidade, como ISO 9001, QS 9000, ISO / TS 16949, Six Sigma, Boas Práticas de Fabricação da FDA (BPF), Processo de Lei de Gestão de Segurança (PSM), etc.

Identificou-se que as previsões de fiabilidade são realizadas durante a fase de conceção e definição, a fase de projeto e desenvolvimento e da operação e fase de manutenção, a fim de avaliar, definir e melhorar as medidas de fiabilidade de um item.

Previsões de taxa de falha são úteis para várias atividades importantes no projeto e operação de equipamentos elétricos. Estes incluem avaliar se as metas de fiabilidade podem ser alcançadas, a identificação de potenciais pontos fracos do projeto, a avaliação de projetos alternativos e os custos do ciclo de vida, o fornecimento de dados para a fiabilidade do sistema e análise de disponibilidade, apoio logístico, planeamento estratégico e estabelecer objetivos para os testes de fiabilidade.

A metodologia do processo de manutenção e das monitorizações propostas mostrou que com algumas alterações em relação ao modelo praticado na indústria pode-se ter benefícios, procurar aumentar a quantidade de equipamentos sob controlo, por meio da monitorização objetiva e subjetiva, com credibilidade e segurança.

Identificou-se que todos equipamentos em estudo tem um índice de fiabilidade dentro de valor estabelecido pelas normas utilizadas havendo, no entanto, o intuito de melhorar ainda mais os indicadores obtidos.

Conseguiu-se através do trabalho realizado a implementação de várias medidas, de entre as quais se destaca:

- A qualificação dos soldadores em conformidade com um referencial normativo internacionalmente reconhecido, tal como, EN ISO 15614, EN ISO 15613, AWS D1.1 e ASME Sec. IX;
- Validação de todos os detalhes de soldadura em conformidade com um referencial normativo internacionalmente reconhecido, tal como, EN ISO 15614, EN ISO 15613, AWS D1.1 e ASME Sec. IX.
- Verificação / correção de todos os parâmetros e detalhes de soldadura utilizados pelo fornecedor durante a produção da cuba;
- Os procedimentos de soldadura deverão ser qualificados por uma entidade acreditada no âmbito do sistema português da qualidade (IPAC)
- A limpeza das juntas antes de soldadura deverá ser cuidadosamente verificada (a presença de gorduras, lubrificantes ou de qualquer outro contaminante não é permitida).
- Formação sistemática aos funcionários ao nível da montagem;
- Inspeção na Receção de Materiais (inox, componente para soldadura);
- Aumentar a taxa de pressão no caso de ensaio (mas dentro de valores estabelecidas pelas normas).

Uma outra medida importante sugerida (encontra-se em fase de planeamento) consiste no desenvolvimento de um *software* para integrar as informações oriundas do projeto (funções e especificações) eu levaria a uma agilização e simplificação dos processos de recolha, processamento, cálculo e posterior pesquisa de indicadores (atualmente, quando existentes, os softwares são específicos para uma determinada tarefa).

Naturalmente a implementação destas medidas é recente e não existem ainda dados para avaliar o seu impacto nos indicadores de fiabilidade estudados.

Há que referir ainda, que durante o desenvolvimento do estudo, notou-se na revisão bibliográfica, que os autores procuram de forma geral a manutenção preditiva por meio do monitoramento de condição, ou seja, monitorização objetiva, a excelência em manutenção

e, também, que a engenharia de manutenção deve assumir cada dia mais o destino da manutenção, sendo ela responsável pelos procedimentos e planos de manutenção.

Sugere-se, para futuras implementações, avaliar o impacto individual da monitorização objetiva e subjetiva nos índices e nos custos da manutenção, bem como definir que a equipa que irá trabalhar na implementação seja fortemente capacitada no assunto, com plena compreensão de seus propósitos, objetivos e definições, e das ferramentas utilizadas, que no caso são os sentidos humanos.

Referências Bibliográficas

Legislação

- [1] HN 64-S-40 («Appareillage à haute tension 24 kV sous enveloppe métallique et bâtiment préfabriqué pour postes HTB/HTA»).
- [2] HN 64-S-52 («Appareillage insensible à son environnement sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tension assignée égale à 24 kV »).
- [3] IEC 60812 («Analysis techniques for systems reliability – procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) »).
- [4] IEC 61025 («Fault tree analysis (FTA) ») 2006-12.
- [5] IEC 61508 («Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems») 2010.
- [6] IEC 61703 («Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms»). 2001-09.
- [7] IEC 62271-200 («High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV»).
- [8] MIL – HDBK – 338B («Electronic Reliability Design Handbook»). 01 October 1998
- [9] MIL – HDBK – 781 («Handbook for Reliability test Method, Plans, and environments for engineering, development qualification, and production»). 14 July 1987.
- [10] MIL – STD -781D («Reliability testing for Engineering Development, Qualification, and Production»). 17 October 1986.
- [11] NF X 50-500 («Durée de vie et durabilité des biens. Vocabulaire»).
- [12] NF X 60-500 («Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité »).
- [13] NF X 06-501 (« Applications de la statique –Introduction à la fiabilité »).
- [14] NF X 60-510 («Technique d'analyse de la fiabilité des systèmes - AMDE»).
- [15] NF X 60-520 («Prévisions des caractéristiques de fiabilité maintenabilité et disponibilité»).

- [16] NP EN 13306:2007. Manutenção; Terminologia da manutenção. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [17] NP 3003-14. Computadores e tratamento da informação -- fiabilidade, manutenção e disponibilidade. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [18] NP EN 50126:2000. Aplicações ferroviárias – Especificação e demonstração de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança (RAMS). Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

Livros e textos consultados

- [19] F. Maurício Dias (02-2014). Unidade Curricular de Qualidade de Serviço em Sistemas Elétricos de Energia
- [20] V.V. Kosterev, “*Reliability of Technical Systems and Risk Management*” (*Nadezhnost' tehnikeskikh sistem i upravlenie riskom*), Moscow: Moscow Institute of Physics Engineering, 2008, ISBN 978-5-7262-0939-5;
- [21] Filipe José Didelet Pereira, Francisco Manuel Vicente Sena (2012) — Fiabilidade e sua Aplicação à Manutenção, Editor: Publindústria; ISBN: 9789728953997;
- [22] Patrick D.T. O'Connor, David Newton — *Practical Reliability Engineering* – 3 rd Edition, Chichester ; New York : J. Wiley, 1996. ISBN 047196025X;
- [23] Polovko, A. M. (1968). *Fundamentals of Reliability Theory*. Academic Press. - ISBN 5-84157-542-4.

Website

- [24] Introduction to Reliability Concepts, Principles and Applications.
- [25] Rede Intranet Efacec
- [26] *Reliability Engineering e Textbook Library*

Anexo A. Tabela norma HN 64-S-40

Neste anexo é apresentada a tabela com condições descritas na norma francesa HN 64-S-40 [1] que foi utilizada para verificação das condições [Tabela 12].

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 norma HN 64-S-52

Neste anexo é apresentada a tabela com condições descritas na norma francesa HN 64-S-52 [2] que foi utilizada para verificação das condições [Tabela 12].

- 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

Anexo C. Ensaio de fugas no Sistema KONTIKAB


Neste anexo está descrito os pormenores do ensaio de fugas no sistema Automático KONTIKAB [3.2].

IMPORTANTE: Este processo deverá ser efetuado até um máximo de 2 horas após a colocação do tamis molecular no interior da cuba.


ENSAIOS DE DETECÇÃO ("Grossa" e "Fina") DE FUGAS	
1	Colocar a cuba no sistema de vazio / enchimento / detecção de fugas da Kontikab
2	Sistema KONTIKAB EXECUTA o VAZIO (0,1 mbar abs. na câmara e 1,6 mbar abs. na cuba simultaneamente). <i>Nota: A diferença de pressões entre a câmara e a cuba pode ir até 0.4 bar minimizando esforços na cuba</i>
3	Após atingido o nível de vazio, Sistema KONTIKAB VERIFICA a HUMIDADE RESIDUAL <i>Nota: Se o valor da humidade residual provocar um aumento da pressão da cuba superior a 2 mbar, é executado um vazio a um nível superior a 1) e o processo repete-se até o valor da humidade residual estar aceitável</i>
4	Sistema KONTIKAB VERIFICA que Nível Resíduo de Hélio na câmara é INFERIOR a 7×10^{-7} mbar.l/s
5	<i>Se o nível de resíduo for superior devem ser efectuados novos vazios a níveis superiores até o nível de resíduo estar aceitável</i>
6	Detecção Grosseira: Sistema KONTIKAB INJECTA Hélio para o INTERIOR da CUBA
7	<i>Se o nível de fuga for superior a 7×10^{-5} mbar.l/s, o processo é interrompido e todo o sistema é ventilado até à pressão atmosférica, para verificação</i>
8	Detecção Fina: Sistema KONTIKAB INJECTA Hélio para o INTERIOR da CUBA até à pressão de 300 mbar abs.
9	<i>Se for detectada fuga fina (fuga superior a 6×10^{-6} mb.l/s), a cuba é cheia de hélio à pressão de 1300 mbar abs. para posteriormente ser localizada no exterior da câmara por sniffing em toda a superfície da cuba. Após a localização da fuga a cuba regressa à câmara para recuperação do hélio. Não sendo detectada fuga fina, o hélio é retirado para reciclagem e armazenamento.</i>
10	Sistema KONTIKAB INJECTA SF6 na cuba (a pressão é automaticamente corrigida em função da temperatura ambiente)
11	EMISSÃO do Relatório de Ensaio Estanquidade (Ver ANEXO 1)

Anexo D. Processo de funcionamento KONTIKAB


Neste anexo está apresentado a máquina e o funcionamento do sistema Automático KONTIKAB [3.2].


ver. 120613

Modo Manual



Data: 7/5/2012
Tempo: 04:48:24 PM

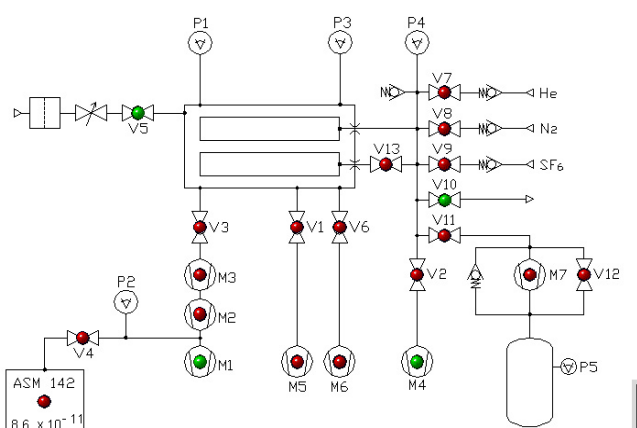


Pressão	
P1:	N/A
P2:	31.4 μ bar A
P3:	1023.8 mbar
P4:	1015.0 mbar

Pressão:	
Pressão de Hélio "Sniffing"	bar
Pressão de Hélio	mbar
Pressão de SF6	bar
Pressão vazio do objecto	1.6 mbar
Pressão vazio He do objecto	1.6 mbar

Temporizadores:	
Evacuar objecto/ Hélio	x 100 ms
Estabilização de enchimento Hélio	x 100 ms
Estabilização de enchimento SF6	x 100 ms

Iniciar processo
Parar processo



He %:	10.0
Coefficient:	9.6 \pm 7
ASM 142:	1.3×10^{-7}
Objecto:	8.9×10^{-6}

Estado do processo		Temperatura: 25.2°C
Vazio da Câmara ...	V	147s
Vazio do Objecto ...	V	103s
Teste de Hélio residual na Câmara ...	V	4s
Enchimento de Hélio no Objecto ...	V	27s
Teste de Fuga ...	V	117s
Evacuação do Hélio do Objecto ...	V	76s
Enchimento de SF6 no Objecto ...	V	85s
Ventilação da Câmara ...	V	34s
Reciclar SF6 das mangueiras ...	V	25s
Processo terminado ...	V	538s

Página de serviço	Nº de objectos: 1 2	Dummy test
Modo "Sniffing"	Operador: operator	
	Produto:	
	Nº Série:	
	Nº Série 2:	
	<input type="button" value="Imprimir (Ok)"/> <input type="button" value="Imprimir (Não Ok)"/>	
Objectos antigos		

