



ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Estudo da Fiabilidade de Sistemas Industriais Críticos**

**JOSÉ MANUEL PALHINHAS RAI**  
(Licenciado em Engenharia Mecatrónica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Professor Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais:

Professor Especialista Pedro Miguel Rodrigues da Costa

Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral

**Outubro de 2018**



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Estudo da Fiabilidade de Sistemas Industriais Críticos**

**JOSÉ MANUEL PALHINHAS RAIO**

(Licenciado em Engenharia Mecatrónica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Professor Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais:

Professor Especialista Pedro Miguel Rodrigues da Costa

Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral

**Outubro de 2018**

# Agradecimentos

A realização deste Trabalho Final de Mestrado apenas foi possível devido à disponibilidade e dedicação prestada pelo Professor Doutor José Sobral, o qual aceitou orientar a elaboração deste documento e que demonstrou ser um grande apoio durante as diversas etapas de desenvolvimento do mesmo.

Agradeço também à TAP Air Portugal, em especial ao Eng. António Ferreira e à TAP Manutenção e Engenharia, pelo acolhimento e apoio prestado no decorrer do meu estágio curricular, efetuado nesta empresa, no qual me foi possível obter os dados necessários para aplicação do tema abordado neste documento.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais pelo apoio incondicional prestado durante todo o meu percurso académico, tendo sido a base de motivação em determinados momentos menos bons.

# Glossário / Lista de Acrónimos /

## Lista de Siglas

### A

ANP – Analytic Network Process

APU – Auxiliary Power Unit

### C

COPRAS – Complex Proportional Assessment

### D

D – Detetabilidade

$D_A$  – Detetabilidade do modo de falha A

$D_B$  – Detetabilidade do modo de falha B

$D_C$  – Detetabilidade do modo de falha C

DFMEA – Design Failure Mode and Effects Analysis

### E

ELECTRE – Elimination Et Choix Traduisant la Réalité

### F

FAA – Federal Aviation Administration

FMEA – Failure Mode and Effects Analysis

FMECA – Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

FMFR – Failure Mode Ratio of Unreliability

### G

GRA – Gray Relational Analysis

### I

IATA – International Air Transport Association

IvIF – Interval-valued Intuitionistic Fuzzy

IvIFN – Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Number

IvIFS – Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set

ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

ITHWD – Interval 2-Tuple Hybrid Weighted Distance

## **M**

MRO – Maintenance, Repair and Overhaul

## **N**

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NB – Narrow Body

## **O**

O – Ocorrência

$O_A$  – Ocorrência do modo de falha A

$O_B$  – Ocorrência do modo de falha B

$O_C$  – Ocorrência do modo de falha C

OEE – Overall Equipment Effectiveness

## **P**

PFMEA – Process Failure Mode and Effects Analysis

$P_L$  – Probability of Loss

## **R**

RI – Risk Isosurface

RPI – Risk Prioritization Index

RPN – Risk Priority Number

## **S**

S – Severidade

$S_A$  – Severidade do modo de falha A

$S_B$  – Severidade do modo de falha B

$S_C$  – Severidade do modo de falha C

## **T**

TAP – Transportes Aéreos Portugueses

TFM – Trabalho Final de Mestrado

TAP M&E – Transportes Aéreos Portugueses – Maintenance and Engineering

## **W**

WB – Wide Body

# Resumo

O correto funcionamento dos equipamentos é essencial para o crescimento e sucesso das empresas que os adquirem, motivo pelo qual a manutenção destes é uma necessidade. No entanto, além de os manter, por vezes é necessário otimizá-los de um ou outro modo por forma a atingir o desempenho pretendido.

A elaboração deste documento contou com a colaboração da TAP Air Portugal, a qual disponibilizou os dados relativos a dois equipamentos, dois fornos de alto vácuo. Para este caso em particular, e por forma a otimizar o funcionamento dos dois fornos, considerou-se vantajoso aplicar uma ferramenta que permitisse identificar medidas que pudessem reduzir o número de avarias nestes bens. Assim sendo, optou-se pela implementação da metodologia *FMEA* aos dados disponibilizados pela empresa. Esta abordagem, além de permitir reduzir a frequência das avarias, permite efetuar a identificação dos sistemas mais críticos dos fornos, tendo por base a análise dos modos de falha associados, aos quais se deverá prestar uma maior atenção.

Para complementar a implementação da metodologia anterior, procedeu-se também à realização de uma análise de Pareto bem como a uma análise geral dos dados disponibilizados pela empresa.

De um modo geral, o trabalho desenvolvido permitiu atingir os objetivos pretendidos. No entanto, devido à existência de dados limitados, não foi possível efetuar um desenvolvimento mais aprofundado do documento.

Palavras chave: Fornos de Alto Vácuo; *FMEA*; Análise de Pareto; Modos de Falha; *RPN*.

# Abstract

The correct functioning of equipments is essential for the growth and success of companies that acquire them, which is why the maintenance of these is a necessity. However, in addition to maintaining them, it is sometimes necessary to optimize them in one way or another in order to achieve the intended performance.

The elaboration of this document had the collaboration of TAP Air Portugal, which made available the data related to two equipment, two high vacuum furnaces. For this particular case, and in order to optimize the operation of the two furnaces, it was considered advantageous to apply a tool that would allow the identification of measures that could reduce the number of failures in these assets. Therefore, it was decided to implement the FMEA methodology to the data made available by the company. This approach, in addition to reducing the frequency of failures, makes it possible to identify the most critical systems of the furnaces, based on the analysis of the associated failure modes, which should receive more attention.

To complement the implementation of the previous methodology, a Pareto analysis was carried out as well as a general analysis of the data made available by the company.

In general, the work carried out has achieved the desired objectives. However, due to the limited data, it was not possible to further develop the document.

Keywords: High Vacuum Furnaces; FMEA; Pareto Analysis; Failure Modes; RPN.

# Índice

Agradecimentos .....	i
Glossário / Lista de Acrónimos / Lista de Siglas .....	ii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Índice .....	vi
Índice de figuras .....	ix
Índice de gráficos .....	x
Índice de tabelas .....	xi
Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1 – Enquadramento .....	1
1.2 – Objetivo .....	1
1.2.1 – Objetivo principal .....	1
1.2.2 – Objetivos específicos: .....	2
1.3 – Estrutura do documento .....	2
Capítulo 2 – Local de estágio .....	4
2.1 – Um pouco de história .....	4
2.2 – TAP Air Portugal - Grupo TAP .....	8
2.3 – Frota .....	8
2.4 – As instalações .....	9
2.5 – TAP <i>M&amp;E</i> .....	10
Capítulo 3 – Metodologia <i>FMEA</i> .....	11
3.1 – O que é a <i>FMEA</i> .....	11
3.2 – Onde é aplicada .....	11
3.3 – Como é realizada .....	11
3.3.1 – Procedimento geral para a aplicação da <i>FMEA</i> : .....	14
3.4 – Vantagens da <i>FMEA</i> .....	15

3.5 – Críticas apontadas à <i>FMEA</i> - Desvantagens .....	15
3.6 – Soluções e propostas às críticas da <i>FMEA</i> e do <i>RPN</i> .....	16
Capítulo 4 – Equipamentos .....	20
4.1 – Descrição geral dos fornos de vácuo .....	20
4.2 – Sistemas que constituem os fornos .....	22
4.2.1 – Sistemas relativos ao forno <i>Schmetz</i> .....	22
4.2.2 – Sistemas relativos ao forno <i>TAV</i> .....	23
4.3 – Ilustração dos constituintes dos fornos .....	24
4.3.1 – Constituintes do forno de alto vácuo <i>Schmetz</i> .....	25
4.3.2 – Constituintes do forno de alto vácuo <i>TAV</i> .....	28
4.4 – Funcionamento geral dos fornos.....	33
4.5 – Ações de manutenção preventiva recomendadas pelo fabricante.....	34
4.5.1 – Ações para o forno <i>Schmetz</i> .....	34
4.5.2 – Ações para o forno <i>TAV</i> .....	35
Capítulo 5 – Estudo de Caso .....	37
5.1 – Registo de intervenções.....	37
5.2 – Abordagem para o tratamento de dados.....	37
5.3 – Análise de Pareto.....	38
5.3.1 – Resultados obtidos da análise de Pareto ao forno <i>Schmetz</i> .....	39
5.3.1.1 – Análise de Pareto ao forno <i>Schmetz</i> – Número de intervenções.....	39
5.3.1.2 – Análise de Pareto ao forno <i>Schmetz</i> – Duração das intervenções, em horas ....	40
5.3.1.3 – Análise de Pareto ao forno <i>Schmetz</i> – Custo das intervenções, em euros.....	42
5.3.2 – Resultados obtidos da análise de Pareto ao forno <i>TAV</i> .....	43
5.3.2.1 – Análise de Pareto ao forno <i>TAV</i> – Número de intervenções .....	43
5.3.2.2 – Análise de Pareto ao forno <i>TAV</i> – Duração das intervenções, em horas .....	44
5.3.2.3 – Análise de Pareto ao forno <i>TAV</i> – Custo das intervenções, em euros .....	45
5.4 – Aplicação da metodologia <i>FMEA</i> .....	46
5.4.1 – Gráficos obtidos relativos ao forno <i>Schmetz</i> .....	52
5.4.2 – Gráficos obtidos relativos ao forno <i>TAV</i> .....	54

5.5 – Análise geral dos dados .....	57
5.5.1 – Análise a cada equipamento por cada ano .....	57
5.5.1.1 – Forno de alto vácuo <i>Schmetz</i> – Ano 2016 .....	58
5.5.1.2 – Forno de alto vácuo <i>Schmetz</i> – Ano 2017 .....	58
5.5.1.3 – Forno de alto vácuo <i>Schmetz</i> – Total dos dois anos, 2016 e 2017 .....	59
5.5.1.4 – Forno de alto vácuo <i>TAV</i> – Ano 2016 .....	60
5.5.1.5 – Forno de alto vácuo <i>TAV</i> – Ano 2017 .....	60
5.5.1.6 – Forno de alto vácuo <i>TAV</i> – Total dos dois anos, 2016 e 2017 .....	61
5.5.1.7 – Comparação geral entre os dois equipamentos .....	62
5.5.2 – Análise a cada equipamento por sistema .....	63
5.5.2.1 – Forno de alto vácuo <i>Schmetz</i> .....	63
5.5.2.2 – Forno de alto vácuo <i>TAV</i> .....	64
Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros .....	66
6.1 – Conclusões .....	66
6.1.1 – Conclusões relativas à análise de Pareto .....	66
6.1.2 – Conclusões relativas à análise <i>FMEA</i> .....	66
6.1.2.1 – <i>FMEA</i> forno <i>Schmetz</i> .....	67
6.1.2.2 – <i>FMEA</i> forno <i>TAV</i> .....	67
6.1.2.3 – Sistemas mais críticos .....	67
6.1.3 – Conclusões relativas à análise de dados .....	68
6.1.3.1 – Ações de caráter preventivo e corretivo .....	68
6.1.3.2 – Ações apenas de caráter corretivo .....	68
6.1.3.3 – Problemas encontrados na empresa .....	68
6.2 – Trabalho a realizar no futuro .....	69
Referências .....	70
Anexo 1 .....	73
Anexo 2 .....	78
Anexo 3 .....	98

# Índice de figuras

Figura 1. Primeiro logótipo da TAP. ....	4
Figura 2. Segundo logótipo da TAP. ....	5
Figura 3. Terceiro logótipo da TAP. ....	5
Figura 4. Quarto logótipo da TAP. ....	7
Figura 5. Quinto, e atual, logótipo da TAP. ....	7
Figura 6. Organização do Grupo TAP. ....	8
Figura 7. Forno de alto vácuo vertical <i>Schmetz</i> . ....	21
Figura 8. Forno de alto vácuo horizontal <i>TAV</i> . ....	21
Figura 9. Constituintes exteriores dos fornos. ....	24
Figura 10. Constituintes exteriores dos fornos. ....	25
Figura 11. Constituintes do forno <i>Schmetz</i> . ....	25
Figura 12. Constituintes do forno <i>Schmetz</i> . ....	26
Figura 13. Constituintes do forno <i>Schmetz</i> . ....	26
Figura 14. Constituintes do forno <i>Schmetz</i> . ....	27
Figura 15. Constituintes do forno <i>Schmetz</i> . ....	27
Figura 16. Constituintes do forno <i>Schmetz</i> . ....	28
Figura 17. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	28
Figura 18. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	29
Figura 19. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	29
Figura 20. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	30
Figura 21. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	31
Figura 22. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	31
Figura 23. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	32
Figura 24. Constituintes do forno <i>TAV</i> . ....	32
Figura 25. Ilustração de uma <i>FMEA</i> com recurso ao <i>software XFMEA</i> . ....	47

# Índice de gráficos

Gráfico 1. Gráfico de Pareto relativo ao número de intervenções no <i>Schmetz</i> .....	40
Gráfico 2. Gráfico de Pareto relativo ao tempo gasto em intervenções no <i>Schmetz</i> . ....	41
Gráfico 3. Gráfico de Pareto relativo ao custo das intervenções no <i>Schmetz</i> .....	42
Gráfico 4. Gráfico de Pareto relativo ao número de intervenções no <i>TAV</i> .....	44
Gráfico 5. Gráfico de Pareto relativo ao tempo gasto em intervenções no <i>TAV</i> . ....	45
Gráfico 6. Gráfico de Pareto relativo ao custo das intervenções no <i>TAV</i> .....	46
Gráfico 7. Percentagens das consequências fornecidas pelos níveis de classificação da Severidade. .....	52
Gráfico 8. Percentagens das causas fornecidas pelos níveis de classificação da Ocorrência. ....	53
Gráfico 9. Percentagens dos modos de falha fornecidas pelos níveis de classificação da Detetabilidade. ....	54
Gráfico 10. Percentagens das consequências fornecidas pelos níveis de classificação da Severidade.....	55
Gráfico 11. Percentagens das causas fornecidas pelos níveis de classificação da Ocorrência. ...	56
Gráfico 12. Percentagens dos modos de falha fornecidas pelos níveis de classificação da Detetabilidade. ....	56
Gráfico 13. Total dos custos, em euros, no forno <i>Schmetz</i> no ano 2016.....	58
Gráfico 14. Total dos custos, em euros, no forno <i>Schmetz</i> no ano 2017.....	59
Gráfico 15. Total dos custos, em euros, no forno <i>Schmetz</i> nos dois anos. ....	59
Gráfico 16. Total dos custos, em euros, no forno <i>TAV</i> no ano 2016.....	60
Gráfico 17. Total dos custos, em euros, no forno <i>TAV</i> no ano 2017.....	61
Gráfico 18. Total dos custos, em euros, no forno <i>TAV</i> nos dois anos. ....	61
Gráfico 19. Custos, em euros, nos dois equipamentos, relativas aos dois anos e às duas tipologias de intervenção. ....	62
Gráfico 20. Custos totais para cada ano e cada forno. ....	62
Gráfico 21. Custos, em euros, no forno <i>Schmetz</i> , em cada sistema. ....	64
Gráfico 22. Custos, em euros, no forno <i>TAV</i> , em cada sistema. ....	65

# Índice de tabelas

Tabela 1: Dados gerais do número de intervenções, tempo e custo, do forno <i>Schmetz</i> .....	39
Tabela 2: Resultados da análise de Pareto, relativa ao número de intervenções, no forno <i>Schmetz</i> . .....	40
Tabela 3: Resultados da análise de Pareto, relativa ao tempo das intervenções, no forno <i>Schmetz</i> . .....	41
Tabela 4: Resultados da análise de Pareto, relativa ao custo das intervenções, no forno <i>Schmetz</i> . .....	42
Tabela 5: Dados gerais do número de intervenções, tempo e custo, do forno <i>TAV</i> .....	43
Tabela 6: Resultados da análise de Pareto, relativa ao número de intervenções, no forno <i>TAV</i> ..	43
Tabela 7: Resultados da análise de Pareto, relativa ao tempo das intervenções, no forno <i>TAV</i> . .	44
Tabela 8: Resultados da análise de Pareto, relativa ao custo das intervenções, no forno <i>TAV</i> ...	45
Tabela 9: Escala para classificação da Severidade. ....	48
Tabela 10: Escala para classificação da Ocorrência. ....	49
Tabela 11: Escala para classificação da Detetabilidade. ....	50
Tabela 12: Escala para classificação do Risco.....	51
Tabela 13: <i>FMEA</i> parcial do forno <i>Schmetz</i> , para exemplificação. ....	51
Tabela 14: Dados relativos ao forno <i>Schmetz</i> no ano 2016.....	58
Tabela 15: Dados relativos ao forno <i>Schmetz</i> no ano 2017.....	58
Tabela 16: Dados relativos ao forno <i>Schmetz</i> nos dois anos.....	59
Tabela 17: Dados relativos ao forno <i>TAV</i> no ano 2016. ....	60
Tabela 18: Dados relativos ao forno <i>TAV</i> no ano 2017. ....	60
Tabela 19: Dados relativos ao forno <i>TAV</i> nos dois anos.....	61
Tabela 20: Dados relativos aos sistemas do forno <i>Schmetz</i> . ....	63
Tabela 21: Dados relativos aos sistemas do forno <i>TAV</i> . ....	64

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 – Enquadramento

A aquisição de equipamentos mais modernos, tecnologicamente mais avançados, colocou um novo desafio às indústrias atuais. A modernização de tais bens, apesar de oferecer muitas vantagens, apresenta as suas desvantagens. Devido à existência de sistemas mais complexos, com uma maior quantidade de componentes mecânicos e eletrónicos, é provável que venham a ocorrer eventuais falhas em alguns destes. Para equipamentos considerados críticos, para uma determinada instalação ou processo produtivo, a existência de falhas poderá levar, por exemplo, a uma paragem parcial ou total de uma linha de montagem. Outra situação possível é o esgotamento do *stock* de produtos para venda ou ainda o incumprimento dos prazos de entrega, podendo originar gastos adicionais. Numa situação onde um equipamento seja considerado crítico será de especial relevância a existência de ferramentas, ou metodologias, que permitam reduzir a probabilidade de ocorrência de tais falhas.

A metodologia *FMEA*, aqui utilizada, permite a análise dos equipamentos selecionados tendo por base os possíveis modos de falha que possam ocorrer nestes. A partir dos modos de falha é possível efetuar uma análise a cada um dos sistemas, que compõem estes bens, com o propósito de determinar qual ou quais aqueles mais críticos para cada equipamento. Com esta abordagem torna-se possível reduzir a probabilidade de ocorrência das causas que provocam os modos de falha bem como reduzir a gravidade das consequências resultantes destes mesmos modos (Pedrosa, 2014).

Um dos motivos da escolha desta ferramenta foi o facto de se conseguir reduzir significativamente o esforço exigido para priorizar os modos de falha que necessitem de ações corretivas (Nguyen, *et al.*, 2016). O facto de promover a melhoria contínua e de permitir às entidades reduzir os custos e aumentar o desempenho foi outra razão pela qual se utilizou esta metodologia (Singh, *et al.*, 2017).

## 1.2 – Objetivo

### 1.2.1 – Objetivo principal

O principal objetivo deste TFM é a seleção e análise de um ou mais ativos físicos, considerados como críticos para uma determinada instalação, e a aplicação da metodologia *FMEA* a estes com o intuito de determinar quais os modos de falha e os sistemas mais críticos.

### 1.2.2 – Objetivos específicos:

- Realização de uma análise de Pareto a cada forno de alto vácuo, por forma a determinar se existem ou não sistemas que possam ser considerados os mais relevantes, ainda antes de efetuar a análise *FMEA*;
- Implementação da *FMEA*:
  - Determinação dos modos de falha que possam existir em cada um dos dois equipamentos;
  - Efetuar a análise dos modos de falha, anteriormente referidos, determinando as suas causas e consequências;
  - Construção das tabelas de severidade, de ocorrência e de detetabilidade e da tabela para classificação do risco;
  - Determinar, através de um critério de priorização dos modos de falha, quais os sistemas mais críticos em cada um dos fornos;
- Efetuar uma análise geral relativa à tipologia e quantidade de intervenções, sua duração e custo.

### 1.3 – Estrutura do documento

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos, os quais se encontram descritos da seguinte forma:

O primeiro capítulo (Introdução) inclui o enquadramento, o objetivo do trabalho realizado e o modo como este documento se encontra estruturado.

O segundo capítulo (Local de estágio) efetua uma descrição do local onde o tema deste Trabalho Final de Mestrado foi implementado.

No terceiro capítulo (Metodologia *FMEA*) é efetuada uma apresentação da abordagem *FMEA*, mais concretamente o que é, onde se pode aplicar, como é implementada e quais as etapas, quais as vantagens e desvantagens desta metodologia e quais as alternativas propostas, por outros autores, aos problemas encontrados perante a aplicação desta. É neste capítulo que se encontra o Estado da Arte.

No quarto capítulo (Equipamentos) são apresentados os equipamentos que foram selecionados para a análise. São também indicados os sistemas pelos quais os equipamentos são constituídos,

ilustrando, através de imagens, os principais constituintes dos fornos. É descrito o funcionamento geral dos equipamentos e são apresentadas as ações de manutenção preventiva recomendadas pelo fabricante de cada um dos fornos de alto vácuo.

O quinto capítulo (Estudo de caso) apresenta os registos, fornecidos pela TAP Air Portugal, das intervenções efetuadas nos dois equipamentos. É também explicado como os dados foram adaptados do seu formato original para um formato compatível e adequado ao estudo a ser efetuado neste trabalho. Antes de ser aplicada a *FMEA* recorreu-se a uma análise de Pareto na tentativa de determinar previamente quais os sistemas, de cada forno, que pudessem ser considerados mais relevantes. Seguidamente foi aplicada a abordagem *FMEA*, a cada um dos fornos de alto vácuo, sendo apresentados os resultados e justificações pertinentes, incluindo tabelas e gráficos, obtidos da aplicação desta abordagem aos dois equipamentos. Para complementar este capítulo foi efetuada uma análise geral dos dados relativos aos registos das intervenções de carácter preventivo e corretivo.

No sexto capítulo (Conclusões e trabalhos futuros) são apresentadas as conclusões de maior relevância resultantes do trabalho efetuado neste TFM. São também indicadas algumas propostas, de trabalhos futuros, que permitem um desenvolvimento do trabalho aqui apresentado.

# Capítulo 2 – Local de estágio

O tema abordado neste documento foi aplicado a uma empresa portuguesa do ramo aeronáutico – TAP Air Portugal. O objetivo era demonstrar a aplicabilidade da metodologia *FMEA* em contexto real. Mais especificamente, o estudo incidiu numa análise de dois fornos, operados por esta empresa, os quais têm como principal função efetuar processos de brasagem e tratamentos térmicos a determinados componentes dos motores das aeronaves.

Segue abaixo uma apresentação da TAP Air Portugal, estruturada da seguinte forma:

- História da TAP;
- O grupo TAP;
- A frota;
- As instalações;
- TAP *Maintenance & Engineering* (TAP M&E).

## 2.1 – Um pouco de história

A TAP (Transportes Aéreos Portugueses) foi criada a 14 de março de 1945, à data denominada de Secção de Transportes Aéreos. Humberto Delgado foi na época o diretor e mentor da fundação. Os dois primeiros aviões, *Dakota DC-3*, são também adquiridos neste ano. O primeiro logótipo da TAP encontra-se abaixo representado na figura 1 (TAP Air Portugal, 2018).



Figura 1. Primeiro logótipo da TAP.

A 19 de setembro de 1946 é inaugurada a primeira rota comercial, entre Lisboa e Madrid, a cargo dos *Dakota DC-3*. Dia 31 de dezembro, deste ano, é também inaugurada a Linha Aérea Imperial, com partida de Lisboa e destino Lourenço Marques. Um ano depois surge a rota entre Lisboa e Porto. É também apresentado o segundo logótipo da TAP, abaixo representado na figura 2 (TAP Air Portugal, 2018).



Figura 2. Segundo logótipo da TAP.

Em 1948 a TAP insere-se na *IATA (International Air Transport Association)* e são inauguradas as novas rotas com destino a Sevilha e Paris. No ano 1949, o *DC-4 Skymaster* passa a efetuar a nova ligação entre Lisboa e Londres.

A TAP é privatizada pela primeira vez no ano de 1953. São também inauguradas duas novas rotas com destino a Casablanca e Tânger. O terceiro logótipo da TAP, na figura 3 representado, é adotado neste ano e utilizado até 1979 (TAP Air Portugal, 2018).



Figura 3. Terceiro logótipo da TAP.

A aquisição do primeiro quadrimotor, o *Lockheed L-1049G Super Constellation*, acontece em 1955, permitindo reduzir significativamente o tempo de voo de Lisboa até Lourenço Marques. É também realizado o primeiro voo de teste da TAP com destino ao Rio de Janeiro, a bordo do *DC-4 Skymaster*.

Em 1961 é inaugurado o Voo da Amizade, com partida de Lisboa e destino Rio de Janeiro, bem como a nova rota entre Lisboa e Goa. Este ano representa a retirada de serviço dos *DC-4 Skymaster*. O primeiro dos aviões *Caravelle VI-R* chega à TAP em julho de 1962, ano em que se iniciam as ligações entre Lisboa e Las Palmas e Santa Maria. Um ano mais tarde são apresentadas três novas rotas, com destino a Frankfurt, Genebra e Munique. Em 1964 é alcançada a marca de um milhão de passageiros transportados pela TAP e são criadas as rotas Lisboa – Bissau e Lisboa – Funchal. A TAP adquire em 1965 um *Boeing 707* e um *Boeing 727* passados dois anos.

Em 1971 são apresentadas três novas rotas com destino a Montreal, Ponta Delgada e Terceira. As instalações da TAP passam a integrar o Aeroporto de Lisboa. O primeiro *Boeing 747-200* é adquirido um ano depois. O *TAPMATIC*, o novo sistema introduzido em 1974, tinha como função efetuar as reservas, o *load-control* e o *check-in*. A TAP foi nesta época a primeira companhia europeia a efetuar revisões completas (manutenção preventiva sistemática) aos reatores *Pratt & Whitney JT9-D*, utilizados pelos *Boeing 747*. A TAP torna-se novamente numa empresa pública em 1975. Passam quatro anos e é implementado um programa de modernização, sendo que uma das medidas é a alteração do nome da empresa para TAP Air Portugal.

A rota de Lisboa com destino a Barcelona é inaugurada em 1980, juntamente com o prolongamento da linha de Milão para Roma. Um ano mais tarde é apresentada a primeira revista de bordo, *Atlantis*. Os primeiros *Boeing 737-200* entram ao serviço em 1983, na companhia dos *Lockheed L-1011-500 Tristar*. Dois anos depois é inaugurada a rota com partida no Porto com destino a Caracas. É também apresentado a 14 de março de 1985 o museu da TAP. O *A310* foi o primeiro avião, da fabricante *Airbus*, a ser adquirido em 1988. Neste ano é introduzido um novo sistema automático para o cálculo de tarifas e emissão de bilhetes. A TAP torna-se na primeira companhia aérea a efetuar comunicações terra-ar via satélite.

Os voos com partida do Porto e com destino a Barcelona e Basileia iniciam-se em 1991. Passados dois anos chegam os *A320-200*. O *A340* e *A319* serão os seguintes a preencher a frota da TAP, nos anos seguintes. O primeiro *website* da TAP foi apresentado ao público em 1996. No ano de 1999 dá-se a introdução dos chamados Voos Azuis, dedicados a não-fumadores, com destino a todas as linhas da Europa e Atlântico Norte.

No ano 2000, a unidade de manutenção e engenharia da TAP é certificada pela Autoridade de Aviação Civil Brasileira e pela Autoridade de Aviação Civil Norte-Americana (*FAA – Federal*

*Aviation Administration*). A TAP recebe, em 2005, o nome de TAP Portugal e é apresentado um novo logótipo, abaixo representado pela figura 4. Este ano é marcado pela inserção na rede da *Star Alliance* (TAP Air Portugal, 2018).

Em 2009 são adquiridos seis novos A320-214.



Figura 4. Quarto logótipo da TAP.

A privatização da TAP acontece em 2015 e é assinado um acordo para a aquisição de novos A330neo. No ano de 2016 é assinado o acordo que permite parcerias estratégicas com três outras companhias, a Azul Linhas Aéreas, a *JetBlue* e a *Beijing Capital*. A Portugália é substituída pela *TAP Express*, constituída por modelos *Embraer 190* e *ATR72-600*. Em 2017 ocorre o lançamento de 14 novas rotas. Em agosto deste ano a companhia volta a receber o nome de TAP Air Portugal, representada pelo logótipo indicado na figura 5 (TAP Air Portugal, 2018).



Figura 5. Quinto, e atual, logótipo da TAP.

## 2.2 – TAP Air Portugal - Grupo TAP

O grupo TAP engloba diversas entidades. O organograma abaixo indicado ilustra a organização da companhia aérea, à data deste documento (TAP Air Portugal, 2018a).

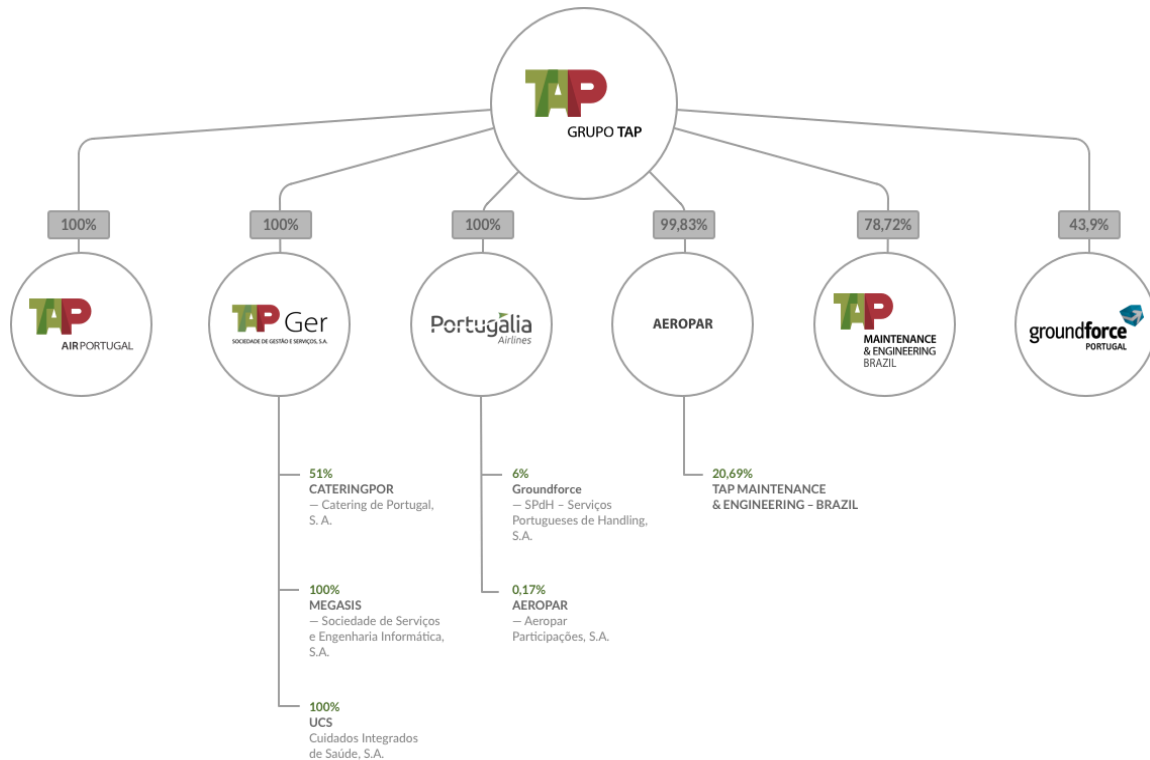


Figura 6. Organização do Grupo TAP.

## 2.3 – Frota

A TAP Air Portugal e a TAP Express, antiga Portugália, são constituídas, em 2018, pelos seguintes modelos (TAP Air Portugal, 2018b):

- A340-300 (4 aviões);
- A330-200 (14 aviões);
- A330-300 (4 aviões);
- A330Neo (21 encomendas);
- A321-200 (4 aviões);
- A321-251N (2 aviões + 4 encomendas);
- A320-200 (20 aviões);
- A320-251N (1 avião);
- A319-100 (21 aviões);
- Embraer 195 (4 aviões);
- Embraer 190 (9 aviões);
- ATR 72-600 (8 aviões).

## 2.4 – As instalações

As instalações de Lisboa são constituídas por 3 *hangares* com uma área de 26 380 m<sup>2</sup> e com capacidade para 3 aviões *WB* (*Wide Body*) e 5 aviões *NB* (*Narrow Body*). A área total das instalações é de 71 200 m<sup>2</sup> (TAP Air Portugal, 2018c).

Serviços efetuados:

- Manutenção de linha;
- Inspeção e manutenção de motores;
- Manutenção de componentes;
- Engenharia e serviços técnicos;
- Outros.

Frota de clientes (Aviões) (TAP Air Portugal, 2018d):

- *Airbus A300-600, A310*, frota de *A320, A320 Neo, A321 Neo, A330, A330 Neo, A340*;
- *Boeing 777*.

Frota de clientes (Motores e *APU* [*Auxiliary Power Unit*]) (TAP Air Portugal, 2018e):

- Motores *CFM56-3, CFM56-5A, CFM56-5B, CFM56-5C, CFM56-7B, CF6-80C2/A/B* e *PW4000-199*;
- *APU APS3200*.

O centro da TAP do Rio de Janeiro, Brasil, tem uma área total de construção de 180 000 m<sup>2</sup>. Possui apenas 1 *hangar*, com 14 500 m<sup>2</sup>, apto para alojar 4 aviões *WB* (TAP Air Portugal, 2018c).

Serviços efetuados:

- Verificações A, B, C, IL e D;
- Pintura de aviões;
- Engenharia e gestão.

Frota de clientes:

- *Boeing B727, B737 CL/NG, BBJ, B767, B777* e *MD11*;
- *Airbus A300-B4, A300-600, A310, A330* e *A340*.

Os 55 000 m<sup>2</sup> de área total das instalações de Porto Alegre, Brasil, alojam 5 *hangares* com 12 500 m<sup>2</sup>, aptos a acolher 1 avião *WB* e 5 aviões *NB* (TAP Air Portugal, 2018c).

Serviços efetuados:

- Manutenção da fuselagem;
- Inspeção completa de trens de aterragem, *APU* e motores *PWC*;

- Manutenção de mais de 17 000 componentes de aviónica e acessórios.

Frota de clientes:

- *Boeing B727, B737 CL/NG, BBJ, B767;*
- *Família Airbus A320;*
- *Embraer EMB 120, ERJ 135/145, E-JET 170/175/190/195 e Legacy.*

## **2.5 – TAP M&E**

A TAP M&E fornece serviços de manutenção, reparação e inspeção (*MRO – Maintenance, Repair & Overhaul*) à frota da *Airbus, Boeing e Embraer*. Esta secção do grupo TAP encontra-se dividida em quatro áreas, como abaixo indicadas (TAP Air Portugal, 2018f):

- *Care<sup>2</sup>Airframe* – Nesta secção é efetuada manutenção base e manutenção de linha, reparações estruturais e modificações e colocação de *sharklets*;
- *Care<sup>2</sup>Engines* – Esta área é responsável pela reparação e revisão de motores da família *CFM 56*, reparação de mais de 80% das partes dos motores, revisão de *APU* e de *thrust reversers*;
- *Care<sup>2</sup>Components* – Aqui é efetuada a reparação, teste e modificação de mais de 15 000 componentes de aviónica, pneumáticos, hidráulicos e mecânicos;
- *Care<sup>2</sup>Engineering* – Nesta área encontram-se a Engenharia e serviços técnicos, soluções de logística, formação, serviços de laboratório e outros.

# Capítulo 3 – Metodologia *FMEA*

## 3.1 – O que é a *FMEA*

O Exército norte-americano foi o primeiro a descrever a *FMEA* que na época tinha a denominação *MIL-P-1629*. No ano de 1980 esta metodologia sofreu alteração da sua nomenclatura e passou a ser conhecida como a norma *MIL-STD-1629A* (Anes, *et al.*, 2018). De acordo com a norma internacional *IEC 60812*, a *FMEA* é definida como um procedimento sistemático direcionado para a análise de um sistema, sendo o seu principal objetivo a identificação e análise dos potenciais modos de falha, das suas causas e das consequências destes no desempenho desse sistema. Quando utilizada em conjunto com a análise de criticidade, à abordagem *FMEA* dá-se o nome *FMECA* (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) (Liu, *et al.*, 2016).

Dependendo do componente ou processo a ser analisado, da fase em que se encontra o processo de produção/desenvolvimento quando a análise é efetuada e/ou se a análise é efetuada no hardware ou nas funções que o componente é suposto cumprir, é possível diferenciar diversos tipos de *FMEA*, entre os quais a *DFMEA* (*Design Failure Mode and Effects Analysis*), *PFMEA* (*Process Failure Mode and Effects Analysis*), *Functional FMEA* e a *System FMEA* (Reliasoft, 2018).

## 3.2 – Onde é aplicada

Em 1960, a *NASA* (*National Aeronautics and Space Administration*) começou a utilizar a *FMEA* nos programas espaciais de alto risco, seguida da aviação civil (Anes, *et al.*, 2018). No entanto, também a indústria biomédica bem como a automóvel tiraram partido desta ferramenta (Kim & Zuo, 2018). A aplicação deste método espalhou-se ainda mais, abrangendo, entre muitas outras, a indústria nuclear, química, metalúrgica, farmacêutica e eletrónica (Nguyen, *et al.*, 2016). Esta abordagem é normalmente aplicada por uma equipa de especialistas de diversas áreas científicas (Certa, *et al.*, 2017).

## 3.3 – Como é realizada

O primeiro passo para aplicar a metodologia *FMEA* é definir os limites do sistema que se pretende estudar, seguindo-se a decomposição hierárquica deste em subsistemas até alcançar os componentes básicos. Posteriormente são identificados todos os potenciais modos de falha de cada um destes componentes, bem como as suas causas e consequências nos outros componentes do mesmo subsistema, no subsistema (consequências locais) e no sistema geral (consequências

gerais) (Certa, *et al.*, 2017). Os modos de falha definem a forma como um determinado sistema ou componente pode vir a falhar na realização das suas funções. As consequências ou efeitos dizem respeito à forma como o cliente final poderá identificar a existência de uma falha. Quanto às causas, são estas as responsáveis pela origem dos modos de falha (Pedrosa, 2014). O passo seguinte será determinar quais os modos de falha que podem ser considerados os mais críticos (Certa, *et al.*, 2017).

A maioria das análises *FMEA/FMECA* utiliza algum método para priorizar os modos de falha. Dois métodos, de frequente utilização, são o *RPN* (*Risk Priority Number*) e a análise de criticidade.

O *RPN* é um sistema de classificação relativo onde o seu valor é obtido através da utilização das tabelas de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detetabilidade (D).

- Severidade – refere-se à gravidade das consequências do maior dano causado no sistema, nas imediações ou em pessoas devido à ocorrência do modo de falha;
- Ocorrência – representa a frequência com que a causa, que origina o modo de falha, ocorre ao longo do tempo;
- Detetabilidade – refere-se à facilidade com que se consegue identificar o modo de falha antes da sua ocorrência (Reliasoft, 2018).

Valores elevados da Ocorrência e da Severidade significam uma elevada frequência de ocorrência de modos de falha e uma elevada gravidade dos danos causados por estes, respetivamente. Em contrapartida, quanto menor o valor da Detetabilidade, maior probabilidade existe em detetar o modo de falha (Certa, *et al.*, 2017).

As escalas de classificação, tendo por base os três fatores (Severidade, Ocorrência e Detetabilidade) referidos anteriormente, variam de 1 a 5 ou de 1 a 10, sendo os critérios, para cada escala, determinados com base nos requisitos do produto/processo em análise. Não é aconselhada a comparação de valores *RPN* entre análises distintas (Reliasoft, 2018). Caso a classificação das categorias se efetue numa escala de 1 a 10, a classificação do *RPN* irá variar entre 1 e 1000, sendo que os modos de falha com a classificação mais elevada devem ser considerados os mais críticos. É de notar que alguns valores do *RPN* nunca serão alcançados, pois as escalas das três variáveis de risco não o permitem (Anes, *et al.*, 2018).

O *RPN*, de cada sistema ou componente, é obtido através da multiplicação dos valores atribuídos às três categorias anteriormente referidas, como indicado na expressão 1.

$$RPN = (S) \times (O) \times (D) \tag{1}$$

Considere-se o seguinte exemplo, com os dados seguintes:

- $S = 8$
- $O = 5$
- $D = 1$

O  $RPN$  é então calculado através da substituição dos dados na expressão 1:

$$RPN = (8) \times (5) \times (1) = 40 \quad (2)$$

O  $RPN$  resultante tem um valor de 40, como observável na expressão 2 (Reliasoft, 2018).

Após determinados os componentes mais críticos, aqueles cujos valores do  $RPN$  seja o maior, devem ser tomadas medidas que promovam a diminuição da frequência da ocorrência dos modos de falha ou, em alternativa, medidas que reduzam a gravidade das consequências causadas por estes (Kim & Zuo, 2018). O  $RPN$  de cada modo de falha terá de ser novamente determinado, pois é necessário perceber se as ações tomadas realmente reduziram, ou não, a classificação  $RPN$  associada a cada modo (Liu, *et al.*, 2016).

Uma alternativa à utilização do  $RPN$  é recorrer à análise de criticidade. Este método é semelhante ao sistema de classificação anterior, no entanto as classificações são efetuadas de um modo distinto. A análise de criticidade tem em consideração a probabilidade de falha para o item e a porção da *failure likelihood* que pode ser atribuída a um modo de falha específico. Para cada modo de falha a criticidade é calculada através da expressão 3:

$$\text{Mode criticality} = \text{expected failures} \times \text{mode ratio of unreliability} \times \text{probability of loss} \quad (3)$$

Descrição das variáveis da expressão 3:

- *Expected failures* – número exetável de falhas num dado tempo de funcionamento, calculado com base nas características de fiabilidade definidas para o item;
- *FMFR (Failure Mode Ratio of Unreliability)* – rácio da *unreliability* do item que pode ser atribuído ao modo de falha em específico. Tenha-se como exemplo um item com quatro modos de falha. Então, 40% das falhas podem ser explicadas pelo primeiro modo de falha, 30% pelo segundo e 15% por cada um dos outros dois;
- $P_L$  (*Probability of Loss*) – probabilidade de o modo de falha causar uma falha no sistema ou uma perda significativa. Indica a gravidade das consequências da falha e pode ser apresentada com base na escala seguinte:
  - Perda efetiva = 100%;
  - Perda provável = 50%;

- Perda possível = 10%;
- Sem perda = 1%.

Tenha-se como exemplo os seguintes dados, para a análise de criticidade de uma *FMEA* parcial de uma bateria:

- *Expected failures* = 0.0435;
- *FMFR* = 0.25;
- $P_L = 1$ .

Substituindo os valores na expressão 4 obtém-se o seguinte valor para a criticidade:

$$\text{Mode Criticality} = 0.0435 \times 0.25 \times 1 = 0.010875 \quad (4)$$

Pela expressão 4 observa-se a obtenção de um valor de 0.010875 para a criticidade deste modo. À semelhança do *RPN*, quanto maior for o valor da criticidade mais crítico é o modo em questão (Reliasoft, 2018).

É difícil prever quais as falhas que podem ocorrer, especialmente na fase de desenvolvimento de um produto, razão pela qual uma falha é analisada do ponto de vista do modo de falha, ou seja, da forma como o produto deixa de cumprir a função para o qual foi projetado. A *FMEA* permite, deste modo, prevenir eventuais falhas e ao mesmo tempo aumentar a fiabilidade do sistema (Kimita, *et al.*, 2018).

### 3.3.1 – Procedimento geral para a aplicação da *FMEA*:

- Item/Processo – Identificar o item ou o processo a ser sujeito à análise;
- Funções – Identificar as funções que o item ou processo é suposto realizar;
- Falhas – Identificar os modos de falha, possíveis de ocorrer, que possam impedir o cumprimento das funções, por parte do item ou processo;
- Consequências da falha – Identificar as consequências resultantes da ocorrência de cada modo de falha;
- Causas da falha – Identificar as causas que podem provocar cada um dos modos de falha;
- Controlos – Examinar os mecanismos de controlo que têm como função eliminar ou mitigar a probabilidade da ocorrência de falhas;
- Ações recomendadas – Identificar as ações necessárias para a eliminação ou mitigação do risco;
- Priorizar medidas – Identificar quais os modos de falha aos quais, de acordo com normas estabelecidas pela organização, deverá ser dada maior atenção, efetuando para tal uma priorização destes. O *RPN* e a análise de criticidade são dois métodos usuais para este processo;

- Outros detalhes – Durante a análise, podem ser considerados outros aspetos, tal como o modo funcional quando a falha ocorre;
- Relatório – Elaborar o relatório da análise efetuada. Se aplicável, a análise de criticidade pode ser incluída numa tabela, em separado (Reliasoft, 2018).

### 3.4 – Vantagens da *FMEA*

Os resultados apresentados numa análise *FMEA* podem ser utilizados em relatórios, na melhoria contínua ou em abordagens preventivas. Estes dados permitem a redução dos custos de manutenção e de garantia dos produtos e possibilitam um aumento do ciclo de vida destes. Um aspeto importante da *FMEA* é que permite a redução da quantidade de testes que são necessários realizar para avaliar a fiabilidade de um sistema, o que resulta na redução dos custos iniciais de um projeto (Anes, *et al.*, 2018). Quando corretamente executada, esta metodologia pode prevenir ou antecipar falhas e reduzir os custos e o tempo de desenvolvimento dos produtos, estando também apta para melhorar a qualidade e a segurança destes (Liu, *et al.*, 2016). Outra vantagem desta ferramenta é a possibilidade de estabelecer um plano de ação preventiva para um determinado produto ou equipamento (Erbiyik & Can, 2016).

Com a objetivo de dar a conhecer a relevância da aplicação da *FMEA*, no contexto da indústria da produção, Singh *et al.* (2017) utilizaram esta abordagem para a análise dos modos de falha numa dada empresa. Estes autores aplicaram esta ferramenta, antes e depois de terem sido tomadas as ações necessárias para resolver ou mitigar os problemas encontrados, e chegaram à conclusão que, após a aplicação da *FMEA* a produção tinha aumentado cerca de 42.08%. Com este resultado os autores conseguiram transmitir a importância que esta ferramenta pode ter num contexto real de aplicação.

### 3.5 – Críticas apontadas à *FMEA* - Desvantagens

Apesar das diversas vantagens do *RPN* na priorização dos modos de falha, existem, no entanto, vários aspetos negativos associados a esta abordagem. Um deles é a natureza da equação do *RPN*, sendo esta uma função não-injetiva e não-sobrejetiva.

Outro aspeto é o facto de, para diferentes valores da Severidade, Ocorrência e Detetabilidade, ser possível obter um mesmo valor *RPN*. Isto significa que modos de falha diferentes podem ter a mesma classificação *RPN*, o que torna a priorização num processo ambíguo (Anes, *et al.*, 2018). Tenha-se como exemplo os três modos falha seguintes A, B e C, cujas classificações são ( $S_A = 8$ ,  $O_A = 5$ ,  $D_A = 4$ ), ( $S_B = 10$ ,  $O_B = 4$ ,  $D_B = 4$ ) e ( $S_C = 5$ ,  $O_C = 4$ ,  $D_C = 8$ ). O *RPN* para cada um dos três modos de falha anteriores é 160, contudo as classificações das variáveis de risco para cada modo de falha são distintas (Nguyen, *et al.*, 2016). Este é principal motivo pelo qual diversos

investigadores indicaram que seria necessário ter em consideração a importância relativa das variáveis de risco, sendo que o peso de cada variável pode variar de acordo com o caso de aplicação.

Outra questão relacionada com a abordagem tradicional do *RPN* é a dificuldade em avaliar corretamente as variáveis de risco S, O e D associadas a cada modo de falha, pois nem sempre os dados são os mais completos e precisos (Anes, *et al.*, 2018). Estas variáveis são avaliadas tendo por base escalas ordinais discretas, no entanto são interpretadas como sendo classificações cardinais (Liu, *et al.*, 2016). Também a equipa que realiza a análise *FMEA* pode não estar apta para avaliar corretamente cada variável devido à falta de experiência ou conhecimento (Anes, *et al.*, 2018).

A expressão 1 utilizada para o cálculo do *RPN* faz uso da multiplicação, contudo não existe nenhuma razão que aponte que esta seja a melhor abordagem. Também os fatores económicos são deixados de parte, sendo o *RPN* apenas dirigido a parâmetros de segurança (Certa, *et al.*, 2017). Ainda assim, o *Risk Priority Number* continua a ser vastamente utilizado devido à sua grande facilidade de aplicação, quando comparado com outras alternativas existentes (Anes, *et al.*, 2018).

### **3.6 – Soluções e propostas às críticas da *FMEA* e do *RPN***

Com o objetivo de ultrapassar as desvantagens da abordagem *RPN* tradicional, Anes *et al.* (2018) propuseram um novo modelo para a priorização do risco, o qual utiliza 2 funções, a função *RI* (*Risk Isosurface*) e a função *RPI* (*Risk Prioritization Index*). A função *RI* efetua a priorização dos modos de falha de acordo com a ordem de importância dada às variáveis de risco, num determinado cenário. Por outro lado, a função *RPI* realiza a priorização dos modos de falha considerando os pesos associados a estas variáveis, de acordo com o cenário em questão. O modelo proposto é de fácil utilização, não requer conhecimento prévio adicional por parte dos utilizadores e apresenta duas características importantes, a injetividade e a sobrejetividade. A metodologia foi aplicada a um caso de estudo e os resultados corresponderam às expectativas dos autores, tendo-se ultrapassado as desvantagens da abordagem *RPN* tradicional. Os autores aconselham, no entanto, a uma investigação mais aprofundada de modo a caracterizar completamente o modelo proposto.

Certa *et al.* (2017) propuseram uma abordagem alternativa ao *RPN* tradicional. Os autores utilizaram o método *ELECTRE TRI* (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité TRI*) para classificar os modos de falha em classes de risco predefinidas e ordenadas, do risco mais elevado para o mais baixo. Este método permitiu considerar a importância relativa das variáveis de risco, bem como a incerteza na atribuição de cada modo de falha a uma classe de risco específica. Os

modos de falha foram avaliados, para cada critério, numa escala de 1 a 10. Foi depois utilizado um processo de atribuição de 2 fases. Numa primeira fase desenvolveram-se as *outranking relations* entre cada alternativa e perfil de referência. Na fase seguinte exploraram-se as *outranking relations* de modo a decidir a categoria de risco à qual os modos de falha deveriam ser atribuídos. Os autores afirmam que os resultados da metodologia proposta, utilizando o método *ELECTRE TRI*, apresentam a classificação dos modos de falha dispostas em categorias de risco, de modo a que seja possível identificar quais os modos de falha que requerem ações corretivas de acordo com a prioridade requerida pela classe a que eles pertencem.

Liu *et al.* (2016) propuseram uma metodologia para a classificação do risco baseada nas *interval two-tuple linguistic variables* e no método *ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)*. A metodologia proposta tinha como objetivo melhorar a exatidão da ferramenta *FMEA*. Numa primeira etapa foi utilizado o *interval two-tuple* para a representação das *linguistics ratings* dos modos de falha, para cada parâmetro de risco. Posteriormente os autores aplicaram o *hybrid averaging operator* para dispor a classificação do risco, fornecida por cada um dos membros da equipa *FMEA*, numa matriz de classificação geral. A etapa seguinte, que tinha como função refletir a importância relativa dos parâmetros de risco, foi utilizar o *combination weighting method*. Este método considerou simultaneamente os pesos, subjetivos e objetivos, dos parâmetros de risco. Os autores desenvolveram, como último passo, o método *ELECTRE* de modo a calcular o *total risk priority ranking* dos modos de falha individuais da *FMEA*. De modo a demonstrar a capacidade da metodologia proposta, foi utilizado um caso de estudo na área da saúde. Os resultados corresponderam às expectativas dos autores.

Com a finalidade de avaliar e classificar o risco dos modos de falha no contexto *IvIF (Interval-valued Intuitionistic Fuzzy)*, Wang *et al.* (2016) propuseram uma nova abordagem à metodologia *FMEA*, na qual é aplicado o algoritmo *ANP (Analytic Network Process)* e o método *COPRAS (COmplex PROportional ASsessment)*. Os autores referem que esta abordagem se encontra bem estruturada e que ultrapassa os maiores obstáculos da *FMEA* tradicional. Nesta metodologia, a informação requerida para a classificação do risco é fornecida em termos linguísticos, através da equipa encarregue da realização da *FMEA*, sendo depois representada como *IvIFN (Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Number)*. O próximo passo é utilizar o algoritmo *IvIF-ANP* para calcular os pesos dos *risk factors* e *sub-risk factors*, tendo em consideração a sua independência. Por último aplica-se o método *IvIF-COPRAS* para determinar as classificações de risco dos modos de falha, tendo em consideração a importância relativa dos parâmetros de risco. Os autores aplicaram o modelo proposto a um caso prático, na área da saúde, sendo que os resultados evidenciaram o bom desempenho deste modelo.

Zhao *et al.* (2017) propuseram uma nova abordagem à *FMEA* tendo por base *IvIFS* (*Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set*) e o método *MULTIMOORA*. O objetivo da metodologia proposta era encontrar uma solução para a incerteza demonstrada pela equipa *FMEA*, durante a fase de classificação dos modos de falha. A nova abordagem pretendia também obter classificações mais precisas dos modos, identificados através da *FMEA*. No modelo proposto, os autores trataram os parâmetros de risco como variáveis *IvIF*, tendo sido avaliadas em termos linguísticos e não com base em valores numéricos. A determinação dos pesos dos parâmetros de risco foi efetuada pelo método *continuous entropy weighted*. Este permite obter o peso de cada parâmetro de uma forma clara e objetiva. Por último, os autores aplicaram o método *extended IvIF-MULTIMOORA* para determinar as prioridades de risco dos modos de falha e para proceder à identificação dos modos mais críticos. A abordagem foi aplicada num processo de produção de chapas de aço. Os resultados obtidos permitiram à empresa identificar, com sucesso, quais os modos de falha mais críticos, possibilitando a tomada de medidas.

A metodologia *extended index ERP*, proposta por Nguyen *et al.* (2016), propõe a utilização da ferramenta tradicional *RPN*, utilizada na *FMEA*, considerando também os custos de qualidade associados bem como a capacidade do sistema de deteção de falhas. Os autores consideram a adição dos custos e do sistema um fator importante para o desenvolvimento de qualquer empresa. Para testar a abordagem proposta foi utilizado um caso empírico. Os resultados indicaram que, com esta nova abordagem, foi possível reduzir significativamente a percentagem de produtos defeituosos de 2.41% para 1.13 %. Os autores concluem que a metodologia proposta pode ultrapassar parte das desvantagens associadas ao *RPN* tradicional. Estes consideram também relevante que haja posteriores investigações, relativas à metodologia *ERP*, testando esta abordagem em mais áreas de aplicação com o objetivo de confirmar, com maior certeza, a sua eficácia.

Silva *et al.* (2016) propuseram um modelo com o objetivo de identificar os parâmetros de risco e a incerteza associada à propagação de vulnerabilidades. O modelo proposto é constituído pela ferramenta *FMEA* e pela *Grey Theory*, a qual utiliza a *GRA* (*Grey Relational Analysis*). A abordagem proposta apresenta uma metodologia bem estruturada que considera o impacto dos parâmetros de risco dos *big data*, permite uma fácil classificação dos modos de falha destes e possibilita às empresas diminuir o risco associado aos *big data*.

Foi proposta por Jiang *et al.* (2016) uma metodologia com intuito de classificar o risco quando não pode ser utilizada a *Dempster's combination rule*. Os autores referem que a aplicação de um coeficiente de fiabilidade, baseado na *evidence distance*, é o fator principal desta abordagem. O modelo proposto foi aplicado a exemplos numéricos especialmente concebidos para este caso e

foi realizada uma análise de diversos componentes mecânicos. Os resultados obtidos revelaram que a abordagem proposta cumpre a sua função corretamente.

Chong *et al.* (2015) desenvolveram uma abordagem denominada *maintenance-FMEA*. O principal objetivo desta metodologia era melhorar o *OEE (Overall Equipment Effectiveness)* de um equipamento. A abordagem *maintenance-FMEA* proporciona uma maior especificação dos modos de falha, sendo também um método mais compreensivo que a ferramenta tradicional *FMEA*. Os resultados obtidos da aplicação deste modelo proporcionam a informação necessária para auxiliar na priorização das ações corretivas que devem ser implementadas, tendo por base a metodologia adotada na empresa. A aplicação das medidas de correção aumentou a disponibilidade do equipamento e o *OEE* pretendido foi alcançado.

Liu *et al.* (2014) propuseram uma nova metodologia para a priorização dos modos de falha, a qual utiliza o *ITHWD (Interval 2-Tuple Hybrid Weighted Distance)*. O modelo proposto pretende ultrapassar as limitações e melhorar o desempenho da *FMEA* tradicional. Este está apto a ser aplicado num ambiente de incerteza e onde exista falta de informação. O *interval 2-tuple linguistic representation model* é utilizado para tratar a informação, que pode ser incerta ou diversificada, fornecida pela equipa *FMEA*. O *ITHWD* é depois utilizado para classificar todos os modos de falha identificados através da análise *FMEA*. Durante a classificação de risco, os pesos, objetivos e subjetivos, dos parâmetros de risco, foram simultaneamente considerados de modo a combinar as propriedades mais desejadas de cada *weighting method*. A metodologia proposta foi aplicada a um caso real na área da saúde. Os resultados demonstraram que a abordagem proposta pode ser aplicada, com sucesso, na avaliação de risco e em casos onde exista incerteza ou falta de dados na informação disponibilizada pela equipa encarregue do estudo. Os autores referem que a conjugação do modelo proposto com outras abordagens é um aspeto que deveria ser investigado, pois seria uma forma de aumentar a segurança e fiabilidade de um produto, equipamento ou serviço.

# Capítulo 4 – Equipamentos

A manutenção dos motores das aeronaves está, em parte, dependente de duas etapas, os tratamentos térmicos e as brasagens. Estes processos são considerados críticos para algumas peças que constituem os motores das aeronaves, pois diminuem significativamente a probabilidade da ocorrência de falhas durante o funcionamento destes.

Para a realização de tais processos a empresa utiliza dois fornos de alto vácuo. Estes equipamentos, além de efetuarem o processo de brasagem, estão encarregues de eliminar as tensões residuais presentes nas peças, utilizando altas temperaturas. Estes dois equipamentos funcionam a vácuo pois este impede a contaminação da carga, provocada por eventuais partículas contaminantes que possam existir no interior da câmara de aquecimento.

Os tratamentos térmicos permitem também aumentar a dureza dos materiais, consoante os requisitos pretendidos. Um aspeto relevante é que, no caso da inoperacionalidade de ambos fornos, a montagem final dos motores ficará comprometida, provocando um impacto negativo nos prazos de entrega e nos custos associados.

Considerando o anteriormente referido, e com o intuito de se poder encontrar o(s) sistema(s) dos fornos onde mais problemas possam surgir, a empresa disponibilizou estes equipamentos para se proceder à aplicação da metodologia *FMEA*.

## 4.1 – Descrição geral dos fornos de vácuo

Forno Vertical *Schmetz Typ M 450/3H 150 × 150* - forno de alto vácuo de carga vertical (Ano de aquisição - 1992), representado pela figura 7:

- Temperatura máxima de utilização: 1350 °C;
- Capacidade de carga máxima: 1500 Kg;
- Volume útil: 2650 dm<sup>3</sup>.

Forno Horizontal *TAV TH 1000 Dual Jet S/N 397* - forno de alto vácuo de carga horizontal (Ano de aquisição - 2007), representado pela figura 8:

- Temperatura máxima de utilização: 1300 °C;
- Capacidade de carga máxima: 1000 Kg;
- Volume útil: 1000 dm<sup>3</sup>.



Figura 7. Forno de alto vácuo vertical *Schmetz*.



Figura 8. Forno de alto vácuo horizontal *TAV*.

O forno *Schmetz*, de abertura vertical, tem atribuídos os tratamentos térmicos de materiais. Em contrapartida, o forno *TAV*, de abertura horizontal, é utilizado essencialmente para brasagens. No entanto, caso a situação o exija, ambos fornos podem executar ambas tarefas.

## 4.2 – Sistemas que constituem os fornos

Neste subcapítulo é efetuada uma breve descrição dos sistemas que constituem os fornos. São também apresentadas imagens dos equipamentos.

### 4.2.1 - Sistemas relativos ao forno *Schmetz*

- Câmara de vácuo;
- Sistema de vácuo;
- Sistema de aquecimento;
- Sistema de arrefecimento a água;
- Sistema de arrefecimento a árgon/azoto;
- Sistema pneumático;
- Quadro elétrico e circuitos;
- Sistema hidráulico;
- Mecanismo de subida/descida de carga;
- Outros.

**Câmara de vácuo** – o objetivo desta é separar a câmara térmica do meio exterior. A câmara de vácuo é fabricada em aço carbono e é também a responsável em permitir a existência de vácuo, criado pelo grupo de bombas, no interior do forno.

**Sistema de vácuo** – este sistema é formado por 3 bombas de vácuo e por válvulas. Mais especificamente por uma bomba mecânica, uma bomba *roots* e uma bomba difusora. As bombas funcionam consoante as fases de funcionamento do forno. Estas são as responsáveis pela criação do vácuo no interior do equipamento. A bomba mecânica tem como função evacuar o forno da pressão atmosférica. A bomba *roots* permite aumentar a capacidade de bombagem da bomba mecânica e apenas funciona com um determinado nível de vácuo já alcançado. A bomba difusora tem como função alcançar o alto vácuo. Apenas funciona quando já existe um determinado nível de vácuo e só quando a própria bomba se encontra a 230°C.

**Sistema de aquecimento** – é constituído pela câmara térmica, pelas resistências de aquecimento de grafite e por placas de grafite, as quais impedem que a energia térmica libertada pelas resistências escape da câmara térmica.

**Sistema de arrefecimento a água** – estão incluídas as bombas de água, o reservatório e todos os outros componentes necessários para o arrefecimento contínuo do forno.

**Sistema de arrefecimento a árgon/azoto** – engloba os depósitos de árgon e azoto, os *flaps*, o ventilador e todos os outros equipamentos necessários para o arrefecimento do interior da câmara de aquecimento, bem como da própria carga.

**Sistema pneumático** – este sistema é formado pelas electroválvulas que acionam os *flaps* e pelos outros dispositivos de acionamento pneumático, tais como o mecanismo de fecho da porta do forno *TAV*. Todo o sistema pneumático, de ambos fornos, funciona a azoto. O uso de árgon implicava a presença de oxigénio neste sistema. Na eventualidade da ocorrência de uma fuga pneumática dentro do forno, e no caso de ser utilizado árgon, a consequência seria a combustão deste, o que poderia provocar a explosão do forno. Por este motivo apenas é utilizado azoto neste sistema.

**Quadro elétrico e circuitos** – neste sistema encontram-se todos os interruptores, luzes, indicadores, controladores e equipamentos necessários à operação do forno.

**Sistema hidráulico** – é o responsável pelo fecho e abertura da tampa do forno *Schmetz*, sendo composto pela bomba hidráulica e pelo atuador.

**Mecanismo de subida/descida de carga** – aqui está incluído o dispositivo encarregue de elevar ou baixar a carga, que irá ser colocada ou retirada do interior do forno, bem como a estrutura que permite a movimentação horizontal da carga no solo.

**Sistema “Outros”** – algumas das ações de manutenção, referidas no ficheiro *Excel* que a empresa disponibilizou, não foram possíveis de identificar quanto ao sistema em que teriam de ser alojadas. O motivo foi a falta de exatidão na descrição da ação efetuada aos fornos. Em outras ocasiões a ação era identificável, mas o tempo despendido e o custo associado a esta eram nulos, o que não faz sentido. Assim, de modo a resolver este problema, foi criado o sistema “Outros” e tais ações foram inseridas neste.

#### 4.2.2 – Sistemas relativos ao forno *TAV*

- Câmara de vácuo;
- Sistema de vácuo;
- Sistema de aquecimento;
- Sistema de arrefecimento a água;
- Sistema de arrefecimento a árgon/azoto;
- Quadro elétrico e circuitos;
- Sistema pneumático;
- Outros.

O forno *TAV* é constituído pelos mesmos sistemas que o forno *Schmetz*, com exceção do mecanismo de subida/descida de carga e do sistema hidráulico, não existentes no *TAV*. No sistema de vácuo deste forno está também incluída uma bomba de espera, ausente no forno *Schmetz*, que tem como função manter um determinado nível de vácuo na bomba difusora, quando o forno se encontra desligado. O funcionamento de ambos fornos é bastante semelhante.

### 4.3 – Ilustração dos constituintes dos fornos

Nesta secção são apresentados alguns dos componentes com mais relevância para o funcionamento de ambos os fornos de alto vácuo. As figuras abaixo apresentadas incluem indicadores numerados, com a respetiva legenda, por forma a facilitar a visualização do(s) componente(s) em questão.

Na figura 9 são apresentados os equipamentos responsáveis pelo armazenamento do árgon e do azoto.



Figura 9. Constituintes exteriores dos fornos.

Legenda da figura 9:

- 1) Cilindro de azoto líquido;
- 2) Cilindro de árgon líquido.

São representados na figura 10 os dispositivos que permitem o arrefecimento da água, utilizada para o arrefecimento dos fornos, e o equipamento responsável pela passagem do azoto do estado líquido para gasoso.



Figura 10. Constituintes exteriores dos fornos.

Legenda da figura 10:

- 1) Torre de arrefecimento do forno *TAV*;
- 2) Torre de arrefecimento do forno *Schmetz*;
- 3) Equipamento para transformar o azoto do estado líquido para gasoso.

#### 4.3.1 – Constituintes do forno de alto vácuo *Schmetz*

A figura 11 identifica diversos elementos cujas funções se encontram relacionadas com a criação de vácuo, aquecimento, arrefecimento da câmara térmica e com a subida e descida da carga.

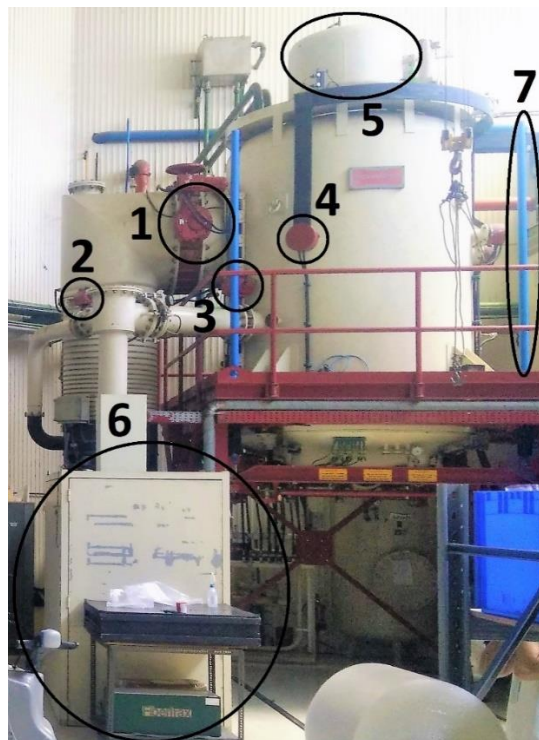


Figura 11. Constituintes do forno *Schmetz*.

Legenda da figura 11:

- 1) Válvula de alto vácuo;
- 2) Válvula entre bomba difusora e bomba *roots*;
- 3) Válvula entre bomba *roots* e câmara de vácuo;
- 4) *Connecting bolt* da resistência lateral e circuito para arrefecimento desta;
- 5) Ventilador para arrefecimento da câmara de aquecimento e da carga;
- 6) Bomba mecânica (zona inferior) e bomba *roots* (zona superior);
- 7) Fusos para subida e descida do carro, e da carga.

Na figura 12 está representada a unidade responsável pela criação do alto vácuo.

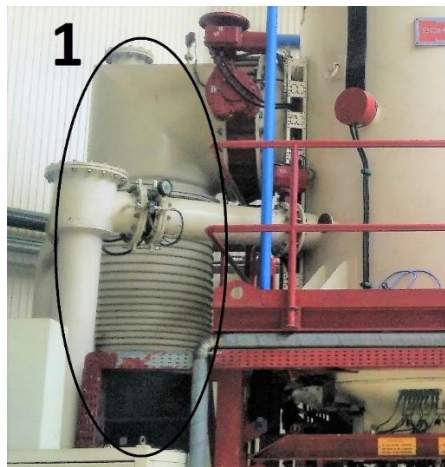


Figura 12. Constituintes do forno Schmetz.

Legenda da figura 12:

- 1) Bomba difusora.

São apresentados na figura 13 os dispositivos relacionados com o aquecimento, com o acionamento dos *flaps* de arrefecimento e com a movimentação horizontal do carro.

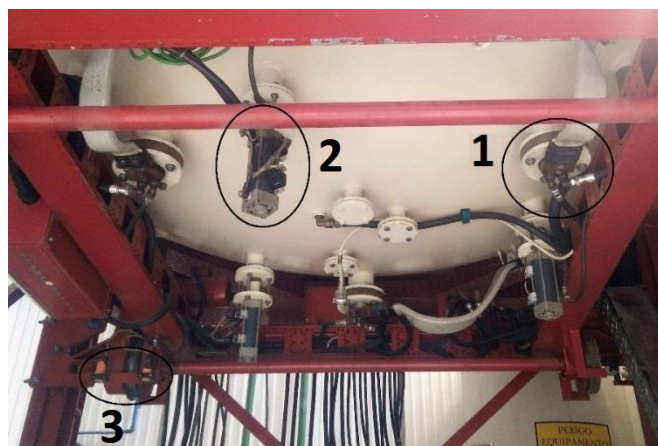


Figura 13. Constituintes do forno Schmetz.

Legenda da figura 13:

- 1) *Connecting bolt* da resistência inferior e circuito para arrefecimento desta;
- 2) Atuador pneumático para acionamento dos *flaps* inferiores;
- 3) Sensores de fim de curso (movimento horizontal).

Alguns dos equipamentos para arrefecimento e circulação da água estão representados na figura 14.



Figura 14. Constituintes do forno *Schmetz*.

Legenda da figura 14:

- 1) Bomba para recirculação da água do forno *Schmetz*;
- 2) Trocador de calor.

Na figura 15 podem ser observadas as bombas principais encarregues da bombagem da água do depósito para o forno.

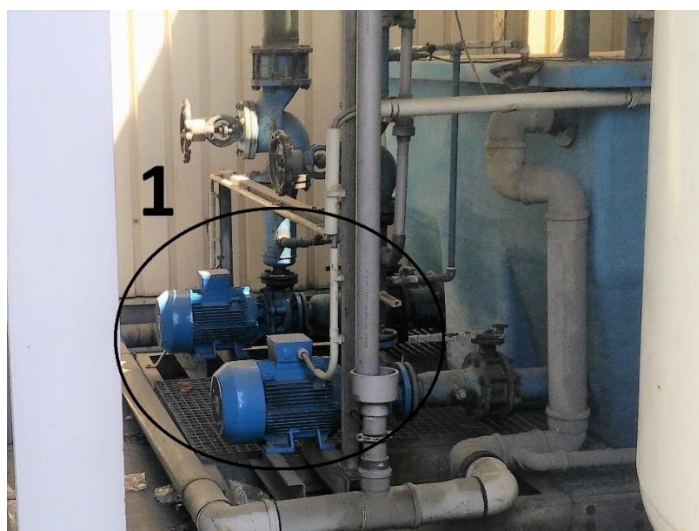


Figura 15. Constituintes do forno *Schmetz*.

Legenda da figura 15:

- 1) Bombas de água principais para arrefecimento do forno *Schmetz*.

A figura 16 ilustra o tanque onde é armazenada toda a água utilizada no sistema de arrefecimento contínuo.



Figura 16. Constituintes do forno *Schmetz*.

Legenda da figura 16:

- 1) Tanque de água para arrefecimento do forno *Schmetz*.

#### 4.3.2 – Constituintes do forno de alto vácuo *TAV*

A figura 17 representa o quadro elétrico que controla todo o forno.



Figura 17. Constituintes do forno *TAV*.

Legenda da figura 17:

- 1) Quadro elétrico e circuitos.

A figura 18 começa por ilustrar diversos constituintes relacionados com o sistema de arrefecimento, a água e a gás, com a parte elétrica e com o mecanismo da porta.



Figura 18. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 18:

- 1) Mecanismo para trancar a porta quando esta se encontra aberta;
- 2) Ligações aos termopares;
- 3) Transformador de energia elétrica;
- 4) Entrada e saída de água para arrefecimento contínuo da câmara de vácuo (tubos verdes);
- 5) Entrada de azoto (tubo esquerdo) e entrada de argon (tubo direito).

Na figura 19 é ilustrado o pneumático dos *flaps* laterais.

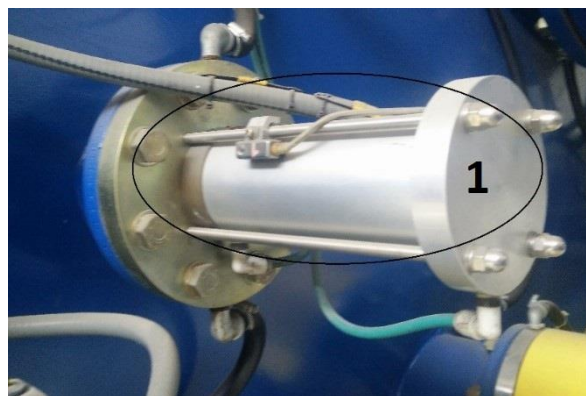


Figura 19. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 19:

- 1) Atuador pneumático para acionamento dos *flaps* laterais.

Na figura 20 estão representados os componentes relacionados com o sistema de vácuo e sistema pneumático.



Figura 20. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 20:

- 1) Bomba mecânica;
- 2) Bomba *roots*;
- 3) Bomba difusora;
- 4) Válvula entre bomba *roots* e câmara de vácuo;
- 5) Válvula entre bomba difusora e bomba *roots*;
- 6) Atuador pneumático da válvula de alto vácuo.

São identificados na figura 21 dispositivos pertencentes aos sistemas de vácuo, de arrefecimento e elétrico.

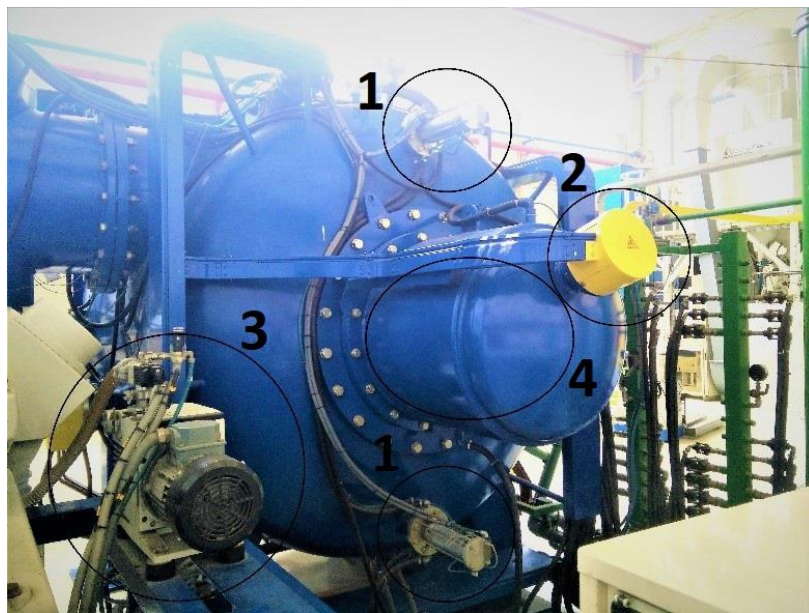


Figura 21. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 21:

- 1) Atuador pneumático dos *flaps*;
- 2) Alimentação elétrica do motor do ventilador;
- 3) Bomba de espera;
- 4) Motor do ventilador.

A figura 22 inclui a representação das duas bombas principais, responsáveis pelo arrefecimento contínuo do forno, e de uma bomba auxiliar em caso de emergência.



Figura 22. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 22:

- 1) Bombas de água principais para arrefecimento do forno TAV;
- 2) Bomba de emergência.

A figura 23 ilustra um componente do sistema de aquecimento, mais especificamente o local onde são ligadas as barras elétricas de alimentação das resistências de aquecimento e as mangueiras para arrefecimento destas.

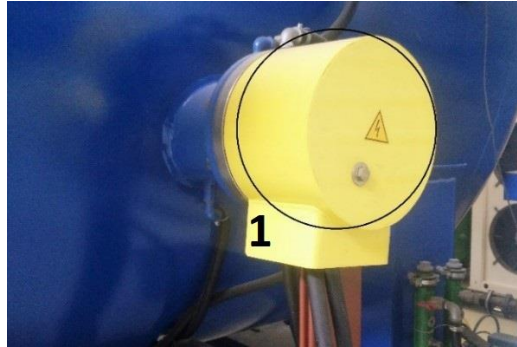


Figura 23. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 23:

- 1) *Connecting bolt* da resistência lateral e circuito para arrefecimento desta.

O tanque que armazena toda a água para arrefecimento do forno é ilustrado na figura 24.



Figura 24. Constituintes do forno TAV.

Legenda da figura 24:

- 1) Depósito de água para arrefecimento do forno *TAV*.

#### **4.4 – Funcionamento geral dos fornos**

O funcionamento de cada forno é bastante semelhante. O procedimento tem início com a colocação da carga no interior do forno seguida do fecho da porta, ou da tampa no caso do *Schmetz*. É posteriormente acionada a bomba mecânica e depois a bomba *roots*. O vácuo permite a extração dos contaminantes presentes na câmara de aquecimento, evitando que a carga seja danificada por estes, quando alcançadas as altas temperaturas. Determinadas cargas requerem um nível de vácuo denominado de alto vácuo, sendo que nestes casos é necessário acionar também a bomba difusora. Quando alcançado o nível de vácuo pretendido, as resistências de aquecimento são ligadas, dando início ao tratamento térmico ou ao processo de brasagem. Depois de um intervalo de tempo pré-determinado, as resistências são desligadas e inicia-se a fase de arrefecimento. Durante esta etapa pode ser utilizado árgon ou azoto, sendo a circulação destes efetuada com o auxílio do ventilador, situado no interior do forno. Quando a temperatura desce e a pressão sobe a partir de um determinado nível, pode-se abrir a porta e retirar a carga. A porta deve ser fechada o mais rapidamente possível de modo a evitar a entrada de contaminantes na câmara de aquecimento. Após fechada a porta, e antes de desligar o forno por completo, é recomendável alcançar um determinado nível de vácuo, que irá permitir reduzir significativamente a quantidade de contaminantes no interior da câmara de aquecimento. Estes contaminantes são nocivos para as resistências de aquecimento, pois estas são de cerâmica.

Os fornos têm um sistema de circulação interna de água para arrefecimento das resistências (cápsulas amarelas no *TAV* e cápsulas vermelhas no *Schmetz*). Este sistema funciona com base numa bomba de água e um trocador de calor. A água que circula nas resistências não entra em contacto com a água que a arrefece.

A bomba difusora utiliza resistências para aquecer o óleo (especial para este tipo de aplicações). O óleo, quando alcança a temperatura adequada (aproximadamente 240 °C), começa a absorver as partículas de oxigénio e outras que estejam presentes no interior da câmara de aquecimento. Durante este processo é então criado vácuo. É de extrema importância que a bomba difusora opere com o nível de óleo adequado. Um nível inferior ao permitido poderá resultar num eventual dano ou explosão da bomba.

## 4.5 – Ações de manutenção preventiva recomendadas pelo fabricante

De modo a promover a vida útil do equipamento, o fabricante de cada forno recomenda a realização programada de determinadas ações de manutenção de carácter preventivo. Para cada equipamento, forno *Schmetz* e *TAV*, são abaixo apresentadas as ações recomendadas.

### 4.5.1 – Ações para o forno *Schmetz*

Para este equipamento são sugeridas verificações diárias, semanais, mensais, semestrais, anuais e ocasionais.

- Verificações diárias:
  - Inspeção visual das lâmpadas;
  - Verificação do óleo da bomba mecânica.
- Verificações semanais:
  - Verificar o consumo elétrico do aquecimento;
  - Verificar os termopares da carga.
- Verificações mensais:
  - Inspeção visual dos contactos eléctricos;
  - Verificar *leakage rate*;
  - Verificar os termopares de aquecimento;
  - Verificar o funcionamento das unidades hidráulicas;
  - Verificar o funcionamento da bomba *roots*;
  - Verificar o funcionamento da bomba mecânica;
  - Verificar o funcionamento dos termostatos do circuito de arrefecimento;
  - Verificar o nível de óleo do sistema pneumático;
  - *Zero point check working temperature* do gravador e controlador de temperatura;
  - *Switch point check* das unidades de medição de vácuo.
- Verificações semestrais:
  - Lubrificação do mecanismo de subida/descida de carga;
  - Lubrificação do *rearing cooling gas motor*.
- Verificações anuais:
  - Não aplicável.
- Verificações ocasionais:
  - Atestar o sistema pneumático;
  - Descalcificação do sistema de arrefecimento de ação rápida.

#### 4.5.2 – Ações para o forno TAV

O fabricante deste forno aconselha ações preventivas diárias, semanais, mensais, semestrais e anuais.

- Verificações diárias:
  - Verificar o caudal de água e temperatura de saída durante o funcionamento;
  - Verificar nível de óleo nas bombas de vácuo e caudal de óleo nas unidades com indicadores de caudal;
  - Verificar que o óleo nas bombas não está contaminado;
  - Verificar os ventiladores da cabine elétrica.
- Verificações semanais:
  - Verificar estado e posição dos termopares;
  - Verificar estado da câmara de aquecimento:
    - Verificar o aperto dos parafusos *CFC*;
    - Verificar posição e suporte dos elementos de aquecimento, e por qualquer sinal de curto-circuito;
    - Verificar estado dos parafusos dos elementos de aquecimento e dos cabos de alimentação elétrica;
    - Verificar por estragos no isolamento do forno e nos retentores do isolamento;
    - Verificar funcionamento do empilhador do forno;
    - Limpar e lubrificar vedante da porta e procurar por danos;
    - Verificar funcionamento dos dispositivos de segurança em caso de:
      - falha de pressão/caudal de água;
      - sobreaquecimento do forno;
      - falha de pressão pneumática;
      - falha de pressão *backfill*;
    - Colocar óleo nas bombas de vácuo, caso necessário, tomar ações se o consumo de óleo for excessivo;
    - Verificar e registar o caudal de saída de vácuo do forno, de preferência após um ciclo de arrefecimento. Identificar a causa caso o caudal seja excessivo;
    - Limpar forno se necessário;
    - Verificar o bom funcionamento e alinhamento dos sistemas de carga e os sistemas de fecho da porta;

- Verificar o funcionamento da porta/apoios/defletores da câmara de aquecimento;
  - Verificar a sequência correta da válvula durante o tempo de inatividade do forno e registar esse tempo.
- Verificações mensais:
  - Verificar fugas do sistema hidráulico e pneumático. Adicionar óleo a estes sistemas se necessário. Verificar se a pressão é a correta;
  - Verificar fugas na linha de entrada de gás e verificar a pressão correta de funcionamento;
  - Verificar fugas no sistema de água e a pressão correta de funcionamento;
  - Verificar o estado dos contadores do motor de arrefecimento;
  - Verificar o estado dos contadores de aquecimento do forno;
  - Verificar o aperto e deterioração dos cabos elétricos do sistema de aquecimento;
  - Verificar o ajuste do pressóstato do gás de arrefecimento;
  - Registrar a potência de aquecimento quando a 100%;
  - Abrir a flange localizada no fundo do cilindro no fim da linha de bombagem para remover qualquer sujidade e partículas que possam estar acumuladas;
  - Verificar o filtro na linha de bombagem e limpá-lo quando necessário.
- Verificações semestrais:
  - Limpar as cabeças dos manómetros e confirmar a indicação correta à pressão atmosférica e em vácuo;
  - Desligar os termopares dos instrumentos de controlo e sobreaquecimento e verificar a leitura correta;
  - Lubrificar levemente as hastes das válvulas e os vedantes das hastes dos cilindros;
  - Verificar o correto funcionamento do empilhador de carga. Verificar fugas no cilindro de elevação.
- Verificações anuais:
  - Deve ser realizada uma inspeção geral ao equipamento elétrico (Cabine de controlo, circuito de proteção, cabos e ligações).

# Capítulo 5 – Estudo de Caso

## 5.1 – Registo de intervenções

Para se proceder à aplicação da metodologia *FMEA* é necessário que exista um conjunto de dados que possam ser analisados. Tal informação foi disponibilizada em formato digital pela TAP Air Portugal.

Os dados do ficheiro *Excel*, do [anexo 1](#), que correspondem a intervenções efetuadas aos dois fornos, encontram-se divididos nos diversos tópicos, abaixo indicados:

- número de ordem de serviço;
- descrição da ação/avaria;
- sistema;
- tipologia da intervenção;
- início da intervenção;
- horas de trabalho;
- custo total da intervenção.

## 5.2 – Abordagem para o tratamento de dados

Numa primeira etapa selecionaram-se os dados relativos aos dois fornos de vácuo, eliminando a restante informação desnecessária para a aplicação da *FMEA*. Foi apenas utilizada a informação relativa a dois anos consecutivos, 2016 e 2017.

De notar que os dados, cuja mesma ação/avaria diz respeito a dois ou mais sistemas, foram divididos pelos sistemas adequados. Para estes últimos, o cálculo do tempo e do custo resultou da divisão destas duas variáveis, relativas ao sistema original, pelo número de sistemas em que este foi dividido. Procedeu-se também à identificação, com recurso a cores, das ações de carácter preventivo, corretivo e de outras situações.

A partir desta fase os dados disponíveis foram então considerados aptos para serem analisados, vindo a ser úteis para a realização de uma análise de Pareto, para a aplicação da *FMEA*, em cada um dos equipamentos, como também para a elaboração de uma análise de custos, relativa às ações preventivas e corretivas.

### 5.3 – Análise de Pareto

Com o objetivo de tentar determinar qual(ais) o(s) sistema(s) mais crítico(s), ainda antes da aplicação da *FMEA*, optou-se por efetuar uma análise de Pareto aos dados relativos às ações corretivas, sofridas pelos fornos.

A Lei de Pareto foi inicialmente descrita pelo italiano Vilfredo Pareto (EKONOMISTA, 2018). Este princípio afirma que 80% das consequências são provocadas por 20% das causas, sendo que poderão existir ligeiras diferenças nas percentagens. Esta lei é bastante utilizada em estudos relacionados com a economia, tendo também grande aplicabilidade, por exemplo, na previsão de baixas devidas à ocorrência de sismos ou de incêndios florestais (Bhatti, *et al.*, 2018).

Para cada forno de alto vácuo, a análise de Pareto foi efetuada tendo por base as seguintes etapas:

- Disposição dos sistemas por ordem decrescente do **número de intervenções efetuadas**;
- Cálculo das percentagens individuais de cada sistema, dividindo o número de intervenções de cada um destes pelo total de intervenções;
- Cálculo das percentagens acumuladas, adicionando a percentagem do sistema anterior à do sistema seguinte, numa abordagem de cima para baixo;
- Repetição das três etapas anteriores para o **tempo gasto em intervenções** e para o **custo destas**.

Na zona lateral das tabelas 2, 3, 4, 6, 7 e 8 é indicada uma percentagem e um número de sistemas, apenas de carácter informativo. Esta percentagem resulta da Lei de Pareto, anteriormente descrita, onde 80% das consequências são provocadas por 20% das causas. O número de sistemas deriva da quantidade de sistemas correspondentes a 20% do número total de sistemas disponíveis, para cada forno.

Considere-se para esta análise que os diversos sistemas correspondem às causas e que o número de intervenções, o tempo despendido nestas e os custos associados correspondem às consequências. Note-se também que o forno *Schmetz* está dividido em 10 sistemas enquanto o forno *TAV* se encontra dividido em 8 sistemas.

Considerando a informação anteriormente referida, procede-se agora ao cálculo do número de sistemas correspondentes a 20% da quantidade total de sistemas, para cada forno, como indicado nas expressões 5 e 6.

$$N^{\circ} \text{ de sistemas, do Schmetz, correspondentes a } 20\% = 10 \times 0.20 = 2 \text{ sistemas} \quad (5)$$

$$N^{\circ} \text{ de sistemas, do TAV, correspondentes a } 20\% = 8 \times 0.20 = 1.6 \text{ sistemas} \quad (6)$$

Dos resultados obtidos, observa-se que 20% dos sistemas do *Schmetz* correspondem a 2 sistemas. Quanto ao TAV, 20% dos sistemas correspondem a 1.6 sistemas. Este último valor foi arredondado para 2, pois fisicamente não é possível ter um sistema mais 60% de outro.

Abaixo são representadas as tabelas com os resultados da análise de Pareto efetuada, junto das justificações pertinentes.

### 5.3.1 – Resultados obtidos da análise de Pareto ao forno *Schmetz*

A tabela 1 representa o número de intervenções, o tempo gasto nestas e o seu custo, relativamente ao forno *Schmetz* e a cada um dos sistemas que o constitui.

Tabela 1: Dados gerais do número de intervenções, tempo e custo, do forno *Schmetz*.

<b>Schmetz</b>	Nº de intervenções	Tempo (h)	Custo (€)
Câmara de vácuo	0	0.00	0.00
Aquecimento	2	75.00	11094.43
Arrefecimento a água	6	71.50	4559.00
Arrefecimento a árgon/azoto	3	11.00	295.90
Vácuo	3	85.00	9340.19
Pneumático	0	0.00	0.00
Hidráulico	1	7.00	246.34
Quadro elétrico e circuitos	9	659.00	10829.32
Subida/descida de carga	2	10.00	636.04
Outros	4	122.00	4157.24
Total	30	1040.50	41158.46

#### 5.3.1.1 – Análise de Pareto ao forno *Schmetz* – Número de intervenções

Relativamente à análise de Pareto do forno *Schmetz* conclui-se, pela tabela 2, que não se segue a Lei de Pareto, pois 20% dos sistemas correspondem apenas a 50.00% do número de intervenções.

Tabela 2: Resultados da análise de Pareto, relativa ao número de intervenções, no forno *Schmetz*.

<b>Análise de Pareto - Schmetz - N° de intervenções</b>				
	<b>Sistema</b>	<b>N° de intervenções</b>	<b>% individual</b>	<b>% acumulada</b>
20% - 2 sistemas	Quadro elétrico e circuitos	9	30.00%	30.00%
	Arrefecimento a água	6	20.00%	50.00%
	Outros	4	13.33%	63.33%
	Arrefecimento a árgon/azoto	3	10.00%	73.33%
	Vácuo	3	10.00%	83.33%
	Aquecimento	2	6.67%	90.00%
	Subida/descida de carga	2	6.67%	96.67%
	Hidráulico	1	3.33%	100.00%
	Câmara de vácuo	0	0.00%	100.00%
	Pneumático	0	0.00%	100.00%
	<b>Total</b>	30	100.00%	

Pelo gráfico 1 facilmente se observa que a linha de Pareto, para 20% dos sistemas, não corresponde a 80% do número de intervenções.

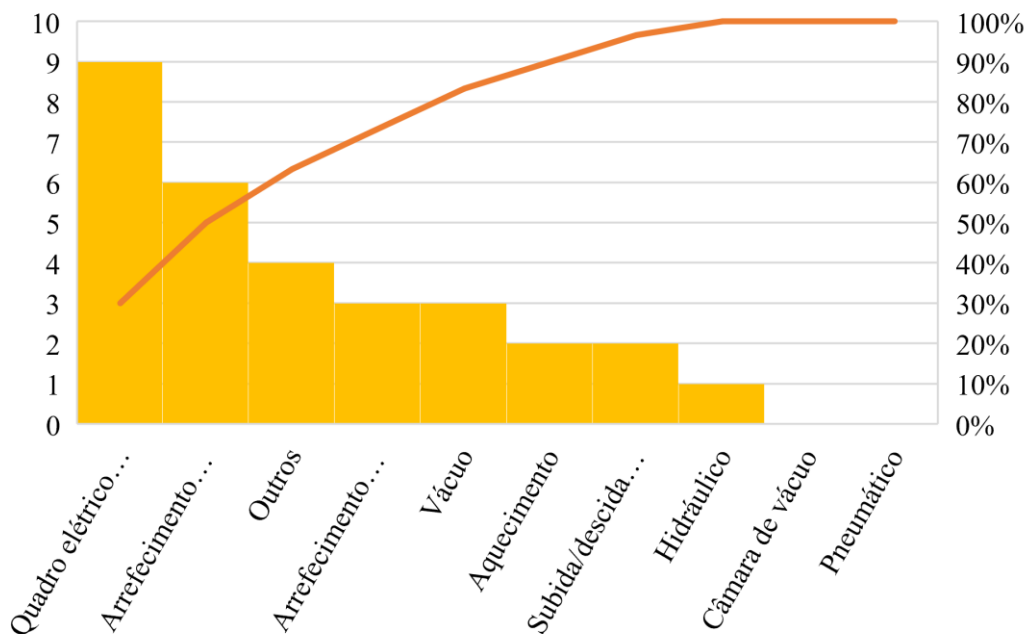


Gráfico 1. Gráfico de Pareto relativo ao número de intervenções no *Schmetz*.

### 5.3.1.2 – Análise de Pareto ao forno *Schmetz* – Duração das intervenções, em horas

Para o forno *Schmetz*, relativamente aos tempos de intervenção, verifica-se pela tabela 3 que é seguida a Lei de Pareto, visto que 20% dos sistemas correspondem a 75.06% (perto dos 80%) dos tempos de intervenção. Logo, com base neste princípio, é possível afirmar que os sistemas

“Quadro elétrico e circuitos” e “Outros” são os mais críticos, sendo os responsáveis por 75.06% do tempo total despendido em intervenções.

Tabela 3: Resultados da análise de Pareto, relativa ao tempo das intervenções, no forno *Schmetz*.

<b>Análise de Pareto - Schmetz - Tempo gasto em intervenções (h)</b>				
	<b>Sistema</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>% individual</b>	<b>% acumulada</b>
20% - 2 sistemas	Quadro elétrico e circuitos	659.00	63.33%	63.33%
	Outros	122.00	11.73%	75.06%
	Vácuo	85.00	8.17%	83.23%
	Aquecimento	75.00	7.21%	90.44%
	Arrefecimento a água	71.50	6.87%	97.31%
	Arrefecimento a árgon/azoto	11.00	1.06%	98.37%
	Subida/descida de carga	10.00	0.96%	99.33%
	Hidráulico	7.00	0.67%	100.00%
	Câmara de vácuo	0.00	0.00%	100.00%
	Pneumático	0.00	0.00%	100.00%
	<b>Total</b>	1040.50	100.00%	

Observa-se pelo gráfico 2 que neste caso a Lei de Pareto é cumprida, pelo que aproximadamente 80% do tempo das intervenções é gasto em dois sistemas em particular (20%).

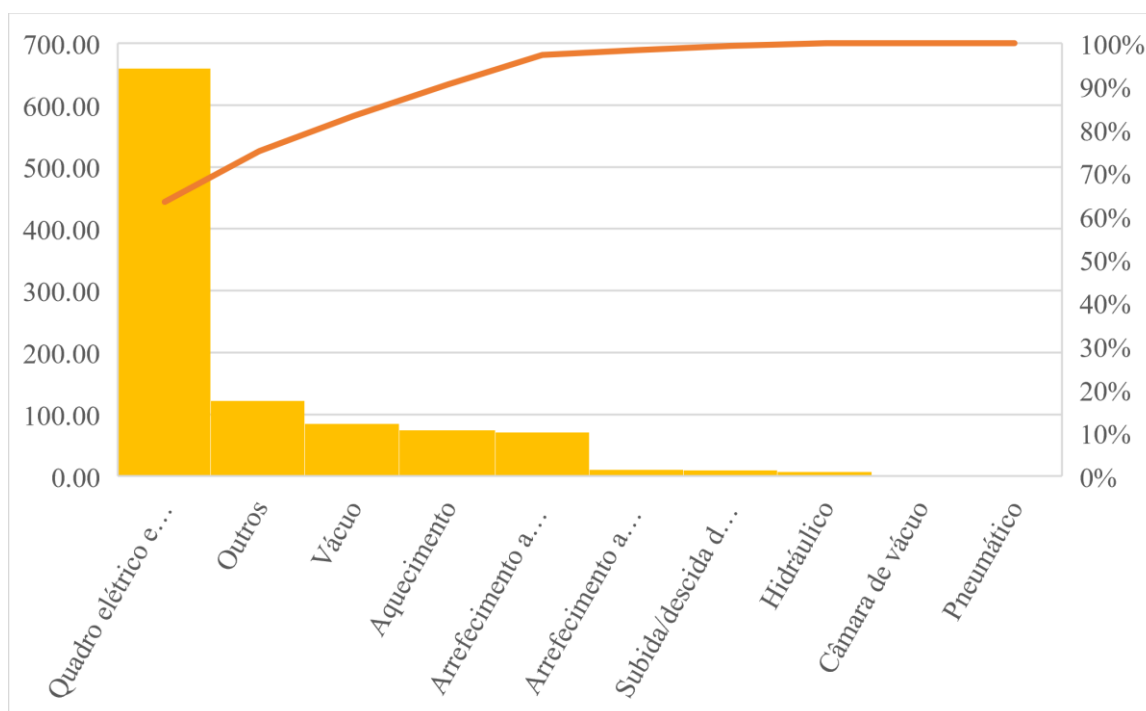


Gráfico 2. Gráfico de Pareto relativo ao tempo gasto em intervenções no *Schmetz*.

### 5.3.1.3 – Análise de Pareto ao forno Schmetz – Custo das intervenções, em euros

Com respeito à tabela 4 verifica-se para o forno *Schmetz*, relativamente ao custo das intervenções, que não se segue a Lei de Pareto, pois 20% dos sistemas correspondem apenas a 53.27% dos custos das intervenções.

Tabela 4: Resultados da análise de Pareto, relativa ao custo das intervenções, no forno *Schmetz*.

<b>Análise de Pareto - Schmetz - Custo em intervenções (€)</b>				
	<b>Sistema</b>	<b>Custo (€)</b>	<b>% individual</b>	<b>% acumulada</b>
20% - 2 sistemas	Aquecimento	11094.43	26.96%	26.96%
	Quadro elétrico e circuitos	10829.32	26.31%	53.27%
	Vácuo	9340.19	22.69%	75.96%
	Arrefecimento a água	4559.00	11.08%	87.04%
	Outros	4157.24	10.10%	97.14%
	Subida/descida de carga	636.04	1.55%	98.68%
	Arrefecimento a árgon/azoto	295.90	0.72%	99.40%
	Hidráulico	246.34	0.60%	100.00%
	Câmara de vácuo	0.00	0.00%	100.00%
	Pneumático	0.00	0.00%	100.00%
	<b>Total</b>	<b>41158.46</b>	<b>100.00%</b>	

Pelo gráfico 3 se confirma o não cumprimento da Lei de Pareto.

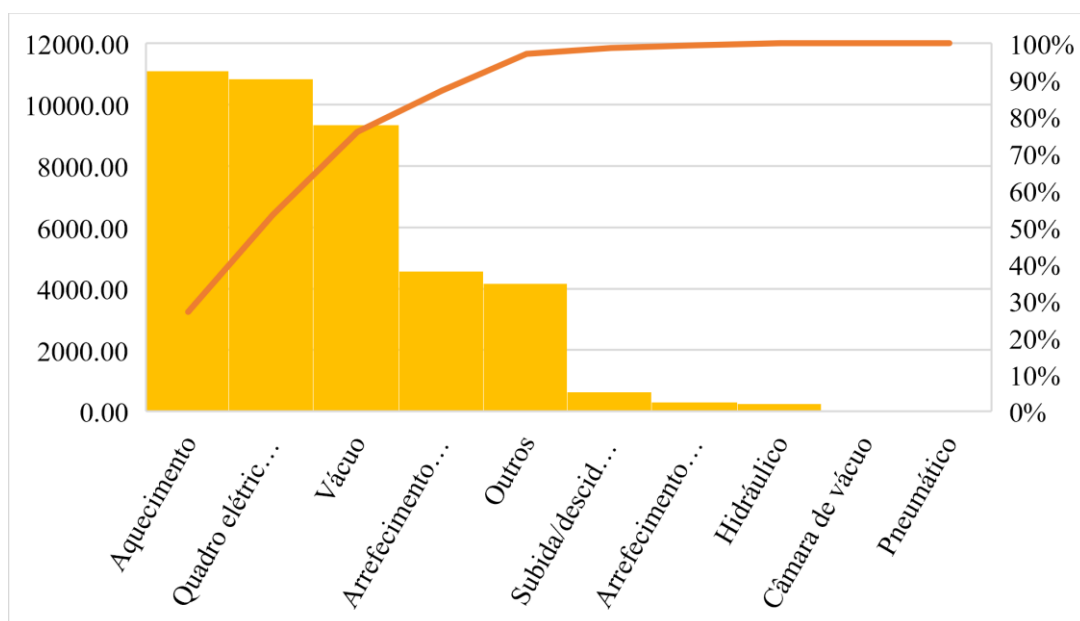


Gráfico 3. Gráfico de Pareto relativo ao custo das intervenções no *Schmetz*.

### 5.3.2 – Resultados obtidos da análise de Pareto ao forno TAV

A tabela 5 representa, à semelhança da tabela 1, o número de intervenções, o tempo gasto nestas e o seu custo, mas em relação ao forno TAV e a cada um dos sistemas que o constitui.

Tabela 5: Dados gerais do número de intervenções, tempo e custo, do forno TAV.

TAV	Nº de intervenções	Tempo (h)	Custo (€)
Câmara de vácuo	2	7.50	486.68
Aquecimento	2	5.50	1763.93
Arrefecimento a água	4	15.50	501.17
Arrefecimento a árgon/azoto	2	2.00	61.45
Vácuo	3	31.50	2797.85
Pneumático	0	0.00	0.00
Quadro elétrico e circuitos	3	577.00	769.10
Outros	8	51.50	1640.90
Total	24	690.50	8021.08

#### 5.3.2.1 – Análise de Pareto ao forno TAV – Número de intervenções

Verifica-se pela tabela 6 que não é seguida a Lei de Pareto pois, para o forno TAV e relativamente ao número de intervenções, 20% dos sistemas correspondem a apenas 50.00% do número de intervenções efetuadas.

Tabela 6: Resultados da análise de Pareto, relativa ao número de intervenções, no forno TAV.

<b>Análise de Pareto - TAV - Nº de intervenções</b>				
	<b>Sistema</b>	<b>Nº de intervenções</b>	<b>% individual</b>	<b>% acumulada</b>
20% - 2 sistemas	Outros	8	33.33%	33.33%
	Arrefecimento a água	4	16.67%	50.00%
	Vácuo	3	12.50%	62.50%
	Quadro elétrico e circuitos	3	12.50%	75.00%
	Câmara de vácuo	2	8.33%	83.33%
	Aquecimento	2	8.33%	91.67%
	Arrefecimento a árgon/azoto	2	8.33%	100.00%
	Pneumático	0	0.00%	100.00%
	<b>Total</b>		24	100.00%

Pelo gráfico 4 se verifica o incumprimento da Lei de Pareto para este caso.

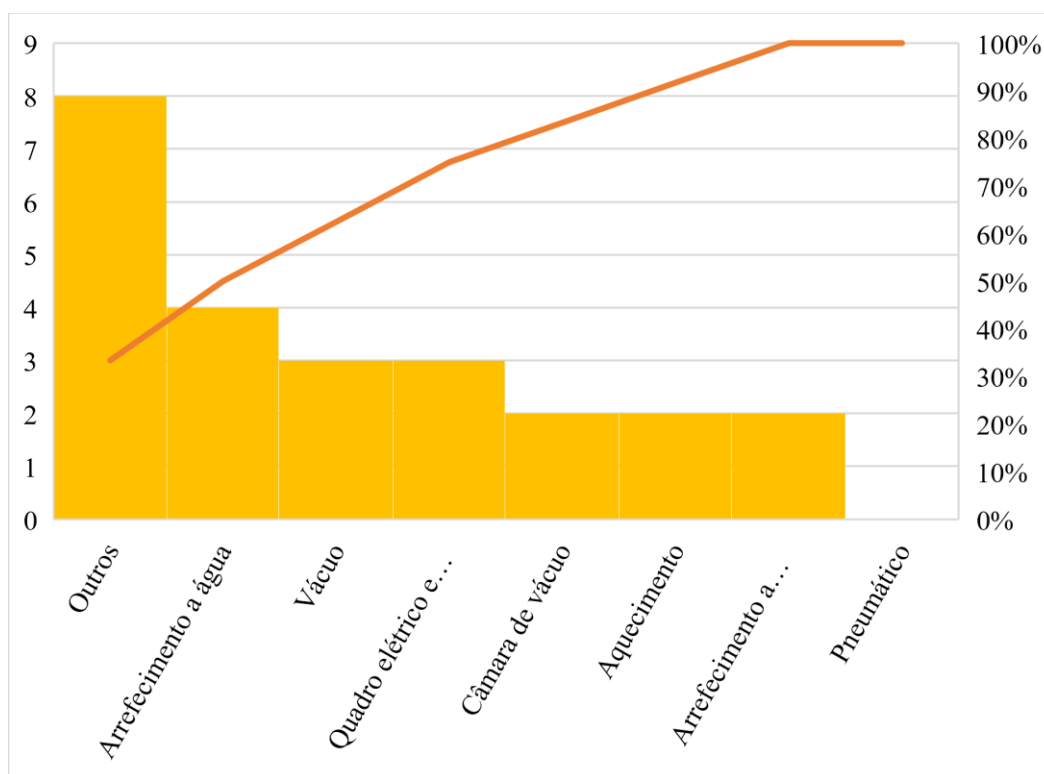


Gráfico 4. Gráfico de Pareto relativo ao número de intervenções no TAV.

### 5.3.2.2 – Análise de Pareto ao forno TAV – Duração das intervenções, em horas

Em relação ao forno TAV e em termos de tempo de intervenções, verifica-se pela tabela 7 o incumprimento da Lei de Pareto, pois 20% dos sistemas correspondem a 91.02% do tempo despendido em ações corretivas.

Tabela 7: Resultados da análise de Pareto, relativa ao tempo das intervenções, no forno TAV.

<b>Análise de Pareto - TAV - Tempo gasto em intervenções (h)</b>				
	<b>Sistema</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>% individual</b>	<b>% acumulada</b>
20% - 2 sistemas	Quadro elétrico e circuitos	577.00	83.56%	83.56%
	Outros	51.50	7.46%	91.02%
	Vácuo	31.50	4.56%	95.58%
	Arrefecimento a água	15.50	2.24%	97.83%
	Câmara de vácuo	7.50	1.09%	98.91%
	Aquecimento	5.50	0.80%	99.71%
	Arrefecimento a argon/azoto	2.00	0.29%	100.00%
	Pneumático	0.00	0.00%	100.00%
	<b>Total</b>	690.50	100.00%	

O gráfico 5 permite confirmar que não se segue a Lei de Pareto.

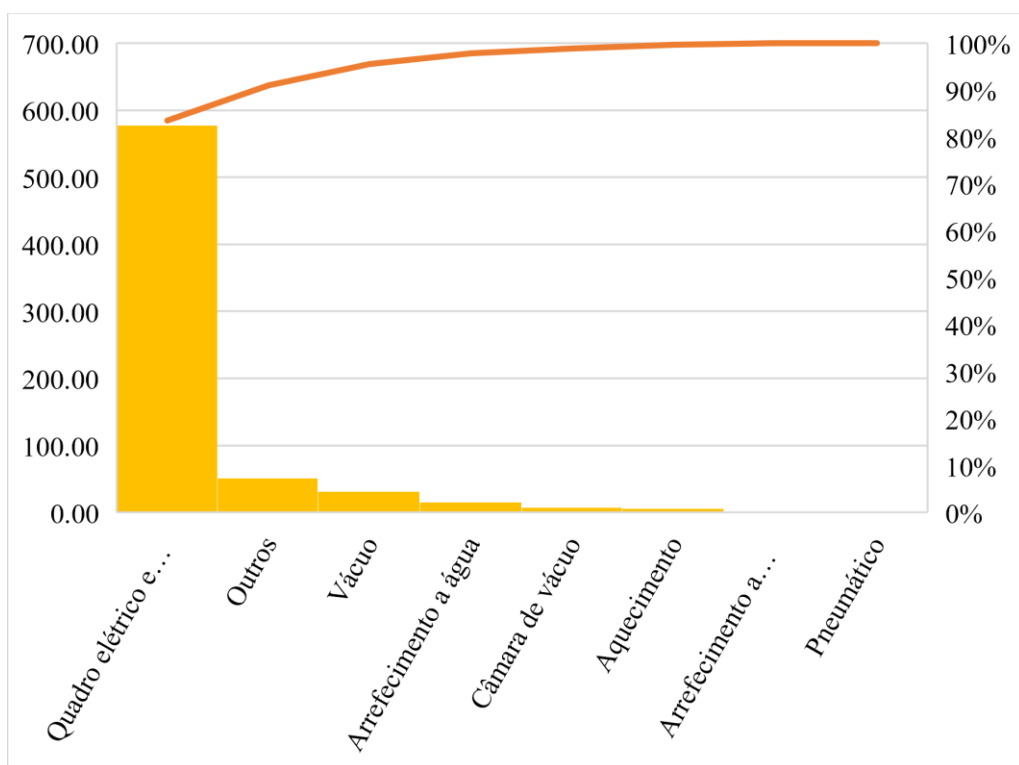


Gráfico 5. Gráfico de Pareto relativo ao tempo gasto em intervenções no TAV.

### 5.3.2.3 – Análise de Pareto ao forno TAV – Custo das intervenções, em euros

Com respeito ao custo das intervenções no forno TAV, e segundo a tabela 8, não é seguida a Lei de Pareto porque 20% dos sistemas apenas são responsáveis por 56.87% dos custos das intervenções.

Tabela 8: Resultados da análise de Pareto, relativa ao custo das intervenções, no forno TAV.

<b>Análise de Pareto - TAV - Custo em intervenções (€)</b>				
	<b>Sistema</b>	<b>Custo (€)</b>	<b>% individual</b>	<b>% acumulada</b>
20% - 2 sistemas	Vácuo	2797.85	34.88%	34.88%
	Aquecimento	1763.93	21.99%	56.87%
	Outros	1640.90	20.46%	77.33%
	Quadro elétrico e circuitos	769.10	9.59%	86.92%
	Arrefecimento a água	501.17	6.25%	93.17%
	Câmara de vácuo	486.68	6.07%	99.23%
	Arrefecimento a argón/azoto	61.45	0.77%	100.00%
	Pneumático	0.00	0.00%	100.00%
	<b>Total</b>	<b>8021.08</b>	<b>100.00%</b>	

Recorrendo ao gráfico 6 é possível verificar que nesta situação também não é seguida a Lei de Pareto.

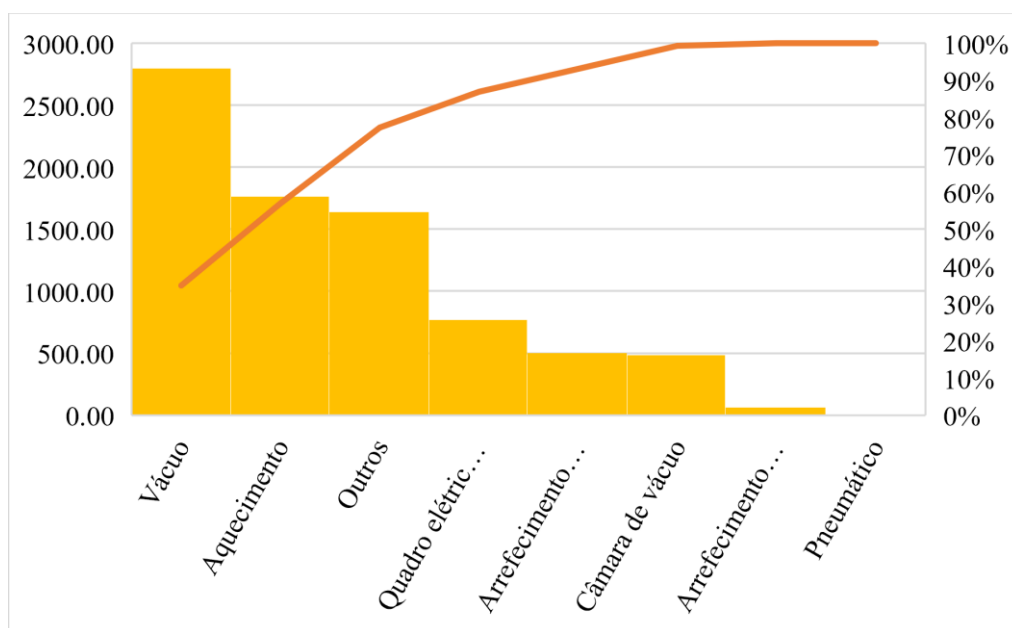


Gráfico 6. Gráfico de Pareto relativo ao custo das intervenções no TAV.

#### 5.4 – Aplicação da metodologia *FMEA*

Uma das fases com maior relevância na implementação da metodologia *FMEA*, e que aporta uma grande dificuldade para a sua realização com precisão, é a identificação de todos os modos de falha que possam ocorrer, das causas associadas e das consequências resultantes destes. Outra etapa imprescindível é a elaboração ou a adaptação, consoante as necessidades, das tabelas de Severidade, de Ocorrência e de Detetabilidade. A classificação de cada um dos modos de falha é efetuada com recurso às tabelas anteriormente referidas. A tabela de Severidade irá classificar a gravidade expectável de cada consequência do modo de falha, ou seja, o impacto de cada consequência dos modos de falha de cada sistema de cada equipamento. Quanto à tabela de Ocorrência irá ser utilizada para classificar a probabilidade de ocorrência de cada causa, que possa promover o modo de falha. A tabela de Detecção, ou Detetabilidade, permite a classificação da possibilidade ou facilidade em detetar o modo de falha, ainda antes deste ocorrer. Para esta detecção são muitas vezes utilizadas medidas de controlo tais como sensores.

Depois de determinados os modos de falha, as causas e as consequências, bem como obtidas as tabelas de Severidade, de Ocorrência e de Detecção, será necessário elaborar uma escala para a classificação do *RPN*. Esta escala irá permitir determinar os modos de falha que apresentem maior relevância, pois serão estes aqueles que primeiro terão de ser analisados, por forma a tentar eliminar ou mitigar o risco a estes associados.

Abaixo são apresentadas as tabelas de Severidade, de Ocorrência e de Detetabilidade, bem como a tabela para classificação do *RPN*. As tabelas anteriores foram elaboradas numa base hipotética e sem valor para aplicação em contexto real de trabalho, tendo sido adaptadas com base no *software XFMEA* utilizado para a aplicação desta metodologia, e disponibilizado pelo ISEL. A figura 25 ilustra uma parte de uma folha de trabalho de uma análise *FMEA*, efetuada com recurso ao *software* anterior.

	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Si	Potential Cause(s) of Failure	Oi	Current Design Controls (Prevention)
F 1	Provides adequate structural support according to specifications	Excessive deflection	Frame deformation can result in bicycle losing stability during impact loads under normal operation	9	Frame material not stiff enough to withstand severe impact loads	1	Frame finite element analysis
F 2		Complete structural failure	Frame can break apart and cause accident	10	Frame diameter insufficient for severe impact loads	2	Frame finite element analysis
F 3	Provides proper dimensional support for the entire frame subassembly.	Improper frame length	Bicycle will not perform in terms of stability and handling as intended	6	Proper analysis of the contribution of upper frame to overall bicycle stability was not done	4	

Figura 25. Ilustração de uma *FMEA* com recurso ao *software XFMEA*.

A tabela 9 para classificação da Severidade encontra-se estruturada em 10 níveis, os quais foram atribuídos tendo por base os seguintes aspetos:

- Tempo de paragem do equipamento;
- Custo da intervenção;
- Risco para os utilizadores do equipamento.

O nível escolhido deverá ser o que obtenha a classificação mais elevada de entre os três fatores anteriores. Considere-se o seguinte exemplo. Um equipamento, devido a uma avaria, esteve parado por 25 minutos, resultando numa despesa de 130 € sendo que não existiu nenhum risco para os utilizadores do mesmo. Consultando a tabela 9 verifica-se que o nível 4 (Baixo) é o adequado a esta situação em particular, pois a despesa de 130 € revela ser o fator de maior importância.

Tabela 9: Escala para classificação da Severidade.

<b>Escala de Classificação da Severidade</b>		
<b>#</b>	<b>Descrição</b>	<b>Critério</b>
<b>1</b>	<b>Nenhum</b>	O modo de falha não apresenta qualquer efeito para a Produção, qualquer Custo ou Risco para os utilizadores do equipamento.
<b>2</b>	<b>Menor</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção até 30 minutos ou um Custo de intervenção inferior a 10 euros. Não existe risco para os utilizadores do equipamento.
<b>3</b>	<b>Muito Baixo</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 30 minutos a 1 hora ou um Custo de intervenção entre 10 e 100 euros. Não existe risco para os utilizadores do equipamento.
<b>4</b>	<b>Baixo</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 1 hora e 4 horas ou um Custo de intervenção entre 100 e 150 euros. O risco para os utilizadores do equipamento é insignificante.
<b>5</b>	<b>Moderado</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 4 horas e 8 horas ou um Custo de intervenção entre 150 e 200 euros. O risco para os utilizadores do equipamento é insignificante.
<b>6</b>	<b>Alto</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 8 horas e 16 horas ou um Custo de intervenção entre 200 e 250 euros. O risco para os utilizadores do equipamento pode resultar em ferimentos ligeiros sem necessidade hospitalar.
<b>7</b>	<b>Muito Alto</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 16 horas e 24 horas ou um Custo de intervenção entre 250 e 500 euros. O risco para os utilizadores do equipamento pode resultar em ferimentos ligeiros com necessidade hospitalar.
<b>8</b>	<b>Perigoso</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 24 horas e 36 horas ou um Custo de intervenção entre 500 e 1000 euros. O risco para os utilizadores do equipamento pode resultar em ferimentos moderados com necessidade hospitalar.
<b>9</b>	<b>Muito Perigoso</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção entre 36 horas e 72 horas ou um Custo de intervenção entre 1000 e 2000 euros. O risco para os utilizadores do equipamento pode resultar em ferimentos graves com necessidade hospitalar.
<b>10</b>	<b>Catastrófico</b>	O modo de falha representa em média uma paragem da Produção superior a 72 horas ou um Custo de intervenção acima de 2000 euros. O risco para os utilizadores do equipamento pode resultar em ferimentos muito graves com necessidade hospitalar ou morte.

A tabela 10 classifica a Ocorrência e, tal como a tabela da Severidade, encontra-se dividida em 10 níveis. Estes são atribuídos de acordo com a frequência com que a causa, que origina o modo de falha, ocorre.

Tenha-se como exemplo um equipamento onde seja provável ocorrer uma falha de um determinado sistema a cada três meses. Observando a tabela 10 deduz-se que o nível 6 (Moderada) é o adequado para a classificação da Ocorrência nesta situação.

Tabela 10: Escala para classificação da Ocorrência.

<b>Escala de Classificação da Ocorrência</b>		
<b>#</b>	<b>Descrição</b>	<b>Critério</b>
<b>1</b>	<b>Improvável</b>	A causa referente ao modo de falha não é expectável ocorrer durante a vida útil do equipamento.
<b>2</b>	<b>Remota</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência máxima de 1 vez em cada 5 anos de funcionamento do equipamento.
<b>3</b>	<b>Muito Baixa</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez em cada 2 anos de funcionamento do equipamento.
<b>4</b>	<b>Baixa</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez em cada ano de funcionamento do equipamento.
<b>5</b>	<b>Baixa - Moderada</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez em cada semestre de funcionamento do equipamento.
<b>6</b>	<b>Moderada</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez em cada trimestre de funcionamento do equipamento.
<b>7</b>	<b>Moderada - Alta</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez em cada mês de funcionamento do equipamento.
<b>8</b>	<b>Alta</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez por semana de funcionamento do equipamento.
<b>9</b>	<b>Muito alta</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de 1 vez por dia de funcionamento do equipamento.
<b>10</b>	<b>Quase Certa</b>	A causa referente ao modo de falha ocorre com uma frequência média de mais de 1 vez por dia de funcionamento do equipamento.

A tabela 11 permite a classificação da Detetabilidade. À semelhança das duas tabelas anteriores, esta também se encontra dividida em 10 níveis de classificação, através dos quais se classifica a probabilidade ou facilidade com que se consegue identificar o modo de falha antes deste ocorrer.

Imagine-se um equipamento onde exista uma probabilidade de 52 % de identificar um determinado modo de falha antes da sua ocorrência. Pela tabela 11 verifica-se que o nível cinco (Moderada) é o que melhor se adapta a este caso.

Tabela 11: Escala para classificação da Detetabilidade.

<b>Escala de Classificação da Detetabilidade</b>		
<b>#</b>	<b>Descrição</b>	<b>Critério</b>
<b>1</b>	<b>Quase Certa</b>	O modo de falha será quase sempre detetado antes da sua ocorrência (acima de 90% dos casos).
<b>2</b>	<b>Muito Alta</b>	O modo de falha tem uma probabilidade muito alta de ser detetado antes da sua ocorrência (80 a < 90% dos casos).
<b>3</b>	<b>Alta</b>	O modo de falha tem uma probabilidade alta de ser detetado antes da sua ocorrência (70 a < 80% dos casos).
<b>4</b>	<b>Moderada - Alta</b>	O modo de falha será detetado numa boa parte das vezes antes da sua ocorrência (60 a < 70% dos casos).
<b>5</b>	<b>Moderada</b>	O modo de falha poderá ser detetado em alguns casos antes da sua ocorrência (50 a < 60% dos casos).
<b>6</b>	<b>Baixa</b>	O modo de falha tem uma baixa probabilidade de ser detetado antes da sua ocorrência (30 a < 50% dos casos).
<b>7</b>	<b>Muito Baixa</b>	O modo de falha tem uma muito baixa probabilidade de ser detetado antes da sua ocorrência (10 a < 30% dos casos).
<b>8</b>	<b>Remota</b>	O modo de falha dificilmente será detetado antes da sua ocorrência (5 a < 10% dos casos).
<b>9</b>	<b>Quase Impossível</b>	O modo de falha muito dificilmente será detetado antes da sua ocorrência (menos de 5% dos casos).
<b>10</b>	<b>Impossível</b>	O modo de falha não pode ser detetado antes da sua ocorrência, ou não existem controlos disponíveis.

A tabela 12 permite identificar quais os modos de falha aos quais deve ser dada prioridade. Para tal existem três níveis de classificação, aos quais estão associadas três cores distintas:

- Verde – Modos de falha menos graves e de menor prioridade;
- Amarelo – Modos de falha aos quais deve ser prestada alguma atenção;
- Vermelho – Modos de falha cuja resolução é urgente e que necessitam de atenção imediata.

Tabela 12: Escala para classificação do Risco.

Escala de Classificação do RPN		
Prioridade	Valor do RPN	Cor correspondente
Baixa	Menor ou igual a 30	
Média	Maior que 30 e menor que 300	
Alta	Maior ou igual a 300	

A implementação, propriamente dita, da *FMEA* efetuou-se com recurso ao software *XFMEA*. No [anexo 2](#) e [anexo 3](#) são apresentadas as tabelas que resultaram da introdução dos dados no software. Tais dados incluem os sistemas de cada equipamento e suas funções, os modos de falha, as causas, as consequências e a classificação da Severidade, da Ocorrência e da Detetabilidade. Para uma melhor compreensão do anteriormente dito, é apresentada na tabela 13 uma parte da *FMEA* efetuada ao forno *Schmetz*.

Tabela 13: *FMEA* parcial do forno *Schmetz*, para exemplificação.

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Câmara de vácuo								
Separar os componentes no interior do forno do meio exterior. Permitir a existência de vácuo no interior do forno.	Fuga de vácuo nos flanges de ligação.	Perda de vácuo no forno.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Fuga de argon/azoto nos flanges de ligação.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento a argon/azoto.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36

Depois de analisada a informação e os *RPN* nas tabelas do [anexo 2](#) e [anexo 3](#), dos dois fornos, é possível afirmar que a maioria dos modos de falha são de média prioridade, sendo que apenas uma pequena parte são de prioridade baixa ou alta.

Contudo, apesar de serem os de menor proporção, os modos de falha com alta prioridade são os que efetivamente importam pois estes podem provocar consequências catastróficas nos equipamentos, bem como ferimentos ou até, em último caso, a perda de vidas humanas.

#### 5.4.1 – Gráficos obtidos relativos ao forno *Schmetz*

Nesta secção são apresentados os gráficos retirados do *XFMEA*, relativos ao forno *Schmetz*.

O gráfico 7 identifica a percentagem atribuída a cada um dos níveis utilizados para classificar a severidade das consequências dos modos de falha. Pelo mesmo gráfico observa-se que 30 % das consequências foram classificadas com o nível 4 (Severidade baixa). A menor parcela do gráfico corresponde a 2 % das consequências, identificadas com o nível 3 (Severidade muito baixa). Apesar de ser uma percentagem relativamente reduzida, 9 % das consequências dos modos de falha correspondem ao nível 10 (Severidade catastrófica), o nível com maior perigo para o ser humano.

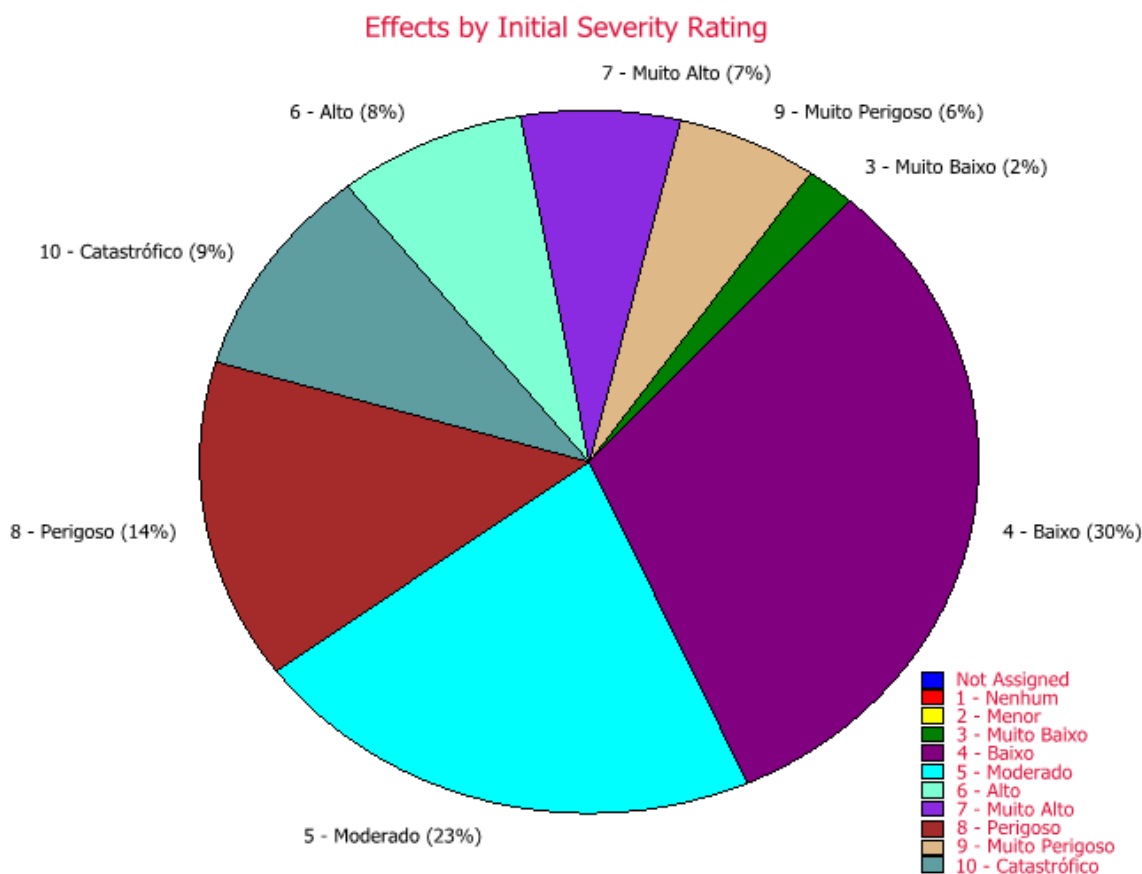


Gráfico 7. Percentagens das consequências fornecidas pelos níveis de classificação da Severidade.

O gráfico 8 identifica a percentagem atribuída a cada um dos níveis utilizados para classificar a probabilidade de ocorrência das causas que originam os modos de falha. Do gráfico deduz-se que 60 % das causas que originam os modos de falha têm uma probabilidade remota de acontecer correspondente ao nível 2 de classificação. O nível 4 (Probabilidade de ocorrência baixa) é referente a apenas 2 % das causas que provocam os modos de falha. Para este caso em particular, 4 % das causas correspondem ao pior cenário, ou seja, ao nível 5, representado por uma probabilidade de ocorrência baixa-moderada.

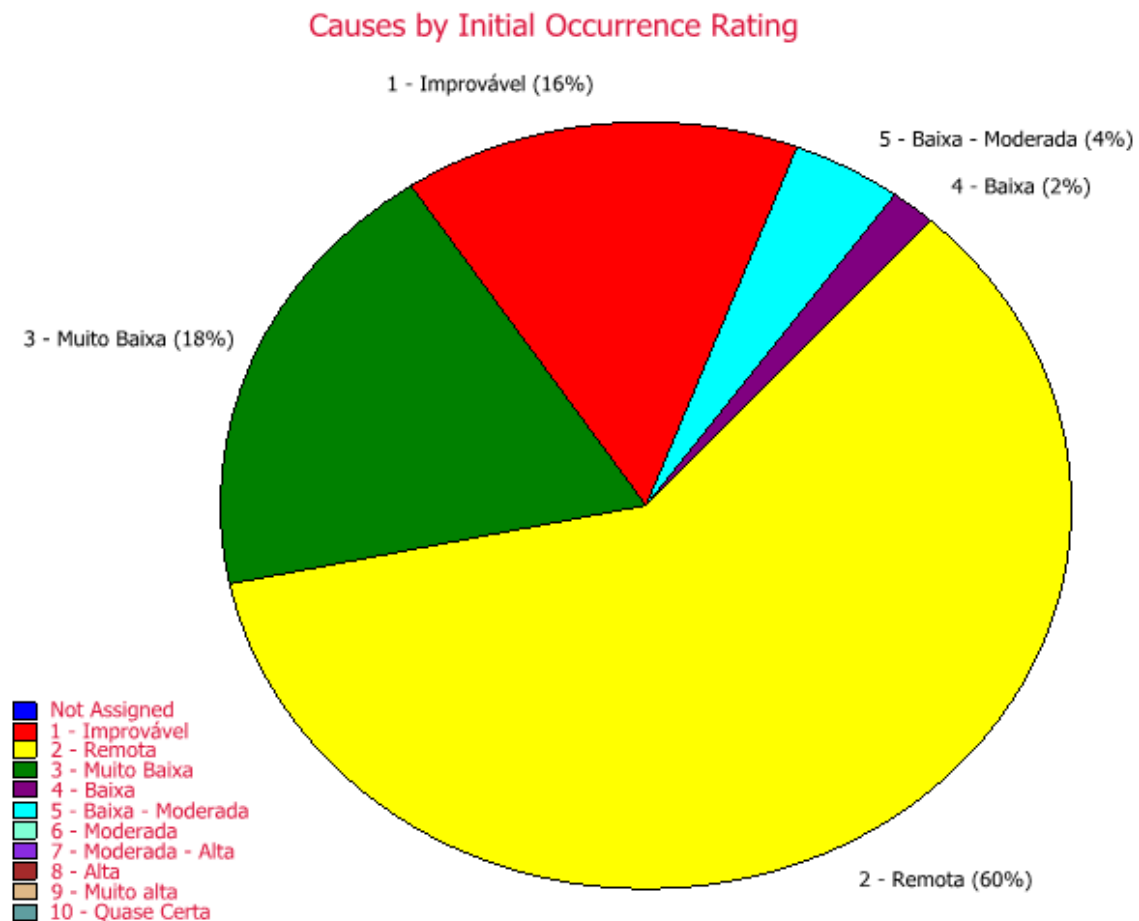


Gráfico 8. Percentagens das causas fornecidas pelos níveis de classificação da Ocorrência.

O gráfico 9 identifica a percentagem atribuída a cada um dos níveis utilizados para classificar a probabilidade de deteção dos modos de falha, antes da sua ocorrência. Verifica-se pelo gráfico que grande parte das causas dos modos de falha (47 %) são impossíveis de detetar antes de acontecerem, sendo atribuído o nível 10, o máximo na escala de classificação. As parcelas mais reduzidas do gráfico (1% cada parcela) são identificadas pelos níveis 4 e 6, com a descrição moderada-alta e baixa, respetivamente. Ou seja, 1% das causas tem uma detetabilidade de nível 4 e outro 1% de nível 6.

### Causes by Initial Detection Rating

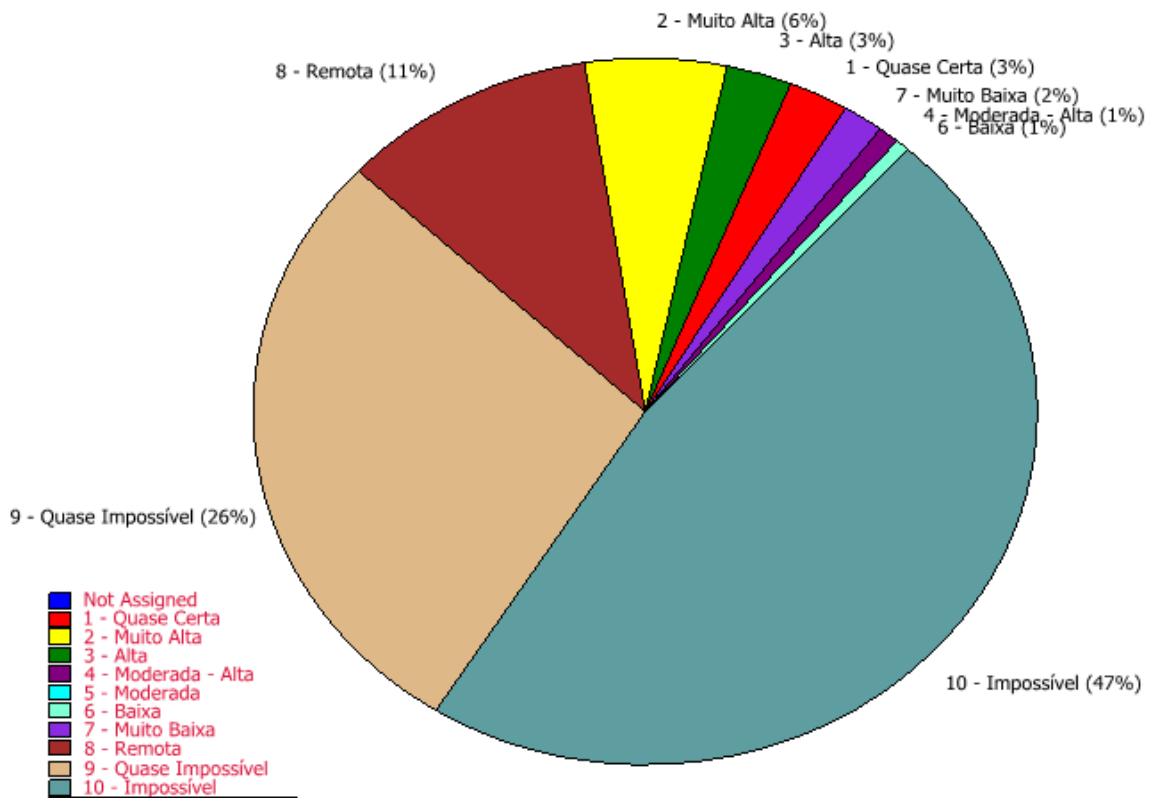


Gráfico 9. Percentagens dos modos de falha fornecidas pelos níveis de classificação da Detetabilidade.

Ao observar as tabelas da implementação da *FMEA* para o forno *Schmetz*, apresentadas no [anexo 2](#), verifica-se que os modos de falha que requerem um maior cuidado apresentam um valor do *RPN* entre 300 e 450 (a vermelho). De acordo com a análise *FMEA* efetuada, deverá ser dada prioridade ao sistema de vácuo cujo modo de falha está associado à impossibilidade de criar vácuo no forno. Existem três causas associadas ao *RPN* com o valor de 450, são elas a avaria da bomba difusora, da bomba mecânica e da bomba *roots*.

Existe ainda um outro *RPN* com um valor de 300 derivado do sistema de quadro elétrico e circuitos cujo modo de falha se encontra relacionado com a inoperacionalidade do controlador principal. A causa associada a este *RPN* é a avaria do controlador principal.

#### 5.4.2 – Gráficos obtidos relativos ao forno *TAV*

Nesta secção são apresentados os gráficos retirados do *XFMEA*, relativos ao forno *TAV*.

O gráfico 10 identifica a percentagem atribuída a cada um dos níveis utilizados para classificar a severidade das consequências dos modos de falha. Pelo mesmo gráfico observa-se que 33 % das consequências foram classificadas com o nível 4 (Severidade baixa). A menor parcela do gráfico corresponde a 3 % das consequências, identificadas com o nível 3 (Severidade muito baixa).

Apesar de ser uma percentagem relativamente reduzida, 8 % das consequências dos modos de falha correspondem ao nível 10 (Severidade catastrófica), o nível com maior perigo para o ser humano.

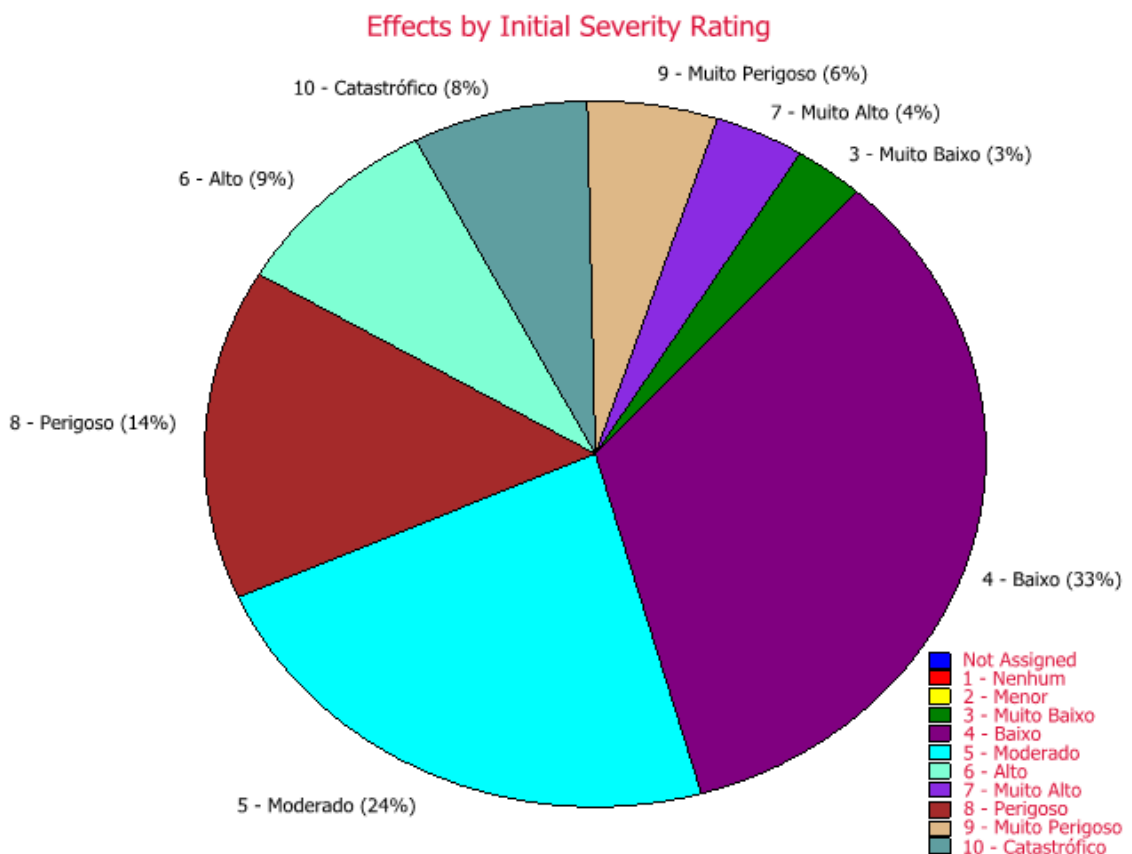


Gráfico 10. Percentagens das consequências fornecidas pelos níveis de classificação da Severidade.

O gráfico 11 identifica a percentagem atribuída a cada um dos níveis utilizados para classificar a probabilidade de ocorrência das causas que originam os modos de falha. Do gráfico deduz-se que 58 % das causas que originam os modos de falha têm uma probabilidade remota de acontecer, correspondente ao nível 2 de classificação. O nível 4 (Probabilidade de ocorrência baixa) é referente a apenas 2 % das causas que provocam os modos de falha. Para este caso em particular, 5 % das causas correspondem ao pior cenário, ou seja, ao nível 5, representado por uma probabilidade de ocorrência baixa-moderada.

O gráfico 12 identifica a percentagem atribuída a cada um dos níveis utilizados para classificar a probabilidade de deteção dos modos de falha, antes da sua ocorrência. Verifica-se pelo gráfico que grande parte das causas dos modos de falha (46 %) são impossíveis de detetar antes de acontecerem, sendo classificadas com o nível 10, o máximo na escala. As parcelas mais reduzidas do gráfico são identificadas pelos níveis 4 e 6, com a descrição moderada-alta e baixa,

respetivamente. Significa isto que 1% das causas tem uma detetabilidade de nível 4 e outro 1% de nível 6.

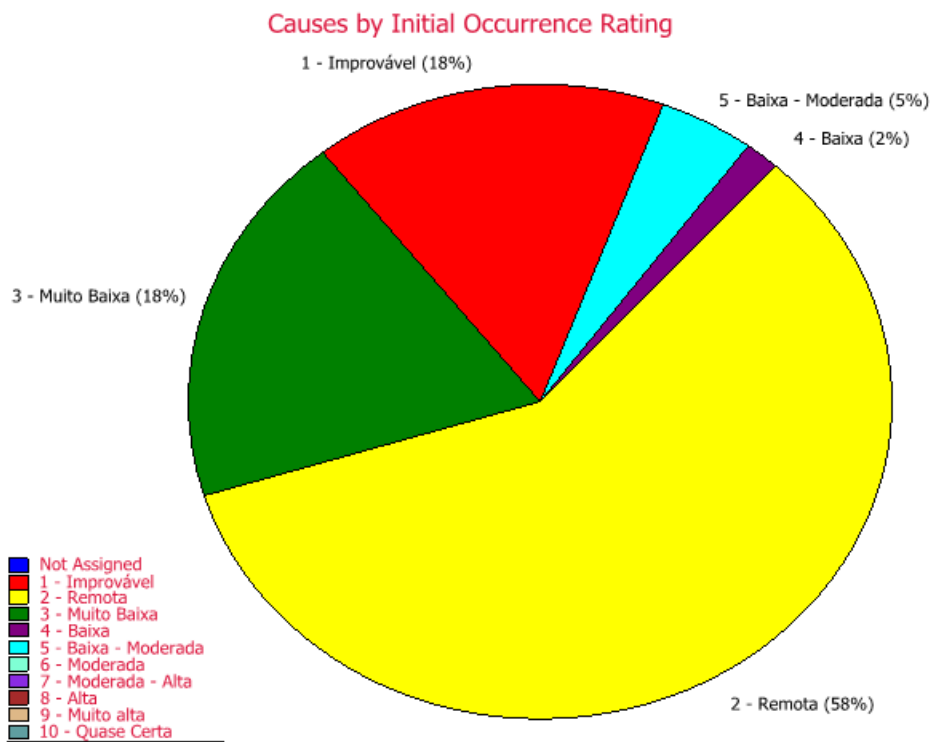


Gráfico 11. Percentagens das causas fornecidas pelos níveis de classificação da Ocorrência.

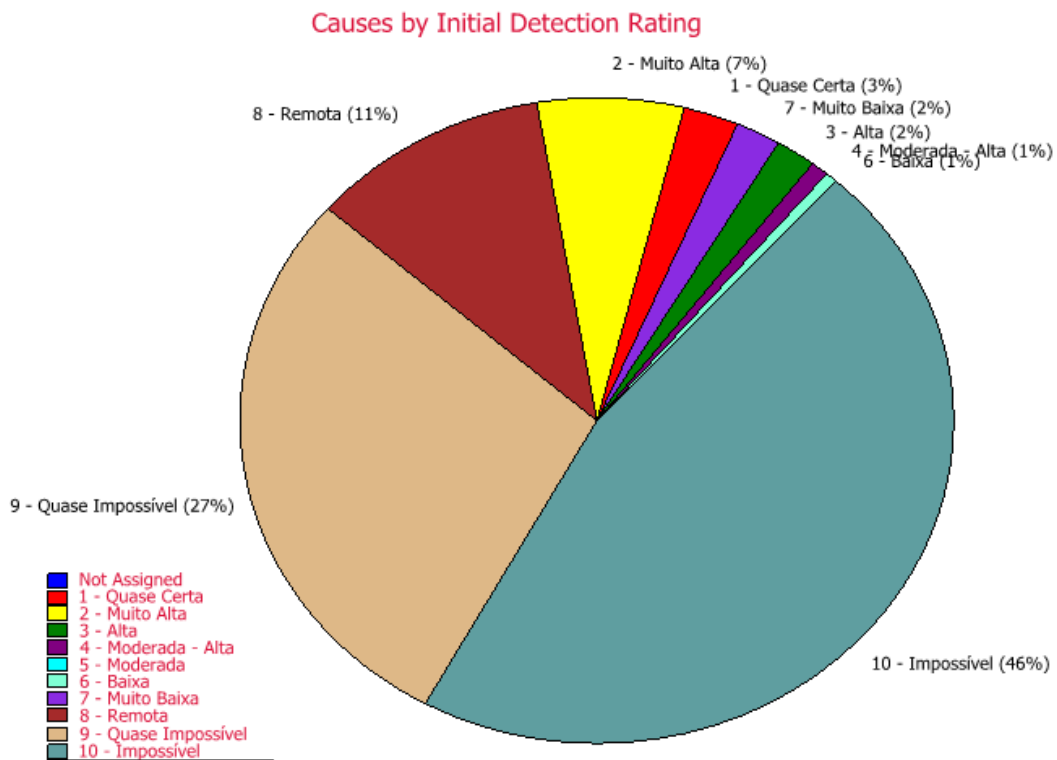


Gráfico 12. Percentagens dos modos de falha fornecidas pelos níveis de classificação da Detetabilidade.

Ambos fornos são constituídos de forma idêntica com a exceção de determinados componentes que podem existir num forno e ser ausentes no outro. Assim sendo, considera-se normal que os modos de falha mais críticos sejam os mesmos nos dois equipamentos. Como resultado, as conclusões relativas aos valores do *RPN*, relativamente ao forno *TAV*, serão as mesmas do forno *Schmetz*.

Relativamente às tabelas da implementação da *FMEA* para o forno *TAV*, apresentadas no [anexo 3](#), verifica-se que os modos de falha que requerem um maior cuidado apresentam um valor do *RPN* entre 300 e 450 (a vermelho). De acordo com a análise *FMEA* efetuada, deverá ser dada prioridade ao sistema de vácuo cujo modo de falha está associado à impossibilidade de criar vácuo no forno. Existem três causas associadas ao *RPN* com o valor de 450, são elas a avaria da bomba difusora, da bomba mecânica e da bomba *roots*. Existe ainda um outro *RPN* com um valor de 300, derivado do sistema de quadro elétrico e circuitos, cujo modo de falha se encontra relacionado com a inoperacionalidade do controlador principal. A causa associada a este *RPN* é a avaria do controlador principal.

## **5.5 – Análise geral dos dados**

A análise geral de dados permite perceber qual o equipamento ao qual se dedicou maior número de horas de manutenção, preventiva e corretiva, durante um determinado intervalo de tempo. Permite também determinar o número de intervenções efetuadas bem como o custo associado a tais.

Esta análise encontra-se estruturada do seguinte modo:

- Análise a cada equipamento por cada ano;
- Análise a cada equipamento por sistema.

### **5.5.1 – Análise a cada equipamento por cada ano**

Nesta seção são apresentados os dados relativos aos dois fornos, *Schmetz* e *TAV*, dados estes que são indicados por equipamento e por ano de intervenção. Para mais fácil compreensão, a informação foi dividida em três tópicos:

- N.º de intervenções;
- Duração das intervenções;
- Custo das intervenções,

e atribuída consoante a tipologia de intervenção.

### 5.5.1.1 – Forno de alto vácuo Schmetz – Ano 2016

Relativamente ao forno *Schmetz* (30003755), durante o ano de 2016, foram efetuadas 23 intervenções, das quais 4 de carácter preventivo. Com um custo total de 34 363.70 euros, estas intervenções consumiram 884.5 horas de trabalho, como apresentado na tabela 14.

Tabela 14: Dados relativos ao forno *Schmetz* no ano 2016.

Ano 2016	Schmetz - 30003755	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Tipologia da intervenção	Preventiva	4	71.00	2037.70
	Corretiva	19	813.50	32326.00
<b>Total</b>		23	884.50	34363.70

Pelo gráfico 13 percebe-se que grande parte dos gastos foram relativos a intervenções de carácter corretivo, num valor de 32 326.00 euros.

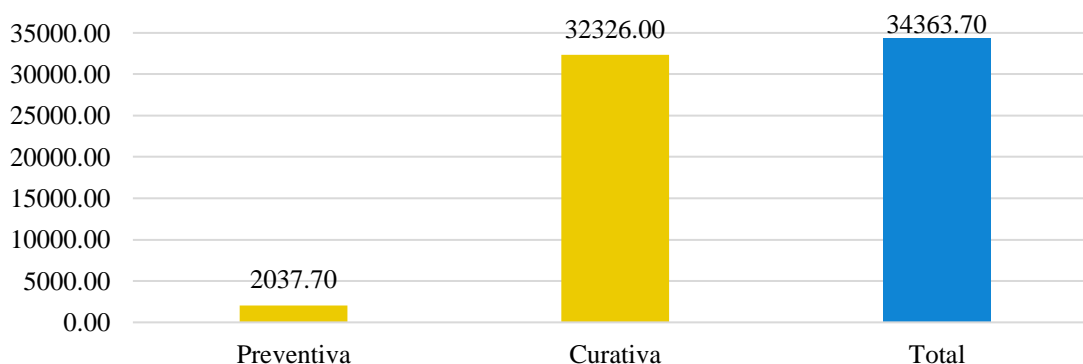


Gráfico 13. Total dos custos, em euros, no forno *Schmetz* no ano 2016.

### 5.5.1.2 – Forno de alto vácuo Schmetz – Ano 2017

Quanto ao mesmo equipamento, durante o ano de 2017 foram efetuadas 15 intervenções, 11 das quais de carácter corretivo, e despenderam-se 267.5 horas com um custo total de 9 921.91 euros, como indicado na tabela 15.

Tabela 15: Dados relativos ao forno *Schmetz* no ano 2017.

Ano 2017	Schmetz - 30003755	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Tipologia da intervenção	Preventiva	4	40.50	1089.45
	Corretiva	11	227.00	8832.46
<b>Total</b>		15	267.50	9921.91

O gráfico 14 permite referir que a grande parcela dos custos de intervenção é referente às ações corretivas, com um valor de 8 832.46 euros.

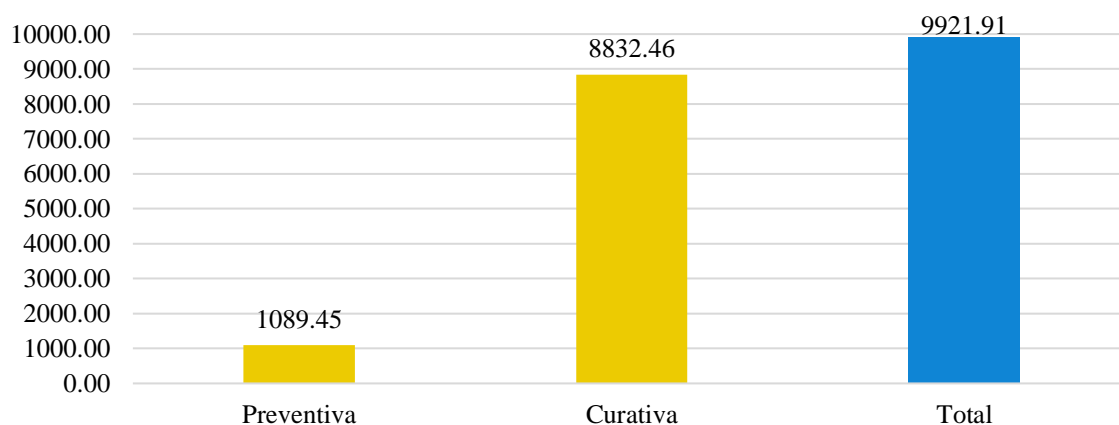


Gráfico 14. Total dos custos, em euros, no forno *Schmetz* no ano 2017.

#### 5.5.1.3 – Forno de alto vácuo *Schmetz* – Total dos dois anos, 2016 e 2017

Pela tabela 16 observa-se que, durante os anos de 2016 e 2017, foram realizadas 38 intervenções, consumindo estas 1 152 horas com um custo total de 44 285.61 euros.

Tabela 16: Dados relativos ao forno *Schmetz* nos dois anos.

Total	Schmetz - 30003755	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Tipologia da intervenção	Preventiva	8	111.50	3127.15
	Corretiva	30	1040.50	41158.46
	<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>1152.00</b>	<b>44285.61</b>

O gráfico 15 mostra os gastos totais em intervenções de manutenção, preventiva e corretiva, em dois anos de funcionamento do forno *Schmetz*.

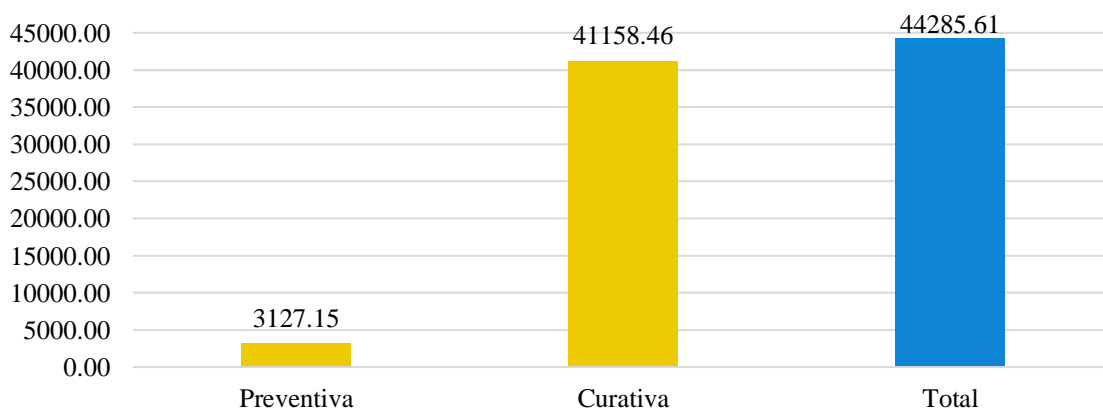


Gráfico 15. Total dos custos, em euros, no forno *Schmetz* nos dois anos.

#### 5.5.1.4 – Forno de alto vácuo TAV – Ano 2016

Quanto ao forno TAV (30006394), foram realizadas 15 intervenções durante o ano de 2016, das quais 11 de carácter corretivo. Durante este ano foram gastos 5 825.34 euros em 694 horas. Esta informação está disposta na tabela 17.

Tabela 17: Dados relativos ao forno TAV no ano 2016.

Ano 2016	TAV - 30006394	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Tipologia da intervenção	Preventiva	4	69.50	1994.65
	Corretiva	11	624.50	3830.69
<b>Total</b>		15	694.00	5825.34

Pelo gráfico 16 se observa que os custos das intervenções de carácter corretivo superam os de tipologia preventiva, sendo que estes últimos correspondem a um valor de 1 994.65 euros enquanto o valor de 3 830.69 euros é referente às intervenções corretivas.

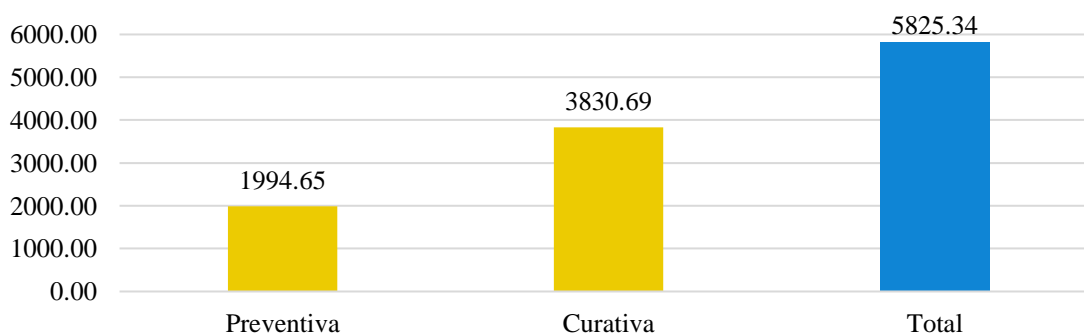


Gráfico 16. Total dos custos, em euros, no forno TAV no ano 2016.

#### 5.5.1.5 – Forno de alto vácuo TAV – Ano 2017

Durante o ano de 2017 existiram 17 intervenções, sendo 13 de carácter corretivo. No entanto, em comparação com o ano de 2016, despenderam-se mais horas neste ano, ainda que com um custo total inferior ao de 2017, como se pode confirmar pela tabela 18.

Tabela 18: Dados relativos ao forno TAV no ano 2017.

Ano 2017	TAV - 30006394	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Tipologia da intervenção	Preventiva	4	65.00	1751.26
	Corretiva	13	66.00	4190.39
<b>Total</b>		17	131.00	5941.65

Para o ano de 2017 o custo das intervenções de carácter corretivo (4 190.39 euros) superou novamente os custos de tipologia preventiva, como se observa no gráfico 17.

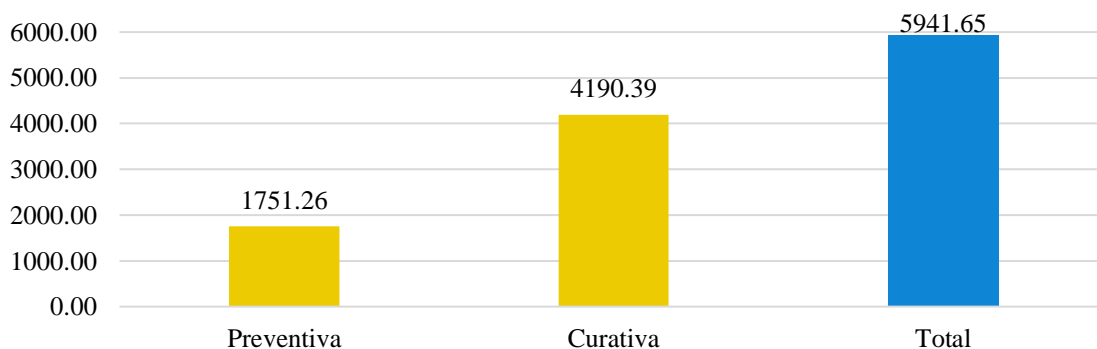


Gráfico 17. Total dos custos, em euros, no forno TAV no ano 2017.

#### 5.5.1.6 – Forno de alto vácuo TAV – Total dos dois anos, 2016 e 2017

Em 2016 e 2017 gastou-se um total de 11 766.99 euros em 32 intervenções, durante 825 horas. Esta informação confirma-se pela tabela 19.

Tabela 19: Dados relativos ao forno TAV nos dois anos.

Total	TAV - 30006394	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Tipologia da intervenção	Preventiva	8	134.50	3745.91
	Corretiva	24	690.50	8021.08
	<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>825.00</b>	<b>11766.99</b>

Através do gráfico 18 observa-se, para os dois anos de funcionamento do forno TAV, que os gastos em intervenções de tipologia corretiva (8 021.08 euros) foram superiores aos das intervenções de carácter preventivo.

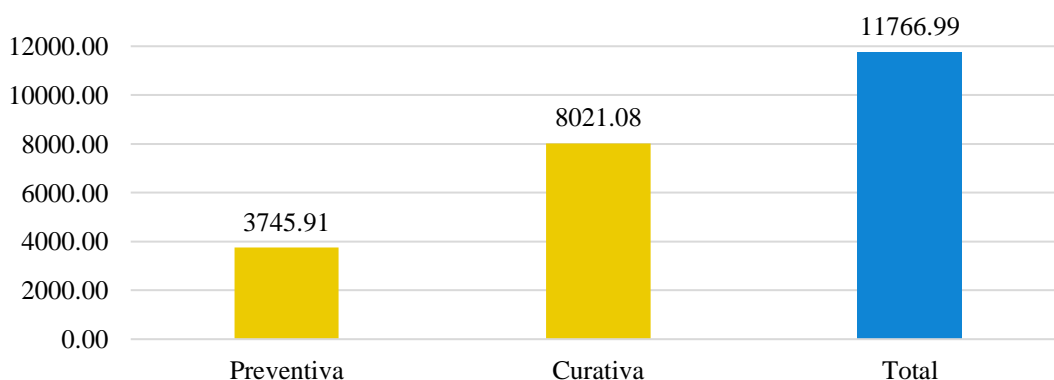


Gráfico 18. Total dos custos, em euros, no forno TAV nos dois anos.

### 5.5.1.7 – Comparação geral entre os dois equipamentos

O gráfico 19 ilustra os gastos nos dois fornos, durante os anos de 2016 e 2017, separando os valores consoante a tipologia da intervenção. Observa-se claramente que os gastos de maior dimensão resultaram das intervenções corretivas (ou curativas) no ano de 2016, no forno *Schmetz*.

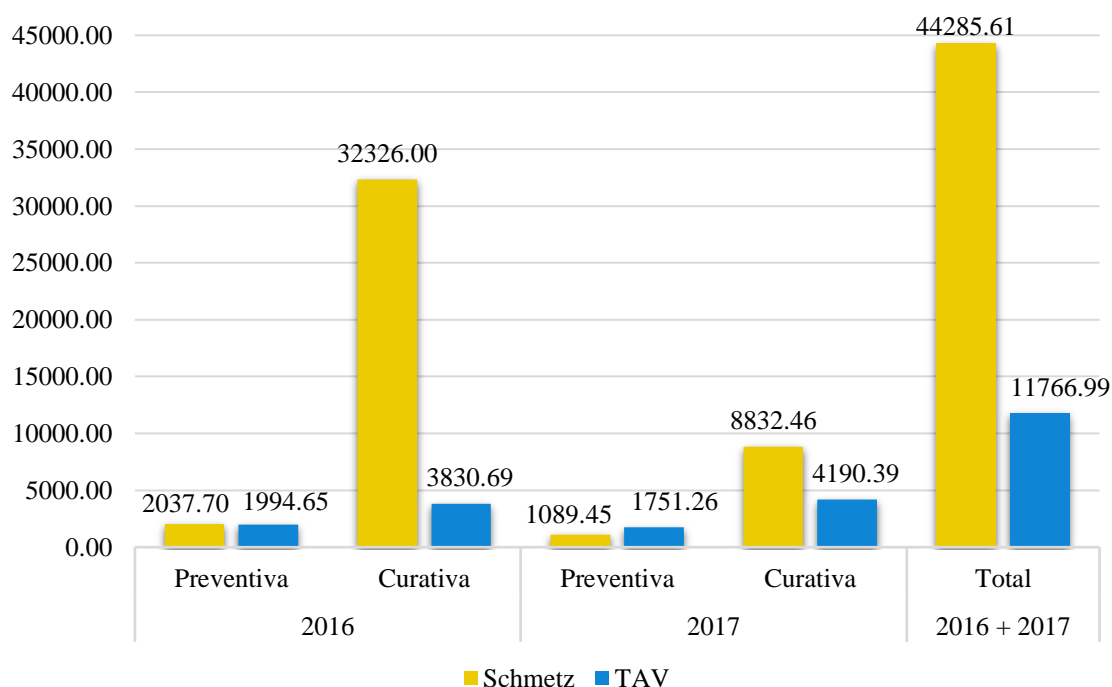


Gráfico 19. Custos, em euros, nos dois equipamentos, relativas aos dois anos e às duas tipologias de intervenção.

No gráfico 20 está representada a informação relativa aos custos totais em cada forno e em cada ano. Os custos totais referem-se às ações preventivas e corretivas. Com facilidade se verifica que as maiores despesas em manutenção, das duas tipologias, aconteceram no ano de 2016 no forno *Schmetz*.

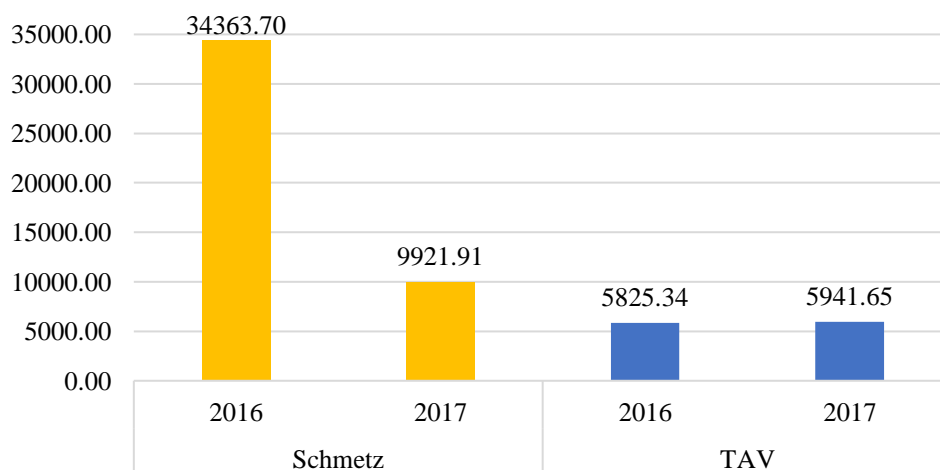


Gráfico 20. Custos totais para cada ano e cada forno.

### 5.5.2 – Análise a cada equipamento por sistema

Neste capítulo os dados são apresentados por equipamento, ano, n.º de intervenções, duração (h) e custo (€) destas, e por cada sistema que o constitui. De notar que apenas são consideradas as ações corretivas pois as preventivas não especificam qual a avaria/substituição que existiu e não têm relevância ao nível da aplicação no Trabalho Final de Mestrado.

A descrição incompleta de algumas ações de manutenção corretiva impediu a correta associação destas aos sistemas correspondentes.

Na tentativa de resolver tal problema foram contactados os operários dos fornos bem como um técnico encarregue da manutenção destes equipamentos. Foi também escrito e enviado um *email*, listando as ações de manutenção em questão, ao qual não foi apresentada uma solução que resolvesse o problema por inteiro.

Assim sendo, e sem mais opções à disposição, optou-se por criar um sistema denominado “Outros”, no qual foram inseridas as ações cujo tipo de sistema foi impossível de determinar.

#### 5.5.2.1 – Forno de alto vácuo Schmetz

A tabela 20 representa o número, duração e custo das intervenções efetuadas no ano de 2016 e 2017, para cada sistema do forno *Schmetz*.

Tabela 20: Dados relativos aos sistemas do forno *Schmetz*.

Ações de tipologia corretiva						
Schmetz - 30003755	2016			2017		
Sistema	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Câmara de vácuo	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
Aquecimento	2	75.00	11094.43	0	0.00	0.00
Arrefecimento a água	4	63.50	4343.80	2	8.00	215.20
Arrefecimento a árgon/azoto	1	1.00	26.90	2	10.00	269.00
Vácuo	3	85.00	9340.19	0	0.00	0.00
Pneumático	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
Hidráulico	0	0.00	0.00	1	7.00	246.34
Quadro elétrico e circuitos	4	123.50	5954.35	5	535.50	4874.97
Subida/descida de carga	2	10.00	636.04	0	0.00	0.00
Outros	1	8.50	243.95	3	113.50	3913.29
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>366.50</b>	<b>31639.66</b>	<b>13</b>	<b>674.00</b>	<b>9518.80</b>

O gráfico 21 permite uma fácil identificação dos sistemas, do forno *Schmetz*, onde os gastos em intervenções de carácter corretivo foram maiores. Verifica-se assim que os sistemas com mais gastos foram o sistema de aquecimento (11 094.43 euros, em 2016) e o sistema de vácuo (9 340.19 euros, em 2016).

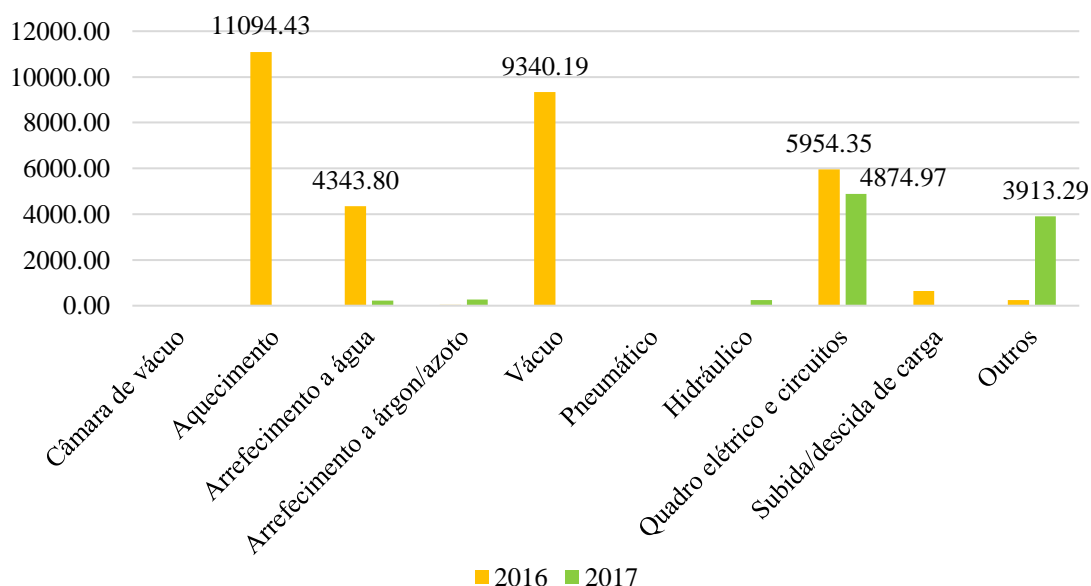


Gráfico 21. Custos, em euros, no forno *Schmetz*, em cada sistema.

#### 5.5.2.2 – Forno de alto vácuo TAV

A tabela 21 representa o número, duração e custo das intervenções ocorridas no ano de 2016 e 2017, para cada sistema do forno TAV.

Tabela 21: Dados relativos aos sistemas do forno TAV.

Ações de tipologia corretiva						
TAV - 30006394	2016			2017		
Sistema	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)	N.º de intervenções	Duração (h)	Custo (€)
Câmara de vácuo	1	1.00	61.10	1	6.50	425.58
Aquecimento	2	5.50	1763.93	0	0.00	0.00
Arrefecimento a água	2	1.00	77.36	2	14.50	423.81
Arrefecimento a árgon/azoto	0	0.00	0.00	2	2.00	61.45
Vácuo	2	17.00	487.90	1	14.50	2309.95
Pneumático	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
Quadro elétrico e circuitos	1	6.00	172.20	2	571.00	596.90
Outros	2	24.00	698.20	6	27.50	942.70
<b>Total</b>	10	54.50	3260.69	14	636.00	4760.39

Pelo gráfico 22 facilmente se observa quais os sistemas, do forno TAV, onde os gastos em intervenções de carácter corretivo foram maiores. Os sistemas com mais gastos foram o sistema de aquecimento (1 763.93 euros, em 2016) e o sistema de vácuo (2 309.95 euros, em 2017).

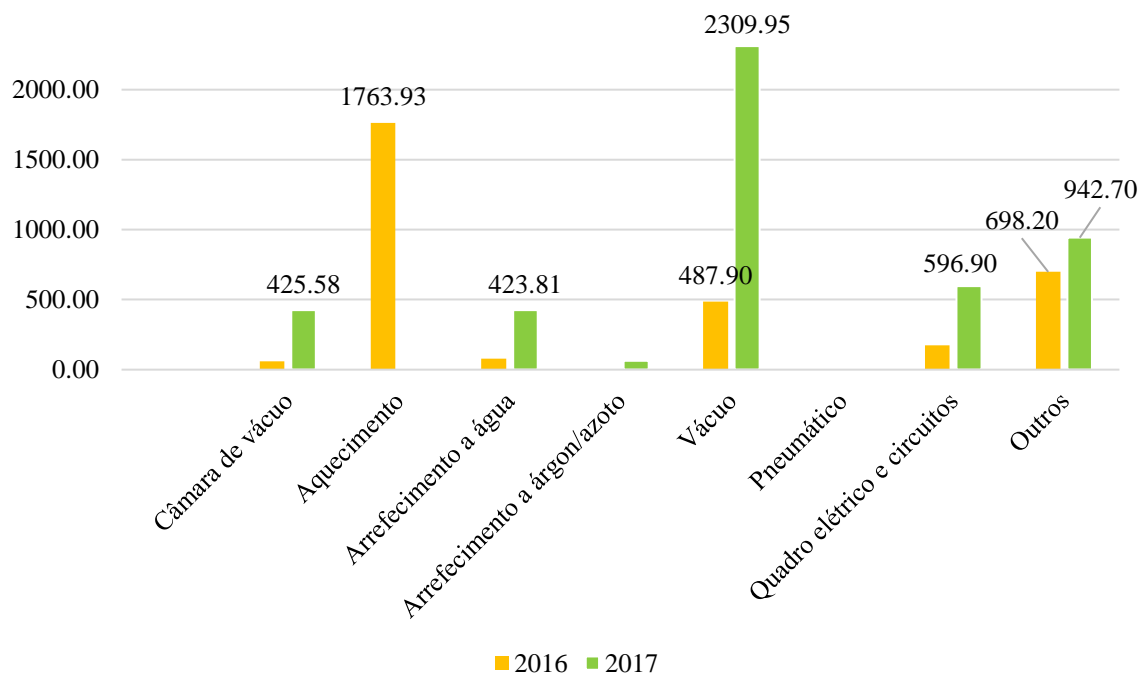


Gráfico 22. Custos, em euros, no forno TAV, em cada sistema.

# Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros

## 6.1 – Conclusões

Com a finalização deste documento, e depois de efetuadas três análises distintas à informação disponibilizada pela TAP Air Portugal, foi possível concluir que os objetivos foram cumpridos. Assim sendo, neste subcapítulo é elaborada uma síntese dos resultados derivados da análise de Pareto, da análise *FMEA* e da análise geral de dados.

### 6.1.1 – Conclusões relativas à análise de Pareto

A Lei de Pareto assume que 80% das consequências são provocadas por 20% das causas, sendo que poderão existir ligeiras diferenças nas percentagens.

Da análise de Pareto, efetuada a cada um dos fornos de alto vácuo, resultaram os dados abaixo indicados, os quais se encontram divididos por cada equipamento e pelo número de intervenções, duração e custo destas.

Respetivamente à análise de Pareto efetuada, tendo por base o número de intervenções, conclui-se que nenhum dos dois fornos segue o Princípio de Pareto, pois 20% dos sistemas correspondem a apenas 50.00% do número de intervenções realizadas em ambos os equipamentos.

Relativamente ao tempo despendido em intervenções, apenas o forno *Schmetz* segue a Lei de Pareto, sendo que neste caso 20% dos sistemas correspondem a 75.06% (perto dos 80%) dos tempos de intervenção. Os sistemas “Quadro elétrico e circuitos” e “Outros” consideram-se os mais críticos, sendo os responsáveis por 75.06% do tempo total despendido em intervenções. Já o forno *TAV*, não segue o Princípio anterior pois 20% dos sistemas deste equipamento correspondem a 91.02% do tempo despendido em intervenções.

Tendo por base o custo das intervenções efetuadas, nem o forno *Schmetz* nem o forno *TAV* cumprem a Lei de Pareto, pois 20% dos sistemas correspondem apenas a 53.27% e 56.87%, respetivamente, dos custos das intervenções.

### 6.1.2 – Conclusões relativas à análise *FMEA*

Esta secção encontra-se dividida em três partes:

#### 6.1.2.1 – FMEA forno Schmetz

Relativamente à análise *FMEA* ao forno *Schmetz*, 30 % das consequências dos modos de falha foram classificadas com o nível 4 (Severidade baixa). Apenas 2 % das consequências são identificadas com o nível 3 (Severidade muito baixa). Apesar de ser uma percentagem relativamente reduzida, 9 % das consequências dos modos de falha correspondem ao nível 10 (Severidade catastrófica), o nível com maior perigo para o ser humano.

Observa-se que 60 % das causas, que originam os modos de falha, têm uma probabilidade remota de acontecer correspondente ao nível 2 de classificação. O nível 4 (Probabilidade de ocorrência baixa) é referente a apenas 2 % das causas que provocam os modos de falha. Para este caso em particular, 4 % das causas correspondem ao pior cenário, ou seja, ao nível 5, representado por uma probabilidade de ocorrência baixa-moderada.

Verifica-se que grande parte das causas dos modos de falha (47 %) são impossíveis de detetar antes de acontecerem, sendo atribuído o nível 10, o máximo na escala de classificação. As descrições de detetabilidade moderada-alta (nível 4) e baixa (nível 6) correspondem, respetivamente, a 1% das causas.

#### 6.1.2.2 – FMEA forno TAV

Quanto à análise *FMEA* aplicada ao forno *TAV*, 33 % das consequências dos modos de falha foram classificadas com o nível 4 (Severidade baixa), sendo que apenas 3 % das consequências foram identificadas com o nível 3 (Severidade muito baixa). Neste caso, 8 % das consequências dos modos de falha correspondem ao nível 10 (Severidade catastrófica).

Verifica-se que 58 % das causas que originam os modos de falha têm uma probabilidade remota de acontecer correspondente ao nível 2 de classificação. O nível 4 (Probabilidade de ocorrência baixa) é referente a apenas 2 % das causas que provocam os modos de falha. Para este caso em particular, 5 % das causas correspondem ao pior cenário, ou seja, ao nível 5, representado por uma probabilidade de ocorrência baixa-moderada.

Verifica-se que 46% das causas dos modos de falha são impossíveis de detetar antes de acontecerem, sendo classificadas com o nível 10, o máximo na escala. As descrições de detetabilidade moderada-alta (nível 4) e baixa (nível 6) correspondem, respetivamente, a 1% das causas.

#### 6.1.2.3 – Sistemas mais críticos

De acordo com a análise *FMEA* efetuada, e tendo em consideração que ambos fornos apresentam os mesmos modos de falha críticos, deverá ser dada prioridade ao sistema de vácuo cujo modo de

falha está associado à impossibilidade de criar vácuo nos fornos. Existem três causas associadas ao *RPN* com o valor de 450, são elas a avaria da bomba difusora, da bomba mecânica e da bomba *roots*. Existe ainda um outro *RPN* com um valor de 300 derivado do sistema de quadro elétrico e circuitos cujo modo de falha se encontra relacionado com a inoperacionalidade do controlador principal. A causa associada a este *RPN* é a avaria do controlador principal.

### 6.1.3 – Conclusões relativas à análise de dados

Esta parte foi dividida em três pontos:

#### 6.1.3.1 – *Ações de carácter preventivo e corretivo*

De acordo com os dados analisados, e considerando as ações de carácter preventivo e corretivo, concluiu-se que o forno *Schmetz* foi o equipamento onde os custos foram mais avultados, em particular no ano de 2016 (34 363.70 €), ano este onde se despenderam 884.5 horas em 23 intervenções de manutenção.

Já no forno *TAV* foram gastos 5 941.65 euros, no ano de 2017, despendendo-se 131 horas em 17 intervenções.

#### 6.1.3.2 – *Ações apenas de carácter corretivo*

No forno *Schmetz*, as intervenções corretivas com maior custo ocorreram no sistema de aquecimento e no sistema de vácuo, no ano de 2016, no valor de 11 094.43 euros e 9 340.19 euros, respetivamente.

Quanto ao forno *TAV*, foi no sistema de vácuo, em 2017, que as intervenções corretivas foram mais dispendiosas (2 309.95 euros). Em contrapartida foi em 2016, no sistema de aquecimento, onde o custo das intervenções foi mais elevado (1 763.93 euros).

#### 6.1.3.3 – *Problemas encontrados na empresa*

Durante o estudo efetuado na TAP Air Portugal foi possível constatar alguns pontos negativos, nomeadamente a falta de uma plataforma, de preferência em formato digital, para o registo e gestão das ações de manutenção preventiva e corretiva. A utilização de uma codificação normalizada relativa à identificação dos sistemas e componentes onde se registou a ocorrência seria também um ponto a acrescentar. Sem este tipo de ferramentas de auxílio torna-se difícil controlar e estar a par dos gastos e das intervenções efetuadas aos equipamentos, como é o caso dos fornos de alto vácuo.

Considera-se também que alguns componentes, os mais críticos, poderiam estar em stock, por forma a evitar a paragem prolongada dos fornos, em caso de falha desses. Em alternativa,

poderiam ser encomendados ou adquiridos, antecipadamente, os componentes nos quais fosse possível prever a ocorrência de uma falha, a curto prazo. Tenha-se como exemplo o vedante da porta do forno TAV. De notar que, embora o stock de componentes possa acrescentar uma despesa desnecessária, por vezes o preço a pagar pela paragem prolongada do equipamento ultrapassa o do stock.

## **6.2 – Trabalho a realizar no futuro**

Num possível desenvolvimento futuro, que possa vir a ser efetuado a este documento, seria vantajoso ter acesso a um histórico de avarias mais detalhado dos equipamentos, sendo fornecidos diversos parâmetros que faltaram para o completo desenvolvimento deste Trabalho Final de Mestrado. Parâmetros tais como a data de início e fim das intervenções de manutenção corretiva, bem como o tempo exato de paragem dos equipamentos, teriam permitido efetuar uma análise fiabilística aos componentes mais críticos de cada forno de alto vácuo.

A realização de uma análise de fiabilidade, aos componentes críticos dos equipamentos, poderia permitir antecipar os momentos de ocorrência das falhas através do cálculo probabilístico, adquirir os bens no momento exato e gerir o risco associado às paragens dos equipamentos em caso de avaria.

Poderia ser desenvolvida uma padronização do tipo de falhas, codificações específicas para os sistemas, subsistemas e componentes, bem como os diversos modos de falha, tempos de intervenção, materiais consumidos, etc.

A aquisição de um *software* específico ou, em alternativa, o desenvolvimento de uma base de dados com toda a informação anteriormente referenciada permitiria à TAP M&E ter um maior controlo e acesso rápido a todas as ocorrências e registos de intervenções, com a emissão imediata de gráficos, tabelas e outros indicadores, tais como aqueles apresentados no presente documento.

Outro aspeto relevante seria ter à disposição uma equipa dedicada à implementação da *FMEA*, pois a determinação de todos os possíveis modos de falha e a elaboração das tabelas de Severidade, de Ocorrência e de Detetabilidade pode-se tornar bastante complexa, sendo que profissionais dedicados a estas tarefas permitem a obtenção de resultados mais precisos e fiáveis.

# Referências

Anes, V., Henriques, E., Freitas, M. & Reis, L., 2018. A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis. *Qual Reliab Engng Int.*, pp. 1 - 13.

Bhatti, S. H. et al., 2018. Efficient estimation of Pareto model: Some modified percentile estimators. *PLoS ONE*, Volume 13, pp. 1-15.

Certa, A., Galante, G. M., La Fata, C. M. & Enea, M., 2017. ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number. *Computers & Industrial Engineering 108*, Volume 108, pp. 100 - 110.

Chong, K. E., Ng, K. C. & Goh, G. G. G., 2015. Improving Overall Equipment Effectiveness (OEE) Through Integration of Maintenance Failure Mode and Effect Analysis (Maintenance-FMEA) in a Semiconductor Manufacturer: A case Study. *Proceedings of the 2015 IEEE IEEM*, pp. 1427-1431.

EKONOMISTA, 2018. [Online]  
Available at: <https://www.e-konomista.pt/artigo/lei-de-pareto/>  
[Acedido em 10 Junho 2018].

Erbiyik, H. & Can, E., 2016. Determination of the Risks That Are Emerged from the Use of Aerial Photographs in the Mapping Activities for Landslide Movements by FMEA and Pareto Analysis Methods and Suggested Solutions. *Procedia Engineering*, Volume 161, pp. 850 - 858.

Jiang, W., Xie, C., Wei, B. & Zhou, D., 2016. A modified method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of aircraft turbine rotor blades. *Advances in Mechanical Engineering*, Volume 8, pp. 1 - 16.

Kimita, K., Sakao, T. & Shimomura, Y., 2018. A failure analysis method for designing highly reliable product-service systems. *Res Eng Design*, Volume 29, pp. 143 - 160.

Kim, K. O. & Zuo, M. J., 2018. General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, Volume 169, pp. 321 - 329.

Liu, H.-C., You, J.-X., Chen, S. & Chen, Y.-Z., 2016. An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty. *IIE TRANSACTIONS*, Volume 48, pp. 1027 - 1042.

Liu, H.-C., You, J.-X. & You, X.-Y., 2014. Evaluating the risk of healthcare failure modes using interval 2-tuple hybrid weighted distance measure. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 78, pp. 249 - 258.

Nguyen, T.-L., Shu, M.-H. & Hsu, B.-M., 2016. Extended FMEA for Sustainable Manufacturing: An Empirical study in the Non-Woven Fabrics Industry. *Sustainability*, Volume 8, p. 939.

Omnicon, 2018. [Online]  
Available at: <http://www.omnicongroup.com/wp-content/uploads/2017/02/FMEA-e1486662705912.jpg>  
[Acedido em 10 Junho 2018].

Pedrosa, B. M. M., 2014. *Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial*. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Reliasoft, 2018. *ReliaSoft*. [Online]  
Available at: <https://www.reliasoft.com/resources/resource-center/failure-modes-effects-and-criticality-analysis>  
[Acedido em 6 Julho 2018].

Silva, M. M. et al., 2016. A Grey Theory Based Approach to Big Data Risk Management Using FMEA. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2016, pp. 1-15.

Singh, J., Singh, H., Gandhi, S. K. & Chhibber, Y. S., 2017. Assessment of Failure Mode Effect Analysis in Manufacturing Unit: A case Study. *The IUP Journal of Operations Management*, Volume XVI, pp. 1-24.

TAP Air Portugal, 2018a. *TAP Air Portugal: O Grupo TAP*. [Online]  
Available at: <https://www.tapairportugal.com/pt/sobre-nos/grupo-tap>  
[Acedido em 14 Setembro 2018].

TAP Air Portugal, 2018b. *TAP Air Portugal: Conhecer a Frota*. [Online]  
Available at: <https://www.flytap.com/pt-pt/a-bordo/conhecer-a-frota>  
[Acedido em 17 Outubro 2018].

TAP Air Portugal, 2018c. *TAP Maintenance & Engineering: Maintenance Centres*. [Online]  
Available at: <https://www.tapme.pt/Pages/About%20TAP%20ME/Maintenance-Centres.aspx>  
[Acedido em 14 Setembro 2018].

TAP Air Portugal, 2018d. *TAP Maintenance & Engineering: Care2Airframe*. [Online] Available at: <https://www.tapme.pt/Pages/Our%20Services/Care-Airframe.aspx> [Acedido em 14 Setembro 2018].

TAP Air Portugal, 2018e. *TAP Maintenance & Engineering: Care2Engines*. [Online] Available at: <https://www.tapme.pt/Pages/Our%20Services/Care-Engines.aspx> [Acedido em 14 Setembro 2018].

TAP Air Portugal, 2018f. *TAP Maintenance & Engineering: Our Services*. [Online] Available at: <https://www.tapme.pt/Pages/Our%20Services/Services.aspx> [Acedido em 15 Setembro 2018].

TAP Air Portugal, 2018. *TAP Air Portugal: A Nossa História*. [Online] Available at: <https://www.tapairportugal.com/pt/a-nossa-historia/cronologia> [Acedido em 14 Setembro 2018].

Wang, L.-E., Liu, H.-C. & Quan, M.-Y., 2016. Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval-valued intuitionistic fuzzy environments. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 102, pp. 175 - 185.

Zhao, H., You, J.-X. & Liu, H.-C., 2017. Failure mode and effect analysis using MULTIMOORA method with continuous weighted entropy under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Soft Comput*, Volume 21, pp. 5355 - 5367.

# Anexo 1

Abaixo se encontra a tabela que permite entender o significado das cores presentes nas tabelas seguintes, deste anexo 1.

São também apresentadas as tabelas originais fornecidas pela TAP Air Portugal, com algumas adaptações efetuadas pelo autor deste documento.

Avárias impossíveis de descrever ou não consideradas para o caso.	Red
Avárias às quais se efetuou a divisão pelos sistemas correspondentes.	Red, Blue
Avárias divididas, aptas e utilizadas para a análise de Pareto.	Blue
Avárias aptas e utilizadas para a análise de Pareto.	White
Ações preventivas	Yellow

**REGISTO DIGITAL DE AVARIAS - FORNO SCHMETZ 30003755**

<b>Ordem</b>	<b>Ação/Avaria</b>	<b>Sistema</b>	<b>Tipologia da Intervenção</b>	<b>Início da Intervenção</b>	<b>Horas de Trabalho</b>	<b>Custo Total da Intervenção</b>
70087425	Substituir o óleo na difusora.	Vácuo	Curativa	12/01/2016	8.00	5 846.40 €
70087635	Sinótico a acender e a apagar.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	20/01/2016	35.00	3 011.76 €
70087955	Fusível do forno fundido.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	03/02/2016	1.50	43.05 €
70088028	Bomba hidráulica com fuga e fusos da tampa.	Outros	Curativa	05/02/2016	14.00	492.68 €
70088080	Substituir o filtro de água ( tanque ).	Arrefecimento a água	Curativa	08/02/2016	5.00	216.80 €
70088370	Posicionamento do <i>connecting bolt</i> .	Aquecimento	Curativa	22/02/2016	74.00	3 356.73 €
70088432	Substituir isolamento térmico da tampa.	Aquecimento	Curativa	23/02/2016	1.00	7 737.70 €
70088497	Substituir vedantes do permutador de calor.	Arrefecimento a água	Curativa	25/02/2016	31.00	3 066.67 €
70090983	Ensaar forno. Arranques da difusora do forno.	Vácuo	Curativa	21/06/2016	3.00	86.10 €
70091190	Substituir sensores do carro.	Subida/descida de carga	Curativa	30/06/2016	3.00	389.70 €
70091191	Resistência de isolamento superior e inferior baixa.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	30/06/2016	83.00	2 764.50 €
70091193	Reparar fuga de água no circuito de água.	Arrefecimento a água	Curativa	30/06/2016	0.00	28.39 €
70091571	Bomba de água principal com ruído.	Arrefecimento a água	Curativa	21/07/2016	27.50	1 031.94 €
70092499	Substituir óleo, filtros e reparar ruído.	Vácuo	Curativa	05/09/2016	74.00	3 407.69 €
70094267	Reparar fuga nas válvulas, permutador e tampa.	Outros	Curativa	25/11/2016	8.50	243.95 €
70094472	Reparar infiltração no quadro elétrico.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	05/12/2016	4.00	135.04 €
70094493	Reparar entrada de gás irregular.	Arrefecimento a árgon/azoto	Curativa	06/12/2016	1.00	26.90 €
70095045	Reparar radiador a sair água.	Arrefecimento a água	Curativa	09/01/2017	4.00	107.60 €
70095582	Reparar impressora do forno.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	01/02/2017	1.50	40.35 €
70095729	Reparar permutador.	Arrefecimento a água	Curativa	01/02/2017	4.00	107.60 €

REGISTO DIGITAL DE AVARIAS - FORNO SCHMETZ 30003755 (continuação)						
Ordem	Ação/Avaria	Sistema	Tipologia da Intervenção	Início da Intervenção	Horas de Trabalho	Custo Total da Intervenção
70096337	Reparar a fuga entre a válvula 1 e 2.	Vácuo	Curativa	27/02/2017	0.00	0.00 €
70096909	Reparar forno - não trabalha.	Outros	Curativa	22/03/2017	7.00	207.76 €
70097094	Fusos da tampa empenados. Bomba com fuga.	Outros	Curativa	28/03/2017	0.00	0.00 €
70097295	Reparar monitor do forno apagado.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	06/04/2017	2.00	53.80 €
70097853	Reparar defletor de gás da mesa.	Arrefecimento a árgon/azoto	Curativa	04/05/2017	2.00	53.80 €
70097938	Reparar controlador em avaria.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	09/05/2017	4.00	1 960.60 €
70100236	Fusos da tampa empenados. Bomba com fuga.	Outros	Curativa	18/08/2017	2.00	0.00 €
70101123	Acompanhamento de intervenção no forno.	Outros	Curativa	21/09/2017	0.00	0.00 €
70101283	Inspeção do forno de vácuo.	Outros	Curativa	19/10/2017	104.50	3 705.53 €
70102451	Reparar <i>flaps</i> presos no forno.	Arrefecimento a árgon/azoto	Curativa	09/11/2017	8.00	215.20 €
70103807	Reparar/substituir <i>limit switch</i> .	Subida/descida de carga	Curativa	04/01/2018	4.00	109.44 €
90098505	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	09/11/2015	8.00	229.60 €
90100640	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/02/2016	26.00	746.20 €
90102821	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	09/05/2016	16.00	459.20 €
90108215	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/08/2016	19.00	545.30 €
90110322	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/11/2016	10.00	287.00 €
90112414	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/02/2017	24.00	645.60 €
90123832	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/05/2017	8.00	215.20 €
90126904	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/08/2017	0.00	0.00 €
90129025	Forno de Vácuo typ. M450 / 3h 150x150.		Preventiva	08/11/2017	8.50	228.65 €
100008782	Configuração do monitor do forno.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	11/09/2017	88.00	2 380.22 €
110000777	Intervenção do técnico da <i>Siemens</i> no <i>PLC</i> .	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	17/03/2016	440.00	440.00 €
70088028	Bomba hidráulica com fuga.	Hidráulico	Curativa	05/02/2016	7.00	246.34 €
70088028	Fusos da tampa empenados.	Subida/descida de carga	Curativa	05/02/2016	7.00	246.34 €

<b>REGISTO DIGITAL DE AVARIAS - FORNO TAV 30006394</b>						
<b>Ordem</b>	<b>Ação/Avaria</b>	<b>Sistema</b>	<b>Tipologia da Intervenção</b>	<b>Início da Intervenção</b>	<b>Horas de Trabalho</b>	<b>Custo Total da Intervenção</b>
70087513	Controlador de temperatura avariado.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	15/01/2016	6.00	172.20 €
70087817	Subida das temperaturas tendo-se abortado.	Outros	Curativa	28/01/2016	11.00	315.70 €
70088414	Verificar fuga de óleo no copo do empanque.	Vácuo	Curativa	23/02/2016	4.00	114.80 €
70089099	Reparar forno com ceramicas partidas.	Aquecimento	Curativa	22/03/2016	2.00	57.40 €
70091153	Reparar porta. Mola sem força.	Câmara de vácuo	Curativa	29/06/2016	1.00	61.10 €
70091573	Torres de arrefecimento com corrosão.	Arrefecimento a água	Curativa	20/07/2016	0.00	20.04 €
70091574	Porcas de fixação das resistências danificadas.	Aquecimento	Curativa	20/07/2016	3.50	1 706.53 €
70092215	Reparar forno inoperacional.	Outros	Curativa	22/08/2016	13.00	382.50 €
70092500	Reparar/substituir borracha da tampa.	Câmara de vácuo	Curativa	05/09/2016	0.00	0.00 €
70093623	Substituir bateria do PLC. Fuga de óleo no empanque.	Outros	Curativa	28/10/2016	0.00	0.00 €
70093747	Verificar ruído na bomba primária.	Vácuo	Curativa	07/11/2016	13.00	373.10 €
70094774	Reparar torre com corrosão.	Arrefecimento a água	Curativa	19/12/2016	1.00	57.32 €
70095058	Reparar forno. Falha no circuito.	Outros	Curativa	09/01/2017	6.50	174.85 €
70095338	Reparar forno. Erro na válvula de desbaste.	Outros	Curativa	19/01/2017	9.00	242.10 €
70097839	Reparar forno em alarme (óleo).	Vácuo	Curativa	04/05/2017	14.50	2 309.95 €
70098389	Efectuar diversas reparações conforme recomendado.	Outros	Curativa	26/05/2017	2.00	157.66 €
70098440	Eletroválvula presa no depósito de árgon.	Arrefecimento a árgon/azoto	Curativa	29/05/2017	2.00	53.80 €

**REGISTO DIGITAL DE AVARIAS - FORNO TAV 30006394 (continuação)**

<b>Ordem</b>	<b>Ação/Avaria</b>	<b>Sistema</b>	<b>Tipologia da Intervenção</b>	<b>Início da Intervenção</b>	<b>Horas de Trabalho</b>	<b>Custo Total da Intervenção</b>
70098527	Reparar/substituir borracha da tampa.	Câmara de vácuo	Curativa	02/06/2017	6.50	425.58 €
70099338	Reparar forno a baixar temperatura.	Outros	Curativa	06/07/2017	5.00	137.44 €
70099364	Forno de vácuo sem tensão.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	07/07/2017	1.00	26.90 €
70099512	Reparar tempos de subida de ciclo (6V).	Outros	Curativa	17/07/2017	1.00	26.90 €
70100978	Reparar fuga de água na torre de refrigeração.	Arrefecimento a água	Curativa	19/09/2017	12.50	370.01 €
70101520	Reparar forno em alarme.	Outros	Curativa	09/10/2017	4.00	203.75 €
70102214	Reparar fuga de água nos tubos de arrefecimento.	Arrefecimento a água	Curativa	02/11/2017	2.00	53.80 €
70102770	Substituição das porcas dos <i>flaps</i> de arrefecimento.	Arrefecimento a árgon/azoto	Curativa	20/11/2017	0.00	7.65 €
70103798	Substituição das borrachas da porta. Eliminar fugas.	Câmara de vácuo	Curativa	03/01/2018	16.00	0.00 €
90098913	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	19/11/2015	14.00	401.80 €
90101034	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	19/02/2016	16.00	459.20 €
90103286	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	19/05/2016	24.00	688.80 €
90108588	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	19/08/2016	12.00	344.40 €
90110756	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	21/11/2016	17.50	502.25 €
90112844	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	20/02/2017	14.00	376.60 €
90124285	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	19/05/2017	24.00	645.60 €
90127299	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	21/08/2017	13.00	349.70 €
90129399	Forno de Vácuo Horizontal TAV.		Preventiva	20/11/2017	14.00	379.36 €
110000755	Substituição do condensador e parametrização contínua.	Quadro elétrico e circuitos	Curativa	02/02/2016	570.00	570.00 €

# Anexo 2

O anexo 2 inclui as tabelas, retiradas do software *XFMEA*, resultantes da implementação da *FMEA* no forno de alto vácuo *Schmetz*.

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Câmara de vácuo								
Separar os componentes no interior do forno do meio exterior. Permitir a existência de vácuo no interior do forno.	Fuga de vácuo nos flanges de ligação.	Perda de vácuo no forno.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Fuga de árgon/azoto nos flanges de ligação.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento a árgon/azoto.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Fuga de água nos flanges de ligação.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento a água.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Ruído ao abrir ou fechar a tampa do forno.	Ruído. Eventual degradação do mecanismo.	4	Mecanismo de fecho da tampa danificado.	2		10	80
				Mecanismo de fecho da tampa sem lubrificante.	4		6	96
				Hidráulico danificado.	2		10	80
	Tampa do Schmetz não abre/fecha.	Impossibilidade de colocar ou retirar a carga do forno.	5	Hidráulico danificado.	2		10	100
Hidráulico com fuga.				3		10	150	
Pressão reduzida no sistema hidráulico.				3		9	135	
Mecanismo de fecho da tampa danificado.				2		10	100	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Câmara de vácuo								
Separar os componentes no interior do forno do meio exterior. Permitir a existência de vácuo no interior do forno.	Cilindro de vácuo com temperatura exterior excessiva.	Paragem do forno.	7	Fuga nos tubos de água para arrefecimento.	2		9	126
				Bombas de água danificadas.	3		10	210
				Falta de água no tanque.	1		3	21
				Torre de arrefecimento com avaria.	2		10	140
	Fuga no vedante da tampa.	Perda de vácuo.	5	Vedante danificado.	4		8	160
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Não é possível criar vácuo.	Forno inoperacional.	9	Bomba difusora danificada.	5		10	450
				Bomba mecânica danificada.	5		10	450
				Bomba roots danificada.	5		10	450
				Fuga de gás na bomba difusora.	3		10	270
				Fuga de gás na bomba mecânica.	3		10	270
				Fuga de gás na bomba roots.	3		10	270
				Fuga de gás na válvula de alto vácuo.	3		10	270
				Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e o forno.	3		10	270
				Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e a bomba difusora.	3		10	270
				Válvula de alto vácuo inoperacional.	2		10	180
Válvula entre a bomba roots e o forno danificada.	2		10	180				

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi	
Forno de alto vácuo Schmetz									
Sistema de vácuo									
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Não é possível criar vácuo.	Forno inoperacional.	9	Válvula entre a bomba roots e a bomba difusora danificada.	2		10	180	
				Vedante da tampa danificado.	4		8	288	
				Falha de energia elétrica na unidade de bombagem.	2		10	180	
	Variação indevida do nível de vácuo no interior do forno.	Possível paragem do forno.	6		Fuga de gás na bomba difusora.	3		10	180
					Fuga de gás na bomba mecânica.	3		10	180
					Fuga de gás na bomba roots.	3		10	180
					Fuga de gás na válvula de alto vácuo.	3		10	180
					Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e o forno.	3		10	180
					Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e a bomba difusora.	3		10	180
					Vedante da tampa danificado.	4		8	192
	Bomba mecânica inoperacional.	Não é possível criar vácuo.	8		Falha de energia elétrica.	2		10	160
					Motor elétrico danificado.	2		10	160
					Rotor da bomba preso.	1		8	64
					Rolamentos danificados.	2		2	32
					Nível de óleo baixo.	3		1	24
Fuga de gás na bomba.					2		10	160	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Bomba roots inoperacional.	Não é possível criar vácuo.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Nível de óleo baixo.	3		1	24
				Fuga de gás na bomba.	2		10	160
	Bomba difusora inoperacional.	Não é possível atingir o alto vácuo.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Fuga de óleo.	3		10	240
				Nível de óleo baixo.	3		1	24
				Arrefecimento inadequado.	1		2	16
	Fuga de óleo na bomba mecânica.	Risco de sobreaquecimento.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de óleo na bomba roots.	Risco de sobreaquecimento.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de óleo na bomba difusora.	Risco de dano pessoal, no equipamento ou nas instalações.	6	Vedantes danificados.	3		8	144
				Ligações mal apertadas.	2		9	108
Fissura no equipamento.				1		9	54	
Fuga de água na bomba difusora.	Risco de sobreaquecimento.	5	Vedantes danificados.	3		8	120	
			Ligações mal apertadas.	2		9	90	
			Fissura no equipamento.	1		9	45	
			Tube em serpentina com fissura.	1		9	45	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Fuga de gás na bomba mecânica.	Paragem do forno.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de gás na bomba roots.	Paragem do forno.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de gás na bomba difusora.	Paragem do forno.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no equipamento.	1		9	45
	Bomba mecânica com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba mecânica com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
Componentes da bomba desequilibrados.				2		9	72	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Bomba roots com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba roots com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba difusora com excesso de temperatura.	Paragem imediata da bomba. Não desligar o arrefecimento da bomba.	8	Tubo em serpentina com fissura.	1		9	72
				Arrefecimento a água inadequado.	1		2	16
				Nível de óleo baixo.	3		1	24
	Bomba mecânica com excesso de temperatura.	Risco de dano no equipamento.	5	Arrefecimento inadequado.	1		2	10
				Nível de óleo baixo.	3		1	15
				Rolamentos danificados.	2		2	20
	Bomba roots com excesso de temperatura.	Risco de dano no equipamento.	5	Arrefecimento inadequado.	1		2	10
				Nível de óleo baixo.	3		1	15
Rolamentos danificados.				2		2	20	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Válvula de alto vácuo inoperacional.	Funcionamento incorreto do forno.	6	Válvula presa.	2		10	120
				Motor elétrico danificado.	2		10	120
				Falha de energia elétrica no motor.	2		10	120
	Válvula de alto vácuo com fuga de vácuo.	Impossível ou difícil atingir o nível de vácuo pretendido.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
	Válvula entre bomba roots e forno inoperacional.	Funcionamento incorreto do forno.	5	Válvula presa.	2		10	100
				Pneumático danificado.	2		10	100
				Falta de pressão no circuito de azoto.	2		4	40
	Válvula entre bomba roots e forno com fuga de vácuo.	Impossível ou difícil atingir o nível de vácuo pretendido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
	Válvula entre a bomba difusora e bomba roots inoperacional.	Funcionamento incorreto do forno.	5	Válvula presa.	2		10	100
				Pneumático danificado.	2		10	100
				Falta de pressão no circuito de azoto.	2		4	40
Válvula entre bomba difusora e bomba roots com fuga de vácuo.	Impossível ou difícil atingir o nível de vácuo pretendido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96	
			Ligações mal apertadas.	2		9	72	
			Fissura no material.	1		9	36	
Não é possível medir a pressão no interior do forno.	Forno inoperacional.	3	Sensor de vácuo danificado.	2		10	60	
			Fios elétricos desligados.	2		10	60	
			Fios elétricos danificados.	2		10	60	
Fuga no tubo de expulsão de gás para o exterior das instalações.	Perigo de queimadura.	6	Fissura no tubo.	1		9	54	
			Ligações mal apertadas.	2		9	108	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de aquecimento								
Responsável pela produção de energia térmica.	Forno não aquece.	Forno inoperacional.	9	Resistências danificadas.	3		10	270
				Cabos elétricos danificados.	2		10	180
				Conectores das resistências danificados.	1		10	90
				Transformadores danificados.	1		10	90
				Falha de energia elétrica.	2		10	180
	Variação indevida de temperatura no interior da câmara térmica.	Não cumprimento dos requisitos da tarefa a executar.	7	Mau contacto nos cabos elétricos.	2		10	140
				Mau contacto nos conectores das resistências.	2		10	140
				Isolamento térmico danificado.	3		9	189
				Controlador de temperatura danificado.	2		10	140
	Não é possível medir a temperatura no forno.	Forno inoperacional.	6	Termopares danificados.	2		10	120
				Fios de ligação aos termopares desligados.	2		10	120
				Fios de ligação aos termopares danificados.	2		10	120
	Suportes de carga em grafite danificados.	Não operar com o forno.	8	Queda da carga nos suportes.	2		10	160
				Carga excessiva.	1		2	16
				Desgaste do material.	2		3	48
Isolamento de grafite danificado.	Perda de energia térmica para o exterior da câmara térmica.	8	Dano acidental no material de isolamento.	3		10	240	
			Desgaste do material.	2		3	48	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de aquecimento								
Responsável pela produção de energia térmica.	Película de grafite, de alta resistência ao desgaste, danificada.	Perda de energia térmica para o exterior da câmara térmica.	7	Dano acidental no material.	3		10	210
				Desgaste do material.	2		3	42
	Resistências de grafite soltas.	Risco de queda e quebra das resistências. Eventual dano na carga.	9	Porcas de fixação das resistências danificadas.	2		10	180
				Porcas de fixação das resistências mal apertadas.	2		9	162
	Resistências de grafite danificadas.	Risco de queda e quebra das resistências. Eventual dano na carga.	8	Dano devido à colocação indevida da carga.	3		10	240
				Degradação do material.	2		3	48
	Cabos de alimentação das resistências danificados.	Perigo de eletrocussão. Possível não aquecimento do forno. Variação indevida da temperatura.	10	Altas temperaturas no cabo.	2		8	160
				Fricção no cabo.	1		6	60
	Conectores das resistências danificados.	Perigo de eletrocussão. Possível não aquecimento do forno. Variação indevida da temperatura.	10	Dano acidental nos conectores.	1		10	100
	Sistema de arrefecimento a água							
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água "A" com fuga de água.	Arrefecimento comprometido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no corpo da bomba.	1		9	36
	Bomba de água "B" com fuga de água.	Arrefecimento comprometido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no corpo da bomba.	1		9	36

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água "A" com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água "B" com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água "A" com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água "B" com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água "A" inoperacional.	Perigo de sobreaquecimento do forno.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Fios elétricos desligados.	2		10	160
				Fios elétricos danificados.	2		10	160
	Bomba de água "B" inoperacional.	Perigo de sobreaquecimento do forno.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Fios elétricos desligados.	2		10	160
				Fios elétricos danificados.	2		10	160
	Bomba de água interior com fuga de água.	Arrefecimento comprometido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
Fissura no corpo da bomba.				1		9	36	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água interior com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água interior com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água interior inoperacional.	Perigo de sobreaquecimento do forno.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Fios elétricos desligados.	2		10	160
				Fios elétricos danificados.	2		10	160
	Tubo de entrada de água com fuga.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	4	Fissura nos tubos.	2		9	72
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
Vedantes degradados.				3		8	96	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Tubo de saída de água com fuga.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	4	Fissura nos tubos.	2		9	72
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Vedantes degradados.	3		8	96
	Torre de arrefecimento inoperacional.	Não é possível arrefecer a água do forno.	9	Motor elétrico danificado.	2		10	180
				Falha de energia elétrica.	2		10	180
	Torre de arrefecimento com fuga de água.	Risco de sobreaquecimento do forno.	5	Fissura do material.	2		9	90
				Vedantes degradados.	3		8	120
				Corrosão.	4		8	160
	Torre de arrefecimento com corrosão.	Eventual degradação do equipamento.	4	Fuga de água.	2		10	80
				Degradação do material.	2		3	24
	Trocador de calor da bomba interior com fuga de água.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Corrosão.	4		8	160
				Fissuras no material.	2		9	90
	Trocador de calor da bomba interior com corrosão.	Eventual ocorrência de fissura devido à corrosão.	4	Fuga de água.	2		10	80
				Degradação do material.	2		3	24
Tanque de água com fuga.	Perigo de sobreaquecimento do forno. Gasto de água desnecessário. Necessidade de abastecer o tanque.	4	Fissura no tanque.	2		9	72	
			Conexões ao tanque mal-executadas ou degradadas.	1		7	28	
Válvulas do circuito de água com fuga.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	4	Válvula com fissura.	1		9	36	
			Ligações mal apertadas.	2		9	72	
Mangueiras, de cor preto, com fuga de água.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	6	Fissura no material.	2		9	108	
			Fricção no material.	2		7	84	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de arrefecimento a árgon e azoto								
Responsável pelo arrefecimento da carga e da câmara de aquecimento.	Câmara térmica não arrefece devidamente.	Não são cumpridos os requisitos da tarefa a executar.	8	Fuga de gás no circuito de árgon.	3		10	240
				Fuga de gás no circuito de azoto.	3		10	240
				Ventilador danificado.	2		10	160
				Motor do ventilador danificado.	2		10	160
				Falha de energia elétrica no ventilador.	2		10	160
	Não é possível executar arrefecimento rápido.	Forno inoperacional.	9	Motor do ventilador radial danificado.	2		10	180
				Ventilador preso no forno.	1		10	90
				Cilindro de árgon vazio.	5		1	45
				Cilindro de azoto vazio.	5		1	45
	Válvula de entrada de árgon com fuga.	Perda de pressão no circuito de arrefecimento a árgon.	5	Porcas mal apertadas.	2		9	90
				Válvula danificada.	2		10	100
				Vedante danificado.	3		8	120
				Fissura na válvula.	1		9	45
	Válvula de entrada de azoto com fuga.	Perda de pressão no circuito de arrefecimento a azoto.	5	Porcas mal apertadas.	2		9	90
				Válvula danificada.	2		10	100
				Vedante danificado.	3		8	120
				Fissura na válvula.	1		9	45
	Flaps inoperacionais.	Forno inoperacional.	8	Flap danificado.	2		9	144
				Flap preso no forno.	3		8	192
				Falta de pressão nos pneumáticos.	2		4	64
Sensores de fim de curso dos pneumáticos danificados.				2		10	160	
Flaps soltos.				2		10	160	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema de arrefecimento a árgon e azoto								
Responsável pelo arrefecimento da carga e da câmara de aquecimento.	Ruído durante arrefecimento com ventilador.	Paragem do forno.	7	Ventilador danificado.	2		10	140
				Motor do ventilador danificado.	2		10	140
				Ventilador a tocar na estrutura do forno.	1		10	70
Sistema pneumático								
Permite o acionamento dos flaps e das válvulas.	Funcionamento incorreto dos pneumáticos dos flaps.	Funcionamento incorreto dos flaps.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	2		10	100
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50
	Funcionamento incorreto do pneumático da válvula entre a bomba roots e o forno.	Funcionamento incorreto da válvula.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	2		10	100
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50
	Funcionamento incorreto do pneumático da válvula entre a bomba difusora e a bomba roots.	Funcionamento incorreto da válvula.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	2		10	100
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Sistema pneumático								
Permite o acionamento dos flaps e das válvulas.	Pneumáticos dos flaps com fuga de azoto.	Impossível ou difícil acionar os flaps.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
				Tubos soltos ou fissurados.	2		7	70
	Pneumático da válvula entre a bomba roots e o forno com fuga de azoto.	Impossível ou difícil abrir ou fechar a válvula.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
				Tubos soltos ou fissurados.	2		7	70
	Pneumático da válvula entre a bomba difusora e a bomba roots com fuga de azoto.	Impossível ou difícil abrir ou fechar a válvula.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
				Tubos soltos ou fissurados.	2		7	70
Quadro elétrico e circuitos								
Efetua todo o controlo do forno.	Forno não liga.	Forno inoperacional.	9	Falta de energia elétrica.	2		10	180
				Interruptores danificados.	2		10	180
				Circuitos elétricos danificados.	3		10	270
				Controlador geral danificado.	3		10	270
				Fusíveis fundidos.	3		10	270
	Infiltração de água no quadro elétrico.	Perigo de electrocução. Perigo de curto-circuito. Risco de dano no forno.	10	Fuga de água perto do quadro elétrico.	1		7	70
	Não é possível parar o forno em caso de emergência.	Risco de dano pessoal ou no equipamento.	10	Botão de emergência danificado.	1		10	100

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Quadro elétrico e circuitos								
Efetua todo o controlo do forno.	Forno não dá alarme sonoro.	Risco de não avisamento em caso de perigo ou avaria.	10	Sirene danificada.	1		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	200
				Cabos elétricos danificados.	2		10	200
	Forno não dá alarme visual.	Risco de não avisamento em caso de perigo ou avaria.	10	Sinóptico fundido.	2		10	200
				Cabos elétricos desligados.	2		10	200
				Cabos elétricos danificados.	2		10	200
	Não é possível medir a corrente elétrica no forno.	Forno inoperacional.	6	Amperímetro danificado.	2		10	120
	Não é possível medir a tensão elétrica no forno.	Forno inoperacional.	6	Voltímetro danificado.	2		10	120
	Controlador principal inoperacional.	Forno inoperacional.	10	Controlador danificado.	3		10	300
				Cabos elétricos do controlador desligados.	2		10	200
				Cabos elétricos do controlador danificados.	2		10	200
	Controlador de temperatura inoperacional.	Forno inoperacional.	8	Controlador danificado.	2		10	160
				Cabos de ligação aos termopares desligados.	2		10	160
				Cabos de ligação aos termopares danificados.	2		10	160
				Cabos elétricos do controlador desligados.	2		10	160
Cabos elétricos do controlador danificados.				2		10	160	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Quadro elétrico e circuitos								
Efetua todo o controlo do forno.	Indicadores luminosos, dos interruptores, não acendem.	Dificuldade em visualizar qual o interruptor que foi ou que está acionado.	3	Lâmpadas fundidas.	3		10	90
	Ventoinhas de arrefecimento do quadro inoperacionais.	Risco de sobreaquecimento dos circuitos.	5	Fios elétricos desligados.	2		10	100
				Motor elétrico danificado.	2		10	100
				Ventoinha presa.	1		10	50
	Cabos de alimentação elétrica danificados.	Risco de eletrocussão. Risco de curto-circuito.	10	Dano nos cabos por fricção.	1		9	90
Cabos sujeitos a temperaturas excessivas.				2		9	180	
Sistema hidráulico								
Responsável pelo fecho da tampa do forno.	Hidráulico com fuga.	Pode não ser possível fechar ou abrir a tampa do forno.	5	Retenores danificados.	3		9	135
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
	Fuga nos tubos hidráulicos.	Perda de pressão no sistema hidráulico.	5	Fissura nos tubos.	2		9	90
Mecanismo de subida e descida de carga								
Permite a subida e descida da carga.	Movimentação horizontal incorreta do mecanismo de carga.	Eventual impossibilidade em movimentar a carga.	7	Motor elétrico danificado.	2		10	140
				Falha de energia elétrica no motor.	2		10	140
				Sensores de fim de curso horizontais danificados.	2		10	140
				Rolamentos das rodas danificados.	2		1	14
				Rodas presas.	1		8	56

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo Schmetz								
Mecanismo de subida e descida de carga								
Permite a subida e descida da carga.	Movimentação vertical incorreta do mecanismo de carga.	Eventual impossibilidade em colocar ou retirar a carga do forno.	7	Motor elétrico danificado.	2		10	140
				Falha de energia elétrica no motor.	2		10	140
				Sensores de fim de curso verticais danificados.	2		10	140
				Fusos empenados.	2		3	42
	Rodas do mecanismo danificadas.	Eventual impossibilidade em movimentar a carga.	7	Dano provocado nas rodas.	2		10	140
				Desgaste do material.	2		3	42
	Fusos empenados.	Perigo de fratura dos fusos e consequente queda do carro.	10	Dano provocado nos fusos.	2		10	200
Fadiga do material.				2		3	60	

# Anexo 3

O anexo 3 inclui as tabelas, retiradas do software *XFMEA*, resultantes da implementação da *FMEA* no forno de alto vácuo *TAV*.

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Câmara de vácuo								
Separar os componentes no interior do forno do meio exterior. Permitir a existência de vácuo no interior do forno.	Fuga de vácuo nos flanges de ligação.	Perda de vácuo no forno.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Fuga de argon/azoto nos flanges de ligação.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento a argon/azoto.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Fuga de água nos flanges de ligação.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento a água.	4	Porcas mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
				Vedante danificado.	3		8	96
				Defeito na soldadura.	1		9	36
	Ruído ao abrir ou fechar a porta do forno.	Ruído. Eventual degradação do equipamento.	4	Dobradiças danificadas.	1		10	40
				Dobradiças sem lubrificação.	4		6	96
				Parafusos das dobradiças empenados.	2		9	72
Porta não abre/fecha.	Impossibilidade de colocar ou retirar a carga.	5	Pneumáticos presos ou danificados.	2		10	100	
			Pneumáticos com fuga de azoto.	3		10	150	
			Pressão reduzida no sistema de azoto.	3		9	135	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Câmara de vácuo								
Separar os componentes no interior do forno do meio exterior. Permitir a existência de vácuo no interior do forno.	Cilindro de vácuo com temperatura exterior excessiva.	Paragem do forno.	7	Fuga nos tubos de água para arrefecimento.	2		9	126
				Bombas de água danificadas.	3		10	210
				Falta de água no tanque.	1		3	21
				Torre de arrefecimento com avaria.	2		10	140
	Fuga no vedante da porta.	Perda de vácuo.	5	Vedante danificado.	4		8	160
	Porta do forno não permanece aberta em segurança.	Risco de entalamento.	8	Mola da tranca partida. Mola solta.	2 2		10 10	160 160
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Não é possível criar vácuo.	Forno inoperacional.	9	Bomba difusora danificada.	5		10	450
				Bomba mecânica danificada.	5		10	450
				Bomba roots danificada.	5		10	450
				Fuga de gás na bomba difusora.	3		10	270
				Fuga de gás na bomba mecânica.	3		10	270
				Fuga de gás na bomba roots.	3		10	270
				Fuga de gás na válvula de alto vácuo.	3		10	270
				Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e o forno.	3		10	270

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Não é possível criar vácuo.	Forno inoperacional.	9	Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e a bomba difusora.	3		10	270
				Válvula de alto vácuo inoperacional.	2		10	180
				Válvula entre a bomba roots e o forno danificada.	2		10	180
				Válvula entre a bomba roots e a bomba difusora danificada.	2		10	180
				Vedante da tampa danificado.	4		8	288
				Falha de energia elétrica na unidade de bombagem.	2		10	180
	Variação indevida do nível de vácuo no interior do forno.	Possível paragem do forno.	6	Fuga de gás na bomba difusora.	3		10	180
				Fuga de gás na bomba mecânica.	3		10	180
				Fuga de gás na bomba roots.	3		10	180
				Fuga de gás na válvula de alto vácuo.	3		10	180
				Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e o forno.	3		10	180
				Fuga de gás na válvula entre a bomba roots e a bomba difusora.	3		10	180
				Vedante da tampa danificado.	4		8	192

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Bomba de espera inoperacional.	Não é possível manter vácuo na difusora quando desligada.	3	Falha de energia elétrica.	2		10	60
				Motor elétrico danificado.	2		10	60
				Rotor da bomba preso.	1		8	24
				Rolamentos danificados.	2		2	12
				Nível de óleo baixo.	3		1	9
				Fuga de gás na bomba.	2		10	60
	Bomba mecânica inoperacional.	Não é possível criar vácuo.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Nível de óleo baixo.	3		1	24
				Fuga de gás na bomba.	2		10	160
	Bomba roots inoperacional.	Não é possível criar vácuo.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Nível de óleo baixo.	3		1	24
				Fuga de gás na bomba.	2		10	160
	Bomba difusora inoperacional.	Não é possível atingir o alto vácuo.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
Fuga de óleo.				3		10	240	
Nível de óleo baixo.				3		1	24	
Arrefecimento inadequado.				1		2	16	
Resistências danificadas.				2		10	160	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Fuga de óleo na bomba de espera.	Risco de sobreaquecimento.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de óleo na bomba mecânica.	Risco de sobreaquecimento.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de óleo na bomba roots.	Risco de sobreaquecimento.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de óleo na bomba difusora.	Risco de dano pessoal, no equipamento ou nas instalações.	6	Vedantes danificados.	3		8	144
				Ligações mal apertadas.	2		9	108
				Fissura no equipamento.	1		9	54
	Fuga de água na bomba difusora.	Risco de sobreaquecimento.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no equipamento.	1		9	45
				Tubo em serpentina com fissura.	1		9	45
	Fuga de gás na bomba de espera.	Não é possível manter vácuo na bomba difusora, quando desligada.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no equipamento.	1		9	36
	Fuga de gás na bomba mecânica.	Paragem do forno.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
Fissura no equipamento.				1		9	36	
Fuga de gás na bomba roots.	Paragem do forno.	4	Vedantes danificados.	3		8	96	
			Ligações mal apertadas.	2		9	72	
			Fissura no equipamento.	1		9	36	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Fuga de gás na bomba difusora.	Paragem do forno.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no equipamento.	1		9	45
	Bomba de espera com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de espera com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba mecânica com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Bomba mecânica com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba roots com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba roots com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba difusora com excesso de temperatura.	Paragem imediata da bomba. Não desligar o arrefecimento da bomba.	8	Tubo em serpentina com fissura.	1		9	72
Arrefecimento a água inadequado.				1		2	16	
Nível de óleo baixo.				3		1	24	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Bomba de espera com excesso de temperatura.	Risco de dano no equipamento.	5	Arrefecimento inadequado.	1		2	10
				Nível de óleo baixo.	3		1	15
				Rolamentos danificados.	2		2	20
	Bomba mecânica com excesso de temperatura.	Risco de dano no equipamento.	5	Arrefecimento inadequado.	1		2	10
				Nível de óleo baixo.	3		1	15
				Rolamentos danificados.	2		2	20
	Bomba roots com excesso de temperatura.	Risco de dano no equipamento.	5	Arrefecimento inadequado.	1		2	10
				Nível de óleo baixo.	3		1	15
				Rolamentos danificados.	2		2	20
	Válvula de alto vácuo inoperacional.	Funcionamento incorreto do forno.	6	Válvula presa.	2		10	120
				Pneumático danificado.	2		10	120
				Falta de pressão no circuito de azoto.	2		10	120
	Válvula de alto vácuo com fuga de vácuo.	Impossível ou difícil atingir o nível de vácuo pretendido.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
	Válvula entre bomba roots e forno inoperacional.	Funcionamento incorreto do forno.	5	Válvula presa.	2		10	100
				Pneumático danificado.	2		10	100
				Falta de pressão no circuito de azoto.	2		4	40
Válvula entre bomba roots e forno com fuga de vácuo.	Impossível ou difícil atingir o nível de vácuo pretendido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96	
			Ligações mal apertadas.	2		9	72	
			Fissura no material.	1		9	36	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de vácuo								
Responsável pela criação de vácuo no interior do forno.	Válvula entre a bomba difusora e bomba roots inoperacional.	Funcionamento incorreto do forno.	5	Válvula presa.	2		10	100
				Pneumático danificado.	2		10	100
				Falta de pressão no circuito de azoto.	2		4	40
	Válvula entre bomba difusora e bomba roots com fuga de vácuo.	Impossível ou difícil atingir o nível de vácuo pretendido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no material.	1		9	36
	Não é possível medir a pressão no interior do forno.	Forno inoperacional.	3	Sensor de vácuo danificado.	2		10	60
				Fios elétricos desligados.	2		10	60
				Fios elétricos danificados.	2		10	60
	Fuga no tubo de expulsão de gás para o exterior das instalações.	Perigo de queimadura.	6	Fissura no tubo.	1		9	54
Ligações mal apertadas.				2		9	108	
Sistema de aquecimento								
Responsável pela produção de energia térmica.	Forno não aquece.	Forno inoperacional.	9	Resistências danificadas.	3		10	270
				Cabos elétricos danificados.	2		10	180
				Conectores das resistências danificados.	1		10	90
				Transformadores danificados.	1		10	90
				Falha de energia elétrica.	2		10	180
	Variação indevida de temperatura no interior da câmara térmica.	Não cumprimento dos requisitos da tarefa a executar.	7	Mau contacto nos cabos elétricos.	2		10	140
				Mau contacto nos conectores das resistências.	2		10	140
				Isolamento térmico danificado.	3		9	189
				Controlador de temperatura danificado.	2		10	140

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de aquecimento								
Responsável pela produção de energia térmica.	Não é possível medir a temperatura no forno.	Forno inoperacional.	6	Termopares danificados.	2		10	120
				Fios de ligação aos termopares desligados.	2		10	120
				Fios de ligação aos termopares danificados.	2		10	120
	Suportes de carga em grafite danificados.	Não operar com o forno.	8	Queda da carga nos suportes.	2		10	160
				Carga excessiva.	1		2	16
				Desgaste do material.	2		3	48
	Isolamento de grafite danificado.	Perda de energia térmica para o exterior da câmara térmica.	8	Dano acidental no material de isolamento.	3		10	240
				Desgaste do material.	2		3	48
	Película de grafite, de alta resistência ao desgaste, danificada.	Perda de energia térmica para o exterior da câmara térmica.	7	Dano acidental no material.	3		10	210
				Desgaste do material.	2		3	42
	Resistências de grafite soltas.	Risco de queda e quebra das resistências. Eventual dano na carga.	9	Porcas de fixação das resistências danificadas.	2		10	180
				Porcas de fixação das resistências mal apertadas.	2		9	162
	Resistências de grafite danificadas.	Risco de queda e quebra das resistências. Eventual dano na carga.	8	Dano devido à colocação indevida da carga.	3		10	240
				Degradação do material.	2		3	48
	Cabos de alimentação das resistências danificados.	Perigo de eletrocussão. Possível não aquecimento do forno. Variação indevida da temperatura.	10	Altas temperaturas no cabo.	2		8	160
Fricção no cabo.				1		6	60	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de aquecimento								
Responsável pela produção de energia térmica.	Conectores das resistências danificados.	Perigo de eletrocussão. Possível não aquecimento do forno. Variação indevida da temperatura.	10	Dano acidental nos conectores.	1		10	100
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água "A" com fuga de água.	Arrefecimento comprometido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no corpo da bomba.	1		9	36
	Bomba de água "B" com fuga de água.	Arrefecimento comprometido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no corpo da bomba.	1		9	36
	Bomba de água "A" com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água "B" com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
Componentes da bomba desequilibrados.				2		9	72	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água "A" com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
				Bomba de água "B" com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2
		Bomba danificada.	5		10		200	
		Rolamentos danificados.	2		2		16	
		Componentes da bomba desalinhados.	2		9		72	
		Componentes da bomba desequilibrados.	2		9		72	
	Bomba de água "A" inoperacional.	Perigo de sobreaquecimento do forno.	8	Falha de energia elétrica.	2			10
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Fios elétricos desligados.	2		10	160
				Fios elétricos danificados.	2		10	160

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água "B" inoperacional.	Perigo de sobreaquecimento do forno.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Fios elétricos desligados.	2		10	160
				Fios elétricos danificados.	2		10	160
	Bomba de água interior com fuga de água.	Arrefecimento comprometido.	4	Vedantes danificados.	3		8	96
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Fissura no corpo da bomba.	1		9	36
	Bomba de água interior com vibração.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
				Componentes da bomba desalinhados.	2		9	72
				Componentes da bomba desequilibrados.	2		9	72
	Bomba de água interior com ruído.	Ruído. Eventual paragem do equipamento.	4	Apoios desnivelados.	2		10	80
				Bomba danificada.	5		10	200
				Rolamentos danificados.	2		2	16
Componentes da bomba desalinhados.				2		9	72	
Componentes da bomba desequilibrados.				2		9	72	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Bomba de água interior inoperacional.	Perigo de sobreaquecimento do forno.	8	Falha de energia elétrica.	2		10	160
				Motor elétrico danificado.	2		10	160
				Rotor da bomba preso.	1		8	64
				Rolamentos danificados.	2		2	32
				Fios elétricos desligados.	2		10	160
				Fios elétricos danificados.	2		10	160
	Tubo de entrada de água com fuga.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	4	Fissura nos tubos.	2		9	72
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Vedantes degradados.	3		8	96
	Tubo de saída de água com fuga.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	4	Fissura nos tubos.	2		9	72
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
				Vedantes degradados.	3		8	96
	Torre de arrefecimento inoperacional.	Não é possível arrefecer a água do forno.	9	Motor elétrico danificado.	2		10	180
				Falha de energia elétrica.	2		10	180
	Torre de arrefecimento com fuga de água.	Risco de sobreaquecimento do forno.	5	Fissura do material.	2		9	90
				Vedantes degradados.	3		8	120
				Corrosão.	4		8	160
	Torre de arrefecimento com corrosão.	Eventual degradação do equipamento.	4	Fuga de água.	2		10	80
Degradação do material.				2		3	24	
Trocador de calor da bomba interior com fuga de água.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	5	Vedantes danificados.	3		8	120	
			Corrosão.	4		8	160	
			Fissuras no material.	2		9	90	
Trocador de calor da bomba interior com corrosão.	Eventual ocorrência de fissura devido à corrosão.	4	Fuga de água.	2		10	80	
			Degradação do material.	2		3	24	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de arrefecimento a água								
Permite o arrefecimento contínuo do forno.	Tanque de água com fuga.	Perigo de sobreaquecimento do forno. Gasto de água desnecessário. Necessidade de abastecer o tanque.	4	Fissura no tanque.	2		9	72
				Conexão ao tanque mal-executadas ou degradadas.	1		7	28
	Válvulas do circuito de água com fuga.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	4	Válvula com fissura.	1		9	36
				Ligações mal apertadas.	2		9	72
	Mangueiras, de cor preto, com fuga de água.	Perda de pressão no sistema de arrefecimento. Desempenho do arrefecimento comprometido.	6	Fissura no material.	2		9	108
				Fricção no material.	2		7	84
Sistema de arrefecimento a árgon e azoto								
Responsável pelo arrefecimento da carga e da câmara de aquecimento.	Câmara térmica não arrefece devidamente.	Não são cumpridos os requisitos da tarefa a executar.	8	Fuga de gás no circuito de árgon.	3		10	240
				Fuga de gás no circuito de azoto.	3		10	240
				Ventilador danificado.	2		10	160
				Motor do ventilador danificado.	2		10	160
				Falha de energia elétrica no ventilador.	2		10	160
	Não é possível executar arrefecimento rápido.	Forno inoperacional.	9	Motor do ventilador radial danificado.	2		10	180
				Ventilador preso no forno.	1		10	90
				Cilindro de árgon vazio.	5		1	45
				Cilindro de azoto vazio.	5		1	45
	Válvula de entrada de árgon com fuga.	Perda de pressão no circuito de arrefecimento a árgon.	5	Porcas mal apertadas.	2		9	90
				Válvula danificada.	2		10	100
				Vedante danificado.	3		8	120
				Fissura na válvula.	1		9	45

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema de arrefecimento a árgon e azoto								
Responsável pelo arrefecimento da carga e da câmara de aquecimento.	Válvula de entrada de azoto com fuga.	Perda de pressão no circuito de arrefecimento a azoto.	5	Porcas mal apertadas.	2		9	90
				Válvula danificada.	2		10	100
				Vedante danificado.	3		8	120
				Fissura na válvula.	1		9	45
	Flaps inoperacionais.	Forno inoperacional.	8	Flap danificado.	2		9	144
				Flap preso no forno.	3		8	192
				Falta de pressão nos pneumáticos.	2		4	64
				Sensores de fim de curso dos pneumáticos danificados.	2		10	160
				Flaps soltos.	2		10	160
	Ruído durante arrefecimento com ventilador.	Paragem do forno.	7	Ventilador danificado.	2		10	140
				Motor do ventilador danificado.	2		10	140
				Ventilador a tocar na estrutura do forno.	1		10	70
Sistema pneumático								
Permite o acionamento dos flaps, das válvulas e da tranca da porta.	Funcionamento incorreto dos pneumáticos dos flaps.	Funcionamento incorreto dos flaps.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	2		10	100
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema pneumático								
Permite o acionamento dos flaps, das válvulas e da tranca da porta.	Funcionamento incorreto do pneumático da válvula entre a bomba roots e o forno.	Funcionamento incorreto da válvula.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	2		10	100
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50
	Funcionamento incorreto do pneumático da válvula entre a bomba difusora e a bomba roots.	Funcionamento incorreto da válvula.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	2		10	100
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50
	Pneumáticos dos flaps com fuga de azoto.	Impossível ou difícil acionar os flaps.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
				Tubos soltos ou fissurados.	2		7	70
	Pneumático da válvula entre a bomba roots e o forno com fuga de azoto.	Impossível ou difícil abrir ou fechar a válvula.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
				Tubos soltos ou fissurados.	2		7	70
	Pneumático da válvula entre a bomba difusora e a bomba roots com fuga de azoto.	Impossível ou difícil abrir ou fechar a válvula.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
Fissura no material.				1		9	45	
Tubos soltos ou fissurados.				2		7	70	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi
Forno de alto vácuo TAV								
Sistema pneumático								
Permite o acionamento dos flaps, das válvulas e da tranca da porta.	Funcionamento incorreto dos pneumáticos da porta.	Funcionamento incorreto do mecanismo de fecho da porta.	5	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos danificados.	2		10	100
				Cabos elétricos desligados.	2		10	100
				Tubos de azoto danificados.	1		10	50
				Tubos de azoto desligados.	1		10	50
	Pneumáticos da porta com fuga de azoto.	Impossível ou difícil abrir ou fechar a porta.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
				Fissura no material.	1		9	45
				Tubos soltos ou fissurados.	2		7	70
	Funcionamento incorreto do pneumático da válvula de alto vácuo.	Funcionamento incorreto da válvula de alto vácuo.	6	Sensores de fim de curso do pneumático danificados.	2		10	120
				Cabos elétricos danificados.	2		10	120
				Cabos elétricos desligados.	2		10	120
				Tubos de azoto danificados.	1		10	60
				Tubos de azoto desligados.	1		10	60
	Pneumático da válvula de alto vácuo com fuga de azoto.	Impossível ou difícil abrir ou fechar a válvula.	5	Vedantes danificados.	3		8	120
				Ligações mal apertadas.	2		9	90
Fissura no material.				1		9	45	
Tubos soltos ou fissurados.				2		7	70	

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi	
Forno de alto vácuo TAV									
Quadro elétrico e circuitos									
Efetua todo o controlo do forno.	Forno não liga.	Forno inoperacional.	9	Falta de energia elétrica.	2		10	180	
				Interruptores danificados.	2		10	180	
				Circuitos elétricos danificados.	3		10	270	
				Controlador geral danificado.	3		10	270	
				Fusíveis fundidos.	3		10	270	
	Infiltração de água no quadro elétrico.	Perigo de electrocução. Perigo de curto-circuito. Risco de dano no forno.	10		Fuga de água perto do quadro elétrico.	1		7	70
	Não é possível parar o forno em caso de emergência.	Risco de dano pessoal ou no equipamento.	10		Botão de emergência danificado.	1		10	100
	Forno não dá alarme sonoro.	Risco de não aviso em caso de perigo ou avaria.	10	Sirene danificada.	1		10	100	
				Cabos elétricos desligados.	2		10	200	
				Cabos elétricos danificados.	2		10	200	
	Forno não dá alarme visual.	Risco de não aviso em caso de perigo ou avaria.	10	Sinóptico fundido.	2		10	200	
				Cabos elétricos desligados.	2		10	200	
				Cabos elétricos danificados.	2		10	200	
	Não é possível medir a corrente elétrica no forno.	Forno inoperacional.	6		Amperímetro danificado.	2		10	120
Não é possível medir a tensão elétrica no forno.	Forno inoperacional.	6		Voltímetro danificado.	2		10	120	
Controlador principal inoperacional.	Forno inoperacional.	10	Controlador danificado.	3		10	300		
			Cabos elétricos do controlador desligados.	2		10	200		
			Cabos elétricos do controlador danificados.	2		10	200		

Function	Failure	Effect	Si	Cause	Oi	Control	Di	RPNi	
Forno de alto vácuo TAV									
Quadro elétrico e circuitos									
Efetua todo o controlo do forno.	Controlador de temperatura inoperacional.	Forno inoperacional.	8	Controlador danificado.	2		10	160	
				Cabos de ligação aos termopares desligados.	2		10	160	
				Cabos de ligação aos termopares danificados.	2		10	160	
				Cabos elétricos do controlador desligados.	2		10	160	
				Cabos elétricos do controlador danificados.	2		10	160	
	Indicadores luminosos, dos interruptores, não acendem.	Dificuldade em visualizar qual o interruptor que foi ou que está acionado.	3		Lâmpadas fundidas.	3		10	90
	Ventoinhas de arrefecimento do quadro inoperacionais.	Risco de sobreaquecimento dos circuitos.	5	Fios elétricos desligados.	2		10	100	
				Motor elétrico danificado.	2		10	100	
				Ventoinha presa.	1		10	50	
	Cabos de alimentação elétrica danificados.	Risco de eletrocussão. Risco de curto-circuito.	10	Dano nos cabos por fricção.	1		9	90	
Cabos sujeitos a temperaturas excessivas.				2		9	180		