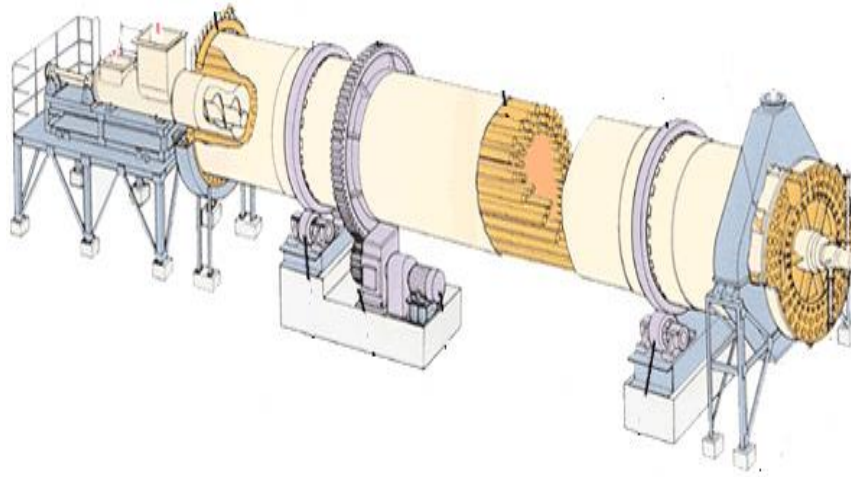




ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial**

**Bruno Miguel Martins Pedrosa**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientador:

Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral  
Professor Engenheiro António Afonso Roque

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rui Pedro Chedas de Sampaio  
Vogais:

Professor Doutor Luís António de Andrade Ferreira  
Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral

**Setembro de 2014**



## Resumo

A tomada de decisão na área da Manutenção de ativos físicos nem sempre é fácil e muitas vezes envolve uma grande responsabilidade. No sector industrial a Manutenção tem normalmente um grande impacto pois dela depende a disponibilidade dos equipamentos para a produção.

Quando se trata de equipamentos críticos para o processo terão que ser ponderados vários campos de análise, que vão desde aspetos mais económicos até à análise dos riscos e suas consequências para as pessoas, negócio e ambiente, encontrando formas de minimizar ou mitigar as causas das avarias, de anular ou diminuir os efeitos das suas consequências ou encontrar meios de deteção precoce que permitam atuar em tempo útil.

O presente trabalho apresenta uma avaliação de riscos aplicada a um secador industrial. Para avaliar os riscos associados a este objeto de estudo, foram integrados a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) e o Processo Hierárquico Analítico (AHP), este último um método multicritério de análise de decisão, no qual as ações recomendadas (usadas para diminuir o grau de risco de modos de falha) e múltiplos critérios de avaliação são organizados numa estrutura hierárquica e avaliados de modo emparelhado. Com este trabalho foi possível medir e garantir a consistência das comparações usadas no procedimento e priorizar as ações recomendadas.

Palavras-chave: AHP. FMEA. Método Multicritério de Análise de Decisão. Secador Industrial.

## **Abstract**

The decision making process in the area of Maintenance of physical assets is not always easy and often involves great responsibility. In the industrial sector the maintenance usually has a big impact because on it depend the availability of equipment for production.

When it refers to critical equipment for the process one must weight several fields, ranging from economics to further analysis of the risks and their consequences for people, business and the environment, finding ways to minimize or mitigate the causes of breakdowns, to avoid or lessen the effects or consequences or find means of early detection that allow to take actions on time.

This work presents a risk assessment applied to an industrial dryer. To assess the risks associated with this object of study, were integrated Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and the Analytic Hierarchy Process (AHP), this last one, in which recommended actions (multi-criteria decision analysis method used to reduce the degree of risk of failure modes) and multiple evaluation criteria are organized in a hierarchical structure and evaluated paired mode. With this it was possible to measure and ensure the consistency of the comparisons used in the procedure and prioritize the recommended actions.

**Keywords:** AHP. FMEA. Multiple-Criteria Decision-Making. Industrial Dryer.

## **Agradecimentos**

Gostaria de expressar o meu reconhecimento aos meus professores e orientadores Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral e Professor Engenheiro António Afonso Roque, pela sua total disponibilidade, esforço e dedicação ao longo de todo este período de orientação.

Também um especial agradecimento ao Engenheiro Jorge Zózimo da Fonseca pelo apoio que sempre disponibilizou, como Diretor na empresa POLIVALOR.

Seria um erro não enunciar, os meus colegas de juventude, que aos longos destes anos me têm aturado e dado apoio para poder concluir esta fase da minha vida.

Para terminar, e com muito reconhecimento, a minha família, principalmente os meus pais, que ao longo de todo este tempo se demonstraram incansáveis a todos os níveis para que fosse possível a oportunidade de efetuar um curso superior.



# Índice

Resumo .....	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vi
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivo do Trabalho .....	3
1.4. Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2. A Metodologia FMEA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Manutenção Centrada na Fiabilidade e a FMEA .....	5
2.2. História da FMEA .....	6
2.3. FMEA – Conceito e Objetivos .....	7
2.4. FMEA vs FMECA .....	8
2.5. Aplicações da FMEA .....	9
2.6. Tipos de FMEA .....	11
2.7. Implementação da FMEA .....	12
2.7.1 Passos para Implementação da FMEA .....	13
2.8. Benefícios e Limitações da FMEA .....	23
<b>3. A Metodologia AHP</b> .....	<b>27</b>
3.1. Método Multicritério de Análise de Decisão .....	27
3.2. AHP – Conceito .....	27
3.3. Implementação do Método AHP .....	28
3.4. Aplicações do AHP .....	33
3.5. Benefícios e Limitações do AHP .....	36
<b>4. Secadores Industriais</b> .....	<b>39</b>
4.1. Processo de Secagem .....	39
4.2. Secadores Industriais – Conceito .....	40
4.3. Classificação e Seleção de Secadores Industriais .....	40
4.4. Secadores Rotativos .....	45
4.5. Constituição do Secador Rotativo .....	45

4.5.1.	Modo de Operação do Secador Rotativo .....	46
4.5.2.	Tipos de Secadores Rotativos .....	46
4.5.3.	Secador Rotativo Indireto de Tubos de Vapor .....	47
<b>5.</b>	<b>Caso Prático .....</b>	<b>51</b>
5.1.	Enquadramento .....	51
5.2.	Desenvolvimento e Aplicação da FMEA .....	52
5.2.1.	Diagrama de Blocos .....	52
5.2.2.	Elaboração das Tabelas de Ocorrência, Detetabilidade, Severidade e Grau de Risco .....	54
5.2.3.	Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) .....	57
5.2.4.	Análise de Resultados .....	65
5.3.	Desenvolvimento e aplicação do método AHP .....	69
5.3.1.	Construção da Hierarquia .....	69
5.3.2.	Definição de Prioridades e Comparações par-a-par .....	71
5.3.3.	Consistência Lógica .....	75
5.3.4.	Análise de Resultados .....	76
<b>6.</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>81</b>
6.1.	Considerações Finais .....	81
6.2.	Dificuldades Sentidas .....	82
6.3.	Trabalhos Futuros .....	82
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>85</b>

# Índice de Figuras

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FMEA FONTE: (SANTOS C. D., 2008)	15
FIGURA 2 - FORMULÁRIO FMEA FONTE: (MOURA, 2000).....	23
FIGURA 3 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA GENÉRICA DE PROBLEMAS DE DECISÃO FONTE: (SANTOS F. F., 2008)..	29
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA GERAL DO MÉTODO AHP FONTE: (VILAS BOAS, 2006).....	33
FIGURA 5 - CLASSIFICAÇÃO DE SECADORES SEGUNDO O MODO DE OPERAÇÃO. FONTE: (ALONSO, CORNEJO, FABRO, PARK, & PARK, 2007) .....	43
FIGURA 6 - CONSTITUIÇÃO DE UM SECADOR ROTATIVO DIRETO FONTE: (FOLLOWELL, 2012) .....	46
FIGURA 7 - TIPOS DE SECADORES ROTATIVOS FONTE: (RESENDE, 2012).....	47
FIGURA 8 - ESQUEMA DE UM SECADOR DE TUBOS DE VAPOR EM CORTE FONTE: (RESENDE, 2012) .....	48
FIGURA 9 - COLETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR DE UM SECADOR DE TUBOS DE VAPOR (VISTA EM CORTE) FONTE: (TSUKISHIMA KIKAI CO. LTD, 2014) .....	49
FIGURA 10 - SISTEMA DE SELAGEM DE UM SECADOR DE TUBOS DE VAPOR (VISTA EM CORTE) FONTE: (TSUKISHIMA KIKAI CO. LTD, 2014) .....	49
FIGURA 11 - ESQUEMA DE SECADOR ROTATIVO DE TUBOS DE VAPOR FONTE: (TSUKISHIMA KIKAI CO. LTD, 2014) .....	51
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS .....	53
FIGURA 13 - DEFINIÇÃO DE FRONTEIRAS DO SISTEMA A SER ANALISADO .....	53
FIGURA 14 - GRÁFICO DE ANÁLISE DO GRAU DE RISCO.....	65
FIGURA 15 – EFEITOS DA FALHA AO NÍVEL DA SAÚDE E SEGURANÇA .....	66
FIGURA 16 - EFEITOS DA FALHA AO NÍVEL MEIO-AMBIENTE .....	67
FIGURA 17 - EFEITOS DA FALHA AO NÍVEL DO CUSTO DE NÃO PRODUÇÃO .....	67
FIGURA 18 - EFEITOS DA FALHA AO NÍVEL DO CUSTO DE REPARAÇÃO .....	68
FIGURA 19 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA DE DECISÃO .....	70
FIGURA 20 - ÁRVORE DE DECISÃO AHP CONTENDO PESO DOS CRITÉRIOS E ALTERNATIVAS .....	77

# Índice de Tabelas

TABELA 1 - OS 6 PASSOS DA METODOLOGIA RCM FONTE: (SOBRAL & ABREU, 2013) .....	5
TABELA 2 - TABELA DE SEVERIDADE FONTE: (MOURA, 2000) .....	18
TABELA 3 - TABELA DE OCORRÊNCIA DE FALHA FONTE: (MOURA, 2000).....	19
TABELA 4 - TABELA ÍNDICE DE DETEÇÃO FONTE: (MOURA, 2000) .....	21
TABELA 5 - NÍVEIS DE IMPORTÂNCIA DE COMPARAÇÕES BINÁRIAS FONTE: (VILAS BOAS, 2006).....	30
TABELA 6 - ÍNDICES ALEATÓRIOS (IR) FONTE: (SANTOS F. F., 2008).....	32
TABELA 7 - CRITÉRIOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DE SECADORES FONTE: (ALONSO, CORNEJO, FABBRO, PARK, & PARK, 2007) .....	42
TABELA 8 - ESPECIFICAÇÕES DO SECADOR TSK-CD (M1-423) .....	52
TABELA 9 - TABELA DE ÍNDICE DE OCORRÊNCIA APLICADA AO CASO DE ESTUDO.....	54
TABELA 10 - ÍNDICE DE SEVERIDADE APLICADO AO CASO DE ESTUDO.....	55
TABELA 11 - ÍNDICE DE DETEÇÃO APLICADO AO CASO DE ESTUDO .....	56
TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE RISCO APLICADO AO CASO DE ESTUDO .....	56
TABELA 13 - APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) (PARTE I).....	57
TABELA 14 - APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) (PARTE II).....	59
TABELA 15 - APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) (PARTE III).....	60
TABELA 16 - APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) (PARTE IV) .....	61
TABELA 17 - APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) (PARTE V) .....	62
TABELA 18 - APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) (PARTE VI) .....	63
TABELA 19 - AÇÕES RECOMENDADAS DA FMEA PARA SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) .....	64
TABELA 20 - NÚMERO DE RISCOS SEGUNDO O GRAU OBTIDO) .....	65
TABELA 21 - NOMENCLATURAS DOS ELEMENTOS DA HIERARQUIA .....	72
TABELA 22 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS EM RELAÇÃO AO OBJETIVO GLOBAL .....	72
TABELA 23 - CÁLCULO DA MATRIZ DE CRITÉRIOS NORMALIZADA .....	72
TABELA 24 - MATRIZ DE CRITÉRIOS NORMALIZADA .....	73
TABELA 25 - VETOR DE PRIORIDADES DOS CRITÉRIOS .....	73
TABELA 26 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPETIVO VETOR DE PRIORIDADES EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO CUSTO .....	73
TABELA 27 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPETIVO VETOR DE PRIORIDADES EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO EXEQUIBILIDADE .....	74
TABELA 28 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPETIVO VETOR DE PRIORIDADES EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO FIABILIDADE .....	74
TABELA 29 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPETIVO VETOR DE PRIORIDADES EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO ABRANGÊNCIA.....	74
TABELA 30 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPETIVO VETOR DE PRIORIDADES EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO RESPOSTA.....	74
TABELA 31 - CÁLCULO DO PESO RELATIVO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO AO OBJETIVO GLOBAL.....	75
TABELA 32 - RAZÃO DE CONSISTÊNCIA DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO AOS CRITÉRIOS.....	76
TABELA 33 - HIERARQUIA DOS CRITÉRIOS.....	77
TABELA 34 - HIERARQUIA DAS ALTERNATIVAS.....	78
TABELA 35 - AÇÕES RECOMENDADAS DA FMEA PARA SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423) APÓS IMPLEMENTAÇÃO DO AHP .....	79

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Face ao desenvolvimento científico e tecnológico presente nos dias de hoje, o volume de investimento na gestão de ativos físicos tem aumentado significativamente, o que por sua vez conduz ao facto de que a manutenção tem vindo a assumir um papel de maior relevo na sociedade. A manutenção desempenha um papel fundamental na fiabilidade, disponibilidade, qualidade dos produtos e serviços, redução de risco de funcionamento (segurança, ambiente, operação), aumentando desta forma a rentabilidade económica e a segurança das pessoas e do ambiente. Neste sentido, a manutenção e as suas estratégias são de especial importância na indústria.

O uso de estratégias ou técnicas avançadas na gestão da manutenção vem de certa forma proporcionar cada vez mais controlo e segurança nos processos produtivos, resultando no aumento da produtividade, visto que garantem uma maior disponibilidade dos equipamentos a um menor custo de manutenção. De acordo Herpich & Fogliatto (2013), no velho paradigma da manutenção, o objetivo era otimizar a disponibilidade da fábrica ao custo mínimo, por conseguinte no novo paradigma, a manutenção afeta todos os aspetos do negócio: segurança, integridade ambiental, eficiência energética e qualidade do produto.

No atual clima económico global, onde a competitividade entre as empresas é crescente assim como a exigência de maior qualidade nos produtos e serviços por parte dos consumidores, as grandes indústrias enfrentam uma grande pressão para reduzir os seus custos de produção de forma contínua. Esta situação representa um problema para um departamento de manutenção, visto que muitas vezes é um dos principais centros de custo de uma unidade industrial, em que os custos chegam a ser 15 a 70% dos custos de produção, variando de acordo com o tipo de indústria. Porém as consequências de uma política de manutenção ineficiente vão muito além dos custos diretos de manutenção (Pariazar, et al., 2008).

A implementação de um programa de manutenção numa instalação industrial tem custos elevados em termos de investimentos fixos e recursos humanos, pelo que a análise e justificação da seleção da estratégia de manutenção adequada é uma tarefa difícil e complexa devido ao grande número de fatores a serem considerados, muitos dos quais intangíveis. O processo de seleção de uma política de manutenção depende dos custos do programa de manutenção, juntamente com outros critérios como (Pariazar, et al., 2008):

- Qualidade do produto/serviço adicionado;
- Disponibilidade de peças de reposição;

- Tempo de manutenção disponível;
- Satisfação do cliente;
- Risco associado;
- Uso e desgaste dos equipamentos;
- Efeitos ambientais;
- Custos de pessoal;
- Fiabilidade;
- Etc.

Consequentemente a política de manutenção escolhida terá impacto direto na alocação de recursos, na seleção da tecnologia e nos processos de gestão e organização.

Por conseguinte, os técnicos responsáveis devem selecionar a melhor política de manutenção para cada equipamento ou sistema a partir de um conjunto de alternativas possíveis. No caso particular do desenvolvimento de estratégias de manutenção (ou seja, uma adequada combinação entre as políticas corretivas, preventivas e preditivas de manutenção) deve ser levado em conta que os recursos são limitados e como resultado, que não existe uma estratégia de manutenção perfeita. Isto porque é difícil definir a estratégia de manutenção ideal para cada equipamento, que por sua vez vai depender do seu grau de risco, custo e importância no processo industrial (Bertolini & Bevilacqua, 2006).

É precisamente nestes fatores que a metodologia FMEA vai incidir, ao avaliar e minimizar os riscos de um equipamento ou sistema, recorrendo à análise das suas possíveis falhas e implementação de ações corretivas. Desta forma consegue-se diminuir a probabilidade de ocorrência das causas dos modos de falha e a severidade dos efeitos das suas consequências. Durante este processo de avaliação de risco, é também possível realizar um estudo sobre o custo e a importância que as falhas promovem no equipamento.

A ferramenta FMEA vem assim auxiliar técnicos e engenheiros responsáveis pela manutenção, a selecionar a melhor política de manutenção para cada equipamento ou sistema.

## **1.2. Motivação**

A escolha do tema em questão é justificada pelo interesse em aplicar uma ferramenta de cariz prático como a FMEA, enquanto metodologia da manutenção centrada na fiabilidade (RCM), capaz de fornecer um enquadramento estruturado para

analisar as funções e potenciais falhas de um secador industrial de forma a desenvolver um planeamento de manutenção e de ações de melhoria, que conduzam a um nível de operação e um nível de risco aceitável, de uma forma eficiente e rentável.

A escolha do objeto de estudo teve como fundamento, o facto de até à data não ter conhecimento da existência de alguma abordagem FMEA aplicada a um ativo físico conhecido por desempenhar um papel muito importante em várias indústrias, como é o caso do secador industrial.

### **1.3. Objetivo do trabalho**

Objetivo geral:

- Este trabalho tem como objetivo principal a realização de uma avaliação de riscos a um secador industrial através da metodologia de análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA).

Objetivos específicos:

- Determinar os modos de falhas mais críticos e mais frequentes nos sistemas principais do secador industrial;
- Analisar os modos de falha e seus efeitos nos sistemas principais do secador industrial;
- Sugerir ações recomendadas para diminuição do grau de risco dos modos de falha do secador industrial;
- Contextualizar o problema da subjetividade na tomada de decisão de quais as ações recomendadas a aplicar em cada modo de falha;
- Aplicar o Processo de Análise Hierárquica (AHP) como método multicritério de análise de decisão.

### **1.4. Estrutura do trabalho**

Para cumprir o objetivo do trabalho anteriormente referido, esta dissertação foi dividida em 6 capítulos que podem ser descritos da seguinte forma:

- O capítulo 1 (Introdução) compreende o enquadramento, o objeto de estudo, a motivação da escolha do tema, define os objetivos e apresenta a estrutura do trabalho.
- O capítulo 2 (A Metodologia FMEA) descreve a metodologia aplicada na avaliação de riscos. É realizado o enquadramento da metodologia na fiabilidade, o seu conceito e os seus objetivos, implementação, quais os tipos de FMEA e suas aplicações, bem como benefícios e limitações. Neste capítulo é também feito uma comparação entre a FMEA e a FMECA de modo a realçar as suas diferenças.
- O capítulo 3 (A Metodologia AHP) descreve a metodologia aplicada no processo multicritério de análise de decisão, desde o seu conceito, desenvolvimento, quais as suas aplicações, benefícios e limitações.
- O capítulo 4 (Secadores Industriais) faz uma introdução sobre o processo de secagem e uma breve descrição sobre secadores industriais. Este capítulo apresenta também a classificação e seleção de secadores industriais, bem como uma abordagem mais específica ao objeto de estudo da presente dissertação, o secador industrial rotativo de tubos de vapor.
- O capítulo 5 (Estudo Prático) é inteiramente dedicado à aplicação prática das metodologias FMEA e AHP ao secador industrial rotativo de tubos de vapor. São elaboradas as tabelas de avaliação FMEA e procede-se à análise e discussão dos resultados obtidos. É também desenvolvida a hierarquia de decisão e as matrizes de comparação para o método AHP, procedendo-se igualmente à análise e discussão dos resultados obtidos.
- O capítulo 6 (Conclusões e Trabalhos Futuros) apresenta as conclusões finais relativamente aos resultados obtidos, bem como as limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. A Metodologia FMEA

### 2.1. Manutenção Centrada na Fiabilidade e a FMEA

A norma NP EN 13306:2007 define manutenção como a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida” (NP EN 13306, 2007).

Ao longo das últimas décadas, as estratégias de manutenção evoluíram bastante desde a técnica de manutenção corretiva, para estratégias mais sofisticadas, como a manutenção preventiva sistemática, preventiva condicionada, até à manutenção centrada na fiabilidade (RCM). Além das estratégias indicadas podem-se destacar ainda: a Terotecnologia, o TPM (Total Productive Maintenance), o TQM (Total Quality Maintenance), o RBI (Risk-based Inspection) e o modelo EUT (Eindhoven University of Technology Model) (Ferreira, 2003).

Das técnicas mencionadas, salienta-se a metodologia RCM que fornece um enquadramento estruturado que permite analisar as funções e potenciais falhas dos ativos físicos de forma a desenvolver um planeamento de manutenção que conduza a um nível de operação e um nível de risco aceitável, de uma forma eficiente e rentável (Sobral & Abreu, 2013). Para se implementar a estratégia de manutenção RCM é fundamental aplicar técnica de FMEA (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos). Esta metodologia compreende a definição clara e exaustiva de todas as falhas funcionais associadas aos componentes e acessórios do equipamento delimitado para análise. A Tabela 1 demonstra a importância da FMEA ao ser considerada como um dos seis passos integrantes da metodologia RCM.

Tabela 1 - Os 6 passos da metodologia RCM Fonte: (Sobral & Abreu, 2013)

<b>METODOLOGIA RCM</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>	1 - Preparação para a análise
		2 - Delimitação do sistema (Seleção do equipamento a ser analisado)
		3 - Identificação das funções
	<b>ANÁLISE</b>	4 - FMEA (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos)
		5 - Definição das políticas de manutenção
	<b>AÇÃO</b>	6 - Plano de manutenção

## 2.2. História da FMEA

A primeira referência sobre este método de análise data de 9 de Novembro de 1949 quando o exército norte-americano desenvolveu um procedimento militar MIL-P-1629 e intitulado de “Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis” (Procedimentos para Realização de Análises do Modo, Efeitos e Criticidade da Falha). Este era usado como técnica de avaliação da fiabilidade para determinar o efeito das falhas num sistema ou num equipamento. As falhas eram classificadas de acordo com o seu impacto no sucesso da missão e na segurança do pessoal e equipamento (Smith, 2014).

Durante a década de 60, este procedimento foi sendo desenvolvido e aplicado na indústria aeroespacial pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), que aplicou variações da ferramenta desenvolvida pelos militares como resposta aos seus compreensíveis requisitos de fiabilidade. Em 1966 a NASA utilizou a FMEA no desenvolvimento do programa espacial Apollo, com o objetivo de eliminar falhas em equipamentos que ficariam impossibilitados de ser reparados após lançamento e que contribuíam para problemas de fiabilidade do sistema e segurança da tripulação (Wikipedia, the free encyclopedia, 2014).

Em 1974 a FMEA passa ser uma norma quando a marinha norte-americana substitui o procedimento MIL-P-1629 pela norma militar MIL-STD-1629 A.

Na década de 70, a Ford Motor Company iniciou o uso generalizado desta metodologia, na conceção de produtos e serviços, após uma desastrosa performance do Ford Pinto, que em situações de colisão traseira rompia com extrema facilidade o tanque de combustível incendiando-se e ao mesmo tempo prendia os ocupantes no seu interior devido à deformação das portas. Após a adoção da FMEA, a Ford conquistou a maior credibilidade e fiabilidade no mercado automóvel (Gavin Robbins Consulting Ltd 2013, 2014).

Em 1988 a ISO, Organização Internacional de Normalização, desenvolveu a norma ISO 9000. Os requisitos desta norma forçaram as organizações a desenvolver sistemas de gestão de qualidade que idealmente estão focados nas necessidades, exigências e expectativas dos consumidores. A QS 9000 (é a analogia da ISO 9000 para a Indústria Automóvel). A QS 9000 foi criada com o objetivo de normalizar os sistemas de qualidade dos fornecedores, e resulta de um grupo de trabalho representado pela Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation. De acordo com esta norma, os fornecedores da indústria automóvel devem executar um Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP), aplicar uma FMEA de

processo e de produto, e também o desenvolvimento de planos de controlo (Smith, 2014).

Em 1993, a AIAG (Automotive Industry Action Group) publicou uma norma da FMEA para a indústria automóvel. No ano seguinte, em 1994 a SAE (Society of Automotive Engineers) criou a norma SAE J-1739 “Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design, Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes, and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery” (Análise dos Modos de Falha Potencial e seus Efeitos no Design, Análise dos Modos de Falha Potencial e seus Efeitos nos Processos de Fabrico e Montagem e Análise dos Modos de Falha Potencial e seus Efeitos em Máquinas) que facultava traços gerais para a realização de uma FMEA (Wikipedia, the free encyclopedia, 2014).

Analisando o percurso histórico supracitado é possível perceber que o impacto da FMEA foi sendo cada vez maior, graças a uma maior importância do conceito de qualidade, bem como o aparecimento de normas mais exigentes em prol da conceção de produtos mais eficientes e mais robustos. Assim sendo no presente, esta ferramenta apresenta-se como um forte instrumento de apoio que faz parte da estratégia da maioria dos poderosos grupos empresariais a nível mundial, que queiram competir por bons resultados.

Com este breve resumo, pretende-se demonstrar a evolução que conduziu à valorização da FMEA, seguindo-se uma exposição mais pormenorizada, mais concretamente onde e quando se deve aplicar, em que se baseia, e quais as conclusões que se podem tirar do seu uso.

### **2.3. FMEA – Conceito e Objetivos**

A FMEA “Failure Mode and Effect Analysis” (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos) é um método indutivo que permite analisar para cada componente de um sistema de uma forma sistemática os vários modos de falha que poderão ocorrer, as suas causas e os seus efeitos no funcionamento e segurança do sistema (Sobral & Abreu, 2013). Este método também pode ser definido como uma técnica de engenharia usada para definir, identificar e eliminar falhas conhecidas e/ou potenciais, problemas e erros de um sistema, projeto, processo e/ou serviço, antes que chegue ao consumidor (Stamatis, 2003).

Por sua vez Teoh & Case (2004) definem a FMEA como uma técnica que identifica os potenciais modos de falha de um produto ou de um processo, os efeitos das falhas, e avalia a criticidade desses efeitos sobre a funcionalidade do produto, fornecendo também informações básicas sobre a previsão da fiabilidade e sobre projetos de produtos ou processos.

A FMEA pode ainda ser vista como uma ferramenta que segue os princípios da gestão da qualidade total, que tem como objetivo avaliar e minimizar os riscos de um produto ou processo, recorrendo à análise das possíveis falhas (determinação da causa, o respetivo efeito/risco para cada falha) e implementação de ações corretivas para melhorar a fiabilidade e qualidade do produto ou processo, procurando aumentar a satisfação e a fidelização dos clientes (Santos A. C., 2011).

De acordo com Moura (2000) esta ferramenta assenta no seguinte conjunto de objetivos:

- Reconhecer e avaliar a falha potencial de um produto/ processo e seus efeitos;
- Identificar ações que podem eliminar ou reduzir a hipótese do modo de falha potencial vir a ocorrer;
- Documentar o processo de análise.

Por sua vez, Carlos D. Santos (2008) defende que esta metodologia deve ser necessariamente composta por 4 objetivos principais, que se baseiam na redução de:

- Defeitos durante a produção de amostras iniciais e no global do volume de produção;
- Queixas dos consumidores;
- Falhas em linha;
- Reclamações em garantia.

## **2.4. FMEA vs. FMECA**

A FMEA e a FMECA (Análise de Modos, Efeitos e Criticidade das Falhas) são técnicas que utilizam a mesma metodologia base para identificar e prevenir falhas em produtos e processos antes que eles ocorram, excetuando algumas diferenças que serão apresentadas de seguida.

A FMEA fornece apenas informações qualitativas servindo basicamente para chamar a atenção relativamente aos modos de falha com efeitos importantes ao nível da severidade, capacidade de deteção, manutibilidade e segurança. Por outro lado a FMECA além das mesmas informações, proporciona ainda informações quantitativas ou dados capazes de serem mensuráveis. Basicamente a FMECA é efetivamente uma extensão da FMEA, uma vez que além da análise do modo de falha de um produto ou processo e os seus efeitos, é realizada uma análise de criticidade da falha.

Esta análise de criticidade atribui um grau de importância a cada modo de falha identificado na FMEA, de acordo com a classificação da gravidade de cada modo de

falha e a probabilidade de ocorrência (Haq & Lipol, 2011). A classificação da criticidade do modo de falha pode ser: (i) crítico, (ii) potencialmente crítico ou (iii) não crítico. Os itens críticos e potencialmente críticos devem ser incluídos nos programas de manutenção (Herpich & Fogliatto, 2013).

A análise de criticidade não vem adicionar informação à FMEA, o seu objetivo é limitar o âmbito da FMECA para os modos de falha identificados pela FMEA que necessitam de manutenção centrada na fiabilidade (RCM) (Haq & Lipol, 2011).

Segundo a “International Marine Contractors Association” (2002) a FMECA consiste num método que estima o número de vezes cada componente do sistema irá falhar, usando o histórico de falhas reais recolhidas no terreno, para depois se calcular quantas vezes todo o sistema irá falhar. No entanto, embora se consiga saber que o sistema irá por ventura falhar num dado espaço temporal, não se sabe ao certo quando. Por conseguinte, a vantagem está em conseguir determinar quais são as áreas do sistema que demonstram uma tendência para serem menos fiáveis e assim se poder modificar o sistema aumentando a sua fiabilidade ou centrar o plano de manutenção justamente nas áreas que necessitem maior atenção.

Durante esta dissertação, o termo usado será sempre FMEA por ser o termo mais adequado para o trabalho realizado.

## **2.5. Aplicações da FMEA**

A aplicação da FMEA abrange inúmeras áreas como o desenvolvimento de produtos, processos de fabrico, de serviços e ações de manutenção (Sardinha, Claro, & Pereira, 2009). Uma das indústrias que se destaca no uso extensivo da FMEA é a indústria automóvel, cuja ferramenta é um requisito dos fornecedores desta indústria. A metodologia FMEA é também utilizada com maior destaque na indústria aeroespacial, nuclear e bioquímica (Haq & Lipol, 2011).

De seguida são exibidos alguns exemplos da vasta gama de aplicações práticas da FMEA correntemente encontradas nas áreas supracitadas, onde se incluem (ReliaSoft Corporation., 2014):

- Avaliação do projeto de produtos e processos para antecipar e resolver possíveis modos de falha no seu início, quando a retificação dos modos de falha é mais económica;
- Desenvolvimento de procedimentos de manutenção eficazes. Como por exemplo, a análise da Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) e a análise MSG-3 para a indústria aeronáutica;

- Integração na política de gestão de crescimento da fiabilidade;
- Integração nos processos de DVP&R (Relatório e Plano de Verificação de Projeto) e APQP (Planeamento Avançado da Qualidade do Produto);
- Investigação da fiabilidade de sistemas e processos existentes;
- Local central para informações relacionadas com a fiabilidade do produto/processo;
- Base de conhecimento para a solução de futuros problemas;
- Ferramenta de aprendizagem para os novos engenheiros;
- Ferramenta de entrada (input) para outros sistemas de análises, tais como diagramas de blocos de fiabilidade (RBD), Análises de Markov, Árvore de Falhas, entre outros;
- Contribui para a identificação de requisitos para o BITE (Built-In Test Equipment);
- Inclusão nas técnicas de Análise Probabilística de Riscos a equipamentos e instalações industriais complexas;
- Desenvolvida para atender às exigências do cliente e/ou para cumprir com os requisitos de segurança e qualidade, em sistemas como:
  - ISO 9001, QS 9000
  - ISO / TS 16949
  - 6 Sigma
  - FDA e GMP
  - Process Safety Management Act

Além das aplicações referidas, existem também na área da investigação diversos artigos científicos, alguns fora do âmbito a que normalmente a FMEA é aplicada. De seguida são apresentados de forma resumida, alguns exemplos de artigos científicos referentes a diferentes áreas e que incluem a metodologia em epígrafe, tais como:

- Na área da medicina, Chiozza e Ponzetti (2009) aplicaram a FMEA como modelo para a redução de erros médicos na medicina laboratorial. Como resultado deste estudo houve uma redução significativa do número prioritário de risco (NPR) ao aplicar a FMEA ao processo de tipagem sanguínea, analitos de química clínica e sistemas de teste “point-of-care”.
- No sector energético, Hoseynabadi, Oraee e Tavner (2010) utilizaram a FMEA para estudar a fiabilidade de turbinas eólicas usando um software de análise fiabilística. Neste estudo foi realizada uma comparação entre os resultados quantitativos obtidos no uso da FMEA e dados recolhidos no terreno sobre a fiabilidade de turbinas eólicas, para que sejam discutidas as relações entre os

dados obtidos, na medida em que possam ser úteis para futuros projetos de turbinas eólicas.

- Na área da engenharia civil, Rodrigues, Teixeira, & Cardoso (2011) realizaram um estudo com o objetivo de apresentar um método de pesquisa visual do nível de degradação da envolvente de edifícios e os resultados obtidos para o grau de degradação de cada anomalia tipificada e ainda o nível de performance de cada edifício de acordo com certos requisitos. A FMEA serviu de base de trabalho neste estudo ao ser utilizada para analisar as principais causas e os efeitos das anomalias identificadas.
- Na indústria alimentar, Scipioni, Saccarola, Centazzo, & Arena (2002) descrevem a metodologia da FMEA de projeto e a sua implementação, numa empresa alimentar inserida no sistema gestão de segurança alimentar HACCP (Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controlo). Este sistema é usado como uma ferramenta para garantir a qualidade dos produtos e como método de melhoria do desempenho operacional do ciclo de produção. O trabalho foi desenvolvido na confeitaria italiana Elledi S.p.A. e foi focou-se no estudo das linhas de produção de biscoitos wafer. O resultado do estudo permitiu aumentar o conhecimento e o controlo sobre os processos e produtos da empresa, gerando uma base de dados técnica útil para futuras atualizações da FMEA.

## **2.6. Tipos de FMEA**

A FMEA pode ser classificada em diversos tipos, dependendo do objeto de estudo. A informação existente na literatura relativamente aos vários tipos de FMEA não é de todo unânime. Stamatis (2003) destaca quatro tipos de FMEA, como, Sistema, Produto/Projeto, Processo e Serviço. Outros autores classificam em três categorias (Sistema, Produto/Projeto e Processo), no entanto o número de categorias mais consensual na literatura sobre o tema cinge-se a dois tipos de FMEA (Produto/Projeto e Processo).

Na presente dissertação serão descritas três classes de FMEA:

- A FMEA de Sistema consiste na análise de sistemas e subsistemas durante a fase de conceção e de projeto. O foco principal desta análise consiste na identificação dos potenciais modos de falha do sistema em relação às suas funcionalidades e no atendimento das expectativas dos clientes, ou seja, está diretamente ligada à perceção do cliente em relação ao sistema. Inclui-se também a identificação dos potenciais modos de falha na interação de

múltiplos sistemas e interação entre os elementos de um sistema em fase de concepção.

- A FMEA de Produto/Projeto realiza a análise a um projeto de um produto (máquinas, ferramentas, componentes), antes de ser enviado para a produção, devendo no entanto o produto ser analisado durante toda a sua vida útil. A mesma centra-se em potenciais modos de falha de projeto, causados pela escolha de material incorreta, especificações inadequadas entre outras deficiências de projeto, que podem resultar num mau desempenho do produto ou num ciclo de vida útil curto. Está diretamente ligada à capacidade do projeto corresponder aos objetivos previamente definidos, e à garantia de que o produto tem as condições necessárias para ser produzido. Este tipo de FMEA esclarece a necessidade de alterações no projeto do produto, estabelece prioridades para as ações de melhoria, auxilia na definição de testes e validação do produto, na identificação de características críticas e na avaliação dos requisitos e alternativas do projeto. É uma ferramenta bastante útil que pode ser usada para analisar as etapas do projeto (projeto preliminar, protótipo ou projeto final), ou inclusivamente pode ser usada em produtos já em produção. São normalmente feitas ao nível do sistema, subsistema e ao nível de componentes.
- A FMEA de Processo efetua a análise a um processo de fabrico e montagem ao nível de um sistema subsistema ou componente. Esta centra-se em potenciais modos de falha que tenham como origem deficiências do processo de montagem e excessivas variações no processo de fabrico. Está ligada à capacidade do processo em cumprir os seus objetivos, para atingir a conformidade do produto. Este tipo de FMEA define as necessidades de alterações no processo, estabelece prioridades para as ações de melhoria, auxilia na execução do plano de controlo do processo e na análise dos processos de fabrico e montagem. Esta ferramenta é útil para estudar como as etapas de um processo podem influenciar o projeto de uma máquina, incluindo a seleção dos seus componentes.

É importante referir que independentemente dos tipos de FMEA aqui apresentadas, o propósito desta metodologia é sempre minimizar o impacto de falhas, nos diferentes campos de atuação, promovendo a melhoria contínua.

## **2.7. Implementação da FMEA**

A altura ideal para a realização de uma FMEA é um dos fatores mais importantes para a sua implementação. Segundo o Manual de Referência FMEA

(Moura, 2000) o método deve ser aplicado antes de um evento, ou seja antes de um modo de falha de um projeto/processo, seja incorporado no produto sem ter sido percebido.

Ao realizar-se a FMEA numa fase inicial do projeto/processo, as alterações podem ser implementadas com maior facilidade e com menores custos, diminuindo com certeza eventuais crises provocadas por alterações tardias. Em teoria quando aplicada corretamente é um processo interativo que nunca acaba, ou seja é suscetível de sofrer constantes alterações e atualizações (Moura, 2000).

Durante as fases iniciais de projeto/processo normalmente são feitas várias modificações que podem muitas vezes introduzir novos modos de falha, pelo que é sempre importante rever e/ou atualizar a FMEA quando (Crow, 2002):

- São desenvolvidos novos sistemas, produtos e processos;
- Os sistemas existentes, produtos, processos ou serviços sofrem alterações;
- Há uma alteração no projeto do produto e/ou processo, uma vez que o produto e processo estão interligados, ou seja quando o projeto do produto é alterado o processo sofre um impacto e vice-versa;
- São impostas novas normas ou requisitos;
- Existem indícios de problemas no produto ou processo através de reclamações do cliente;
- Um produto ou processo existente passa a ser usado num novo ambiente ou tem uma nova aplicação.

É necessário referir que a FMEA também pode ser realizada em produtos/processos que já se encontram em funcionamento. Todavia nestes casos o objetivo passa por identificar a origem das falhas do produto/processo e propor soluções de melhoria.

### **2.7.1. Passos para Implementação da FMEA**

Através de uma análise à literatura existente e, no que diz respeito à implementação da metodologia FMEA, verifica-se a existência de diferentes procedimentos que de uma maneira geral variam apenas quanto ao número de etapas. Independentemente deste número, o objetivo comum aos diversos procedimentos, é promover o aumento da probabilidade de deteção ou a redução da probabilidade de ocorrência da falha.

Como exemplo de um procedimento de implementação da FMEA foi escolhido, o procedimento do Manual de Referência FMEA (Moura, 2000) que distingue cerca de

22 passos para a sua implementação. Este distingue a metodologia de aplicação de uma FMEA de projeto e processo, que apesar de seguirem a mesma filosofia, têm no entanto pormenores distintos, pelo que se devem diferenciar individualmente.

A implementação de uma FMEA de projeto começa com o desenvolvimento de uma lista sobre o que projeto deverá e não deverá fazer, ou seja, é definido o objetivo do projeto. A incorporação das necessidades e expectativas do cliente, que podem ser determinadas através do QFD (Quality Function Deployment) e dos requisitos conhecidos do produto, podem ser úteis para a definição do objetivo do projeto. O Manual de Referência FMEA (Moura, 2000) afirma também que na implementação da FMEA de projeto é também usado um diagrama de blocos para o sistema e subsistema em análise, ilustrando as relações primárias entre os itens cobertos na análise e ao mesmo tempo estabelecendo uma ordem lógica. Desta forma, quanto melhor for a definição das características desejadas, mais fácil será a identificação dos potenciais modos de falha e as respetivas ações corretivas.

Na FMEA de processo a sua implementação começa com a elaboração de um fluxograma, que irá proporcionar uma melhor visualização de potenciais riscos e deverá identificar as características do produto/processo associadas a cada operação. Deveria ser incluída, se disponível, a identificação dos efeitos no produto pela FMEA de projeto correspondente.

É importante referir que é possível desenvolver uma FMEA sem o auxílio de diagramas de blocos e fluxogramas, porém a análise do sistema é capaz de se tornar mais difícil e a probabilidade de haver algum lapso por esquecimento de algum detalhe torna-se maior.

A Figura 1 representa um fluxograma que mostra por ordem as fases de implementação de uma FMEA. O fluxograma vai auxiliar a equipa designada para a implementação da FMEA a preencher um formulário (Figura 2) baseado em perguntas que devem ser feitas pela equipa em cada etapa. A equipa vai respondendo a cada uma das perguntas e preenche as colunas do formulário com as respostas encontradas através de um consenso. A discussão realizada pela equipa segue a ordem do fluxograma.

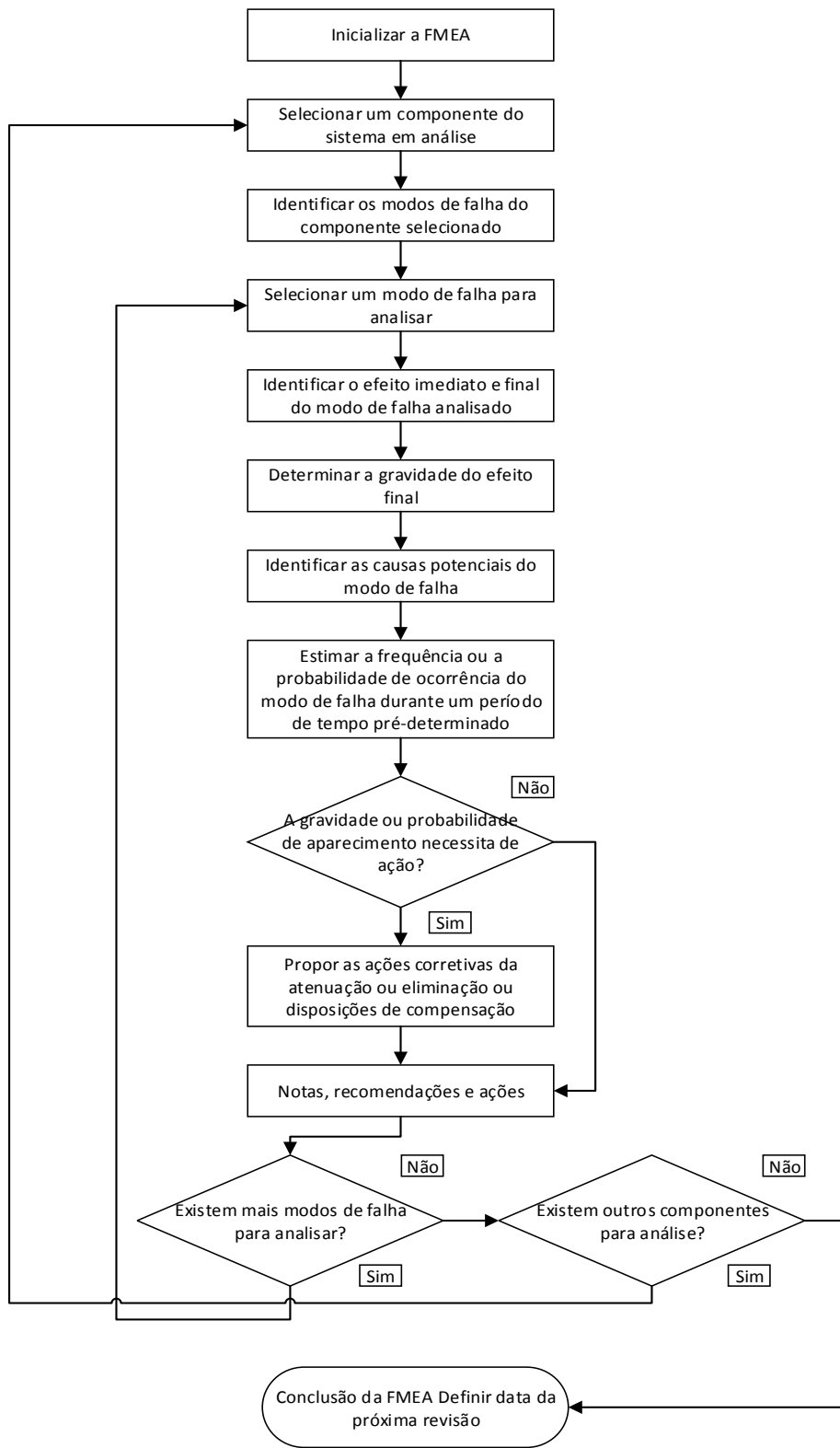


Figura 1 - Fluxograma representativo de implementação de uma FMEA Fonte: (Santos C. D., 2008)

Na presente dissertação, os passos de implementação da FMEA serão abordados de uma forma generalista, tendo em conta a necessidade de não tornar o capítulo demasiado extenso.

De seguida, será realizada uma breve descrição dos 22 pontos necessários à elaboração de uma FMEA com base no Manual de Referência FMEA (Moura, 2000):

1) Numeração da FMEA

- Preenchimento do documento com um número ou código o qual poderá ser usado para rastreabilidade.

2) Identificação do sistema, produto ou processo a ser analisado

3) Identificação dos sectores da empresa envolvidos

- Preenchimento dos dados do fabricante de equipamento original, departamento e grupo.

4) Identificação do responsável

- Preenchimento dos dados do engenheiro responsável pela FMEA.

5) Designação do produto ou processo

6) Data chave

- Data inicialmente prevista como prazo para conclusão da FMEA.

7) Data de início e finalização da FMEA

- Data em que a FMEA inicial teve início e a data da última revisão, se for esse o caso.

8) Equipa

- Reunir os nomes e departamentos das pessoas responsáveis para a identificação e/ou realização de tarefas relacionadas com a FMEA. A equipa deve ser constituída por colaboradores com experiência no tema a ser analisado, por exemplo, engenheiros de projeto, produção, montagem, manutenção e qualidade. O pretendido com uma equipa multidisciplinar é que cada um dos elementos traga uma variedade de perspetivas e experiências e ao

mesmo tempo, coloque problemas relativamente ao projeto/processo, para estimular uma troca de ideias entre os departamentos envolvidos.

#### 9) Identificação dos componentes ou processos em análise

- Devem ser indicados todos os componentes ou processos que podem estar sujeitos a potenciais falhas. A função de cada componente deve ser indicada e caso este tenha mais do que uma função com modos de falha diferentes, devem ser todas indicadas separadamente. Para a identificação de componentes do produto devem ser usados blocos funcionais, enquanto para a identificação de processos deve-se aplicar a divisão em subprocessos. Assim conseguem-se tabelas mais reduzidas, com informação relativa apenas ao componente, o que facilita em termos de organização da própria informação e na análise de potenciais falhas.

#### 10) Definição dos modos de falha potenciais

- O modo de falha potencial é definido como a maneira que um componente, sistema ou subsistema, falha no cumprimento das suas funções inicialmente previstas (objetivos do projeto/processo). A identificação dos modos de falha deve ser feita através de uma análise crítica, recorrendo à consulta de problemas passados e à discussão em equipa.

#### 11) Efeitos potenciais de falha

- Consiste no efeito da falha relativamente ao cliente final, ou seja é a forma como o cliente final percebe a falha. Para o preenchimento deste campo é recomendável o uso de dados históricos, documentos de garantia, reclamações de clientes, dados de fiabilidade, entre outros.

#### 12) Severidade (S)

- A severidade traduz-se no impacto negativo provocado pelo efeito do modo de falha. No estudo da FMEA utiliza-se, para medir esta característica, um índice (S) que pode variar entre “1” e “10”, de acordo com a tabela abaixo apresentada.

Tabela 2 - Tabela de Severidade Fonte: (Moura, 2000)

Efeito	Critério (Severidade do efeito)	Índice de Severidade
Perigoso sem aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do produto e/ou envolve não conformidade com a legislação governamental sem aviso prévio.	10
Perigoso com aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do produto e/ou envolve não conformidade com a legislação governamental com aviso prévio.	9
Muito alto	Produto/Item inoperável, com perda das funções primárias.	8
Alto	Produto/Item operável, mas com nível de desempenho reduzido. Cliente insatisfeito.	7
Moderado	Produto/Item operável, mas com nível de conforto/ conveniência baixo. Cliente sente desconforto.	6
Baixo	Produto/Item operável, mas com nível de conforto/ conveniência e desempenho reduzido. O cliente sente alguma insatisfação.	5
Muito baixo	Itens: Forma e acabamento não conforme. Defeito notado pela maioria dos clientes.	4
Menor	Itens: Forma e acabamento não conforme. Defeito notado por alguns clientes.	3
Muito menor	Itens: Forma e acabamento não conforme. Defeito notado por clientes acurados.	2
Nenhum	Sem efeito	1

### 13) Classificação de características críticas

- Este campo pode ser usado (preenchimento não obrigatório) para classificar qualquer característica especial de alguns componentes e que necessitem de controlos adicionais.

### 14) Causas e mecanismos potenciais de falhas

- Define-se como uma indicação de deficiências de projeto/processo cuja consequência origina o modo de falha. Para se determinar as causas, a equipa deve questionar-se sobre o que pode impedir que o projeto/processo cumpra os seus objetivos. Algumas causas típicas são especificações incorretas do material, lubrificação insuficiente e instruções de manutenção inadequadas. As causas apresentadas devem ser as mais específicas possíveis, devendo-se evitar a justificação de falhas com situações redundantes como falha do operador ou mau funcionamento da máquina.

## 15) Ocorrência (O)

- A ocorrência consiste na probabilidade de uma causa potencial específica vir a ocorrer. Esta probabilidade pode ser estimada numa escala de “1” a “10”, mas tem um significado mais importante que apenas um valor. Para se reduzir efetivamente o índice de ocorrência é necessário eliminar ou controlar um mecanismo de falha através de uma alteração no projeto/processo. É importante referir que o índice de ocorrência está relacionado com a probabilidade de ocorrência e não com a ocorrência em si.

Abaixo encontra-se a tabela de atribuição do índice de ocorrência (O) associando as pontuações de “0” a “10” e os CpK (Índice de capacidade do processo) correspondentes à probabilidade de falhas acontecerem.

Tabela 3 - Tabela de Ocorrência de Falha Fonte: (Moura, 2000)

Efeito	Taxas de falha possíveis (número de horas)	Cpk	Índice (O)
Muito alta: A falha é quase inevitável	$\geq 1$ em 2	$\geq 0,33$	10
	$\geq 1$ em 3		9
Alta: Geralmente associada a processos similares aos anteriores que apresentaram falhas frequentes	1 em 8	$\geq 0,51$	8
	1 em 20	$\geq 0,67$	7
Moderada: Geralmente associada a processos similares aos anteriores que apresentaram falhas ocasionais, mas não em maiores proporções	1 em 80	$\geq 0,83$	6
	1 em 400	$\geq 1,00$	5
	1 em 2000	$\geq 1,17$	4
Baixa: Associada a processos similares que apresentaram poucas falhas	1 em 15000	$\geq 1,33$	3
Muito baixa: Associada a processos quase idênticos que apresentaram apenas falhas isoladas	1 em 150000	$\geq 1,50$	2
Improvável: Falha é improvável. Processos quase idênticos nunca apresentaram falhas	$\leq 1$ em 1500000	$\geq 1,67$	1

## 16) Controlos atuais do projeto/processo

- Consiste na descrição das ações de controlo que podem detetar ou prevenir, a ocorrência do modo de falha. São consideradas 3 tipos de ações de controlo:

1 – Prevenção da ocorrência da causa ou modo/efeito de falha ou redução da taxa de ocorrência destes;

2 – Deteção da causa e aplicação da ação corretiva;

### 3 – Detecção do modo de falha.

O Manual de Referência FMEA (Moura, 2000) recomenda que a ordem para aplicar as ações de controlo deve ser, primeiro tipo 1 seguida do tipo 2 e tipo 3 respetivamente. As ações do tipo 1 podem ajudar a baixar os índices de ocorrência (O), desde que existam dados relativos à respetiva causa. Ao mesmo tempo as ações de controlo do tipo 2 e 3 servem de base para os índices de deteção, desde que o projeto/processo em uso seja representativo do seu objetivo.

#### 17) Detecção (D)

- O índice de detecção (D) consiste na avaliação da eficácia dos controlos definidos, em identificar causas (controlos do tipo 2) e modos de falhas (controlos do tipo 3), antes de se dar início à produção do respectivo componente. A escala deste índice (que pode variar de “1” a “10”) exhibe uma ordem de grandeza inversa às da Severidade e Ocorrência, uma vez que é atribuído a pontuação mais baixa ao maior nível de deteção.

O Manual de Referência FMEA (Moura, 2000) chama a atenção que um baixo índice de deteção não significa forçosamente um baixo índice de ocorrência, pelo que deve ser avaliada a capacidade dos controlos atuais do projeto/processo em detetar a baixa frequência de modos de falha. Outra nota importante refere que as amostragens estatísticas são válidas como controlo de deteção ao invés das verificações aleatórias de qualidade do projeto/processo, que não são eficazes para a deteção de um defeito isolado e não devem influenciar o índice de deteção.

De seguida é apresentada a tabela correspondente ao índice de deteção de uma potencial falha.

Tabela 4 - Tabela Índice de Detecção Fonte: (Moura, 2000)

Detecção	Critério (Probabilidade de Detecção pelo Controlo de Projeto/Processo)	Índice de Detecção
Quase Impossível	Não é conhecido controlo disponível para detetar o modo de falha.	10
Muito remota	Probabilidade muito remota de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	9
Remota	Probabilidade remota de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	8
Muito baixa	Probabilidade muito baixa de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	7
Baixa	Probabilidade baixa de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	6
Moderada	Possibilidade moderada que o Controle de Projeto irá detetar um causal mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	5
Moderadamente alta	Probabilidade moderadamente alta de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	4
Alta	Probabilidade alta de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	3
Muito alta	Probabilidade muito alta de que o controlo atual irá detetar o modo de falha.	2
Quase certamente	Controlo atual quase certamente irá detetar o modo de falha. A confiança nos controlos de detecção é conhecida em processos similares.	1

#### 18) Número prioritário de risco (NPR)

- O número prioritário de risco resulta do produto dos três índices referidos anteriormente (S – Severidade; O – Ocorrência; D – Detecção).

$$\text{NPR} = (\text{S}) \times (\text{O}) \times (\text{D})$$

O objetivo do NPR é priorizar a eliminação dos modos de falha. Este número pode variar entre “1” e “1000”. Analisando cada uma das tabelas dos índices, verifica-se que atribuindo o valor máximo de cada índice obtem-se um NPR de 1000 que é completamente indesejável. Isto porque o valor máximo de índice de severidade, ocorrência e detecção correspondem respectivamente a “efeito perigoso sem aviso prévio”, “...falha quase inevitável” e “quase impossível”. Para NPR’s altos a equipa deve concentrar esforços a fim de reduzir o risco calculado através de ações correctivas. De modo geral, deve ser dada atenção especial quando o índice de severidade é alto, independentemente do valor de NPR.

#### 19) Acções recomendadas

- Após a classificação dos modos de falha através NPR, devem ser propostas ações correctivas para os itens críticos e com altos índices de NPR. O objectivo

das acções recomendadas é reduzir o índice de ocorrência (O), de severidade (S) ou de detecção (D). Desta forma deve ser promovida a necessidade de implementar acções correctivas, específicas, com resultados quantificáveis, recomendando acções para outras actividades e acompanhando todas as recomendações. Uma FMEA bem executada e bem desenvolvida não terá valor significativo sem que as acções correctivas sejam implementadas. Como tal é da responsabilidade de todas as áreas afectadas, implementar programas de acompanhamento efectivos para contemplar todas as recomendações. As seguintes acções devem ser consideradas:

- Para reduzir a probabilidade de ocorrência, são recomendadas revisões do projeto/processo. Podem ser realizados estudos estatísticos para a obtenção de informações importantes para a prevenção de defeitos e melhoria contínua do processo.
- A única forma de se conseguir uma redução no índice de severidade é alterando o projeto e/ou processo.
- Para aumentar a probabilidade de detecção devem ser implementadas revisões no processo e/ou projeto.

Segundo o Manual de Referência FMEA (Moura, 2000), devem ser realizadas acções correctivas sempre que o efeito de um modo de falha potencial representar perigo para o operador. Para prevenir este modo de falha deve-se especificar protecção adequada para o operador, ou proceder à redução e eliminação das causas.

## 20) Responsável e prazo

- Preenchimento dos dados referentes às pessoas responsáveis pela implementação de acções de correcção que foram decididas e os respectivos prazos.

## 21) Acções correctivas definidas

- Deve-se preencher este campo após a implementação da acção de correcção com uma breve descrição da mesma acção e a data de implementação.

## 22) NPR final

- Finalmente, após a implementação das acções correctivas, calculam-se os novos índices de severidade(S), ocorrência (O) e detecção (D). Estes devem ser inferiores aos que existiam antes da implementação das acções correctivas descritas pelo ponto anterior.

A FMEA deve ser sempre atualizada quando houver alterações ao projeto, mesmo que a produção já se tenha iniciado, de forma a procurar sempre possíveis melhorias no desempenho do produto.

Os vinte e dois passos para aplicação da FMEA, são preenchidos pelos especialistas através de um formulário (Figura 2). Este documento vai permitir a identificação, o controlo e a eliminação das falhas do produto/processo.

Sistema					FMEA Número	(1)					
Subsistema					Página		de				
Componente	(2)	Responsável pelo Projeto			(3)	Preparado por		(4)			
Produto	(5)	Data Chave			(6)	Data FMEA (Início)		(7) (Revisão)			
Equipa	(8)										

Item/ Função	Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potencial (is) da Falha	Classif. Severidade (13)	Causa (s) e Mecanismo (s) Potencial (is) da Falha	Ocorrência	Controlos atuais do projeto	Detetabilidade (17)	NPR (18)	Ações recomendadas	Responsável e prazo	Resultado das ações (22)					
											Ações tomadas	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade		
(9)	(10)	(11)	(12)	(14)		(16)	(17)	(19)	(20)							

Figura 2 - Formulário FMEA Fonte: (Moura, 2000)

## 2.8. Benefícios e Limitações da FMEA

A realização de uma FMEA tem como benefício principal entender quais os problemas existentes nos produtos e nos processos. A análise em si desenvolve uma forma sistemática de hierarquizar informações sobre as falhas dos produtos e processos, ajudando a conceber um sistema de prioridades de melhorias, investimento, desenvolvimento e testes. De acordo com Haq & Lipol (2011), a aplicação da metodologia traz muitos benefícios, tais como por exemplo:

- Maior fiabilidade, qualidade e segurança do produto/processo;
- Identificação e eliminação de potenciais modos de falha do produto/processo em menor espaço de tempo;
- Maior satisfação do consumidor;
- Redução de custos;
- Redução do tempo gasto em desenvolvimento;
- Menores custos em retificações;
- Redução de custos em questões de garantia;
- Diminuição de desperdícios e operações adicionais que não acrescentam valor (Gestão Lean)
- Desenvolvimento de planos de controlo;
- Registo de informações úteis no desenvolvimento de programas de teste;
- Promoção do trabalho de equipa e relações de trabalho multifuncionais;
- Planos de manutenção otimizados;
- Maior competitividade e melhor imagem da empresa;

- Fornece um registo bem documentado de melhorias e de ações corretivas implementadas;
- Faculta novas ideias para melhorias em projetos ou processos semelhantes.

Apesar de a FMEA ter demonstrado ser uma das mais importantes ações preventivas durante a fase de projeto de um sistema, produto, processo ou serviço, o método tem sido alvo de críticas pela comunidade científica (Liu, et al., 2011). Estas críticas têm como base algumas limitações que a metodologia FMEA apresenta, tais como:

- A análise levada ao pormenor que é requerida torna o processo fastidioso e demorado, com consequentes custos de aplicação (Miller, 2006);
- O método não está preparado para descobrir modos de falha complexos envolvendo várias falhas ou subsistemas. Para estes casos deve-se usar o método análise de árvore de falhas (Riplová, 2007).
- Requer conhecimento profundo do assunto a ser estudado, o que normalmente significa, uma sessão de brainstorming com várias pessoas envolvidas desde o projeto até à entrega. Esta situação dificulta a implementação do método não sendo a abordagem favorita da indústria para a gestão de risco e segurança (Haq & Lipol, 2011).
- Depende bastante do grau de experiência e opiniões da equipa, o que limita a resolução de qualquer problema além do seu conhecimento (Miller, 2006).
- A fórmula matemática para o cálculo do NPR é questionável e discutível, uma vez que não há aparentemente nenhuma justificação de que o produto da Severidade, Probabilidade de Ocorrência e a Detetabilidade, dê origem ao NPR (Liu, et al., 2011);
- A importância relativa entre O, S e D não é tomada em consideração, ou seja assume-se que os três fatores têm a mesma importância, o que não corresponde muitas vezes à realidade (Liu, et al., 2011);
- Diferentes classificações de Severidade, Probabilidade de Ocorrência e Detetabilidade podem produzir exatamente o mesmo valor de NPR, mas as consequências dos seus riscos ocultos podem ser totalmente diferentes. (Ex: duas situações em que se tem 2,3,2 e 4,1,3 para a S, O e D respetivamente, irão resultar no mesmo valor de NPR, no entanto as implicações dos seus riscos ocultos, podem ser bastante díspares devido aos diferentes graus de severidade do modo de falha.) (Liu, et al., 2011);

- Os três fatores são difíceis de determinar com precisão. Isto porque existe muita informação na FMEA que pode ser expressa de uma forma linguística, deixando a interpretação de uma forma subjetiva ao leitor. Como por exemplo expressões do tipo “provável”, “importante” ou “muito alta” (Liu, et al., 2011).
- A conversão de pontuações é diferente para os três fatores, pois enquanto Severidade segue uma função linear, a Probabilidade de Ocorrência utiliza uma função que não é necessariamente linear (Liu, et al., 2011).
- O NPR considera apenas três fatores em termos de segurança desprezando por completo outros fatores igualmente importantes, como os aspetos económicos (Liu, et al., 2011).



## **3. A Metodologia AHP**

### **3.1. Método Multicritério de Análise de Decisão**

O ser humano ao longo da sua vida é confrontado com situações onde é necessário realizar escolhas e obrigado a tomar decisões. Esta tomada de decisão é um processo comum e muitas vezes, é baseada na intuição, sentimento, experiência ou outro parâmetro subjetivo. Porém o processo de decisão quando inserido num ambiente complexo dificulta a tomada de decisão, uma vez que pode envolver dados imprecisos ou incompletos, múltiplos critérios e diversas alternativas.

A tomada de decisão deve procurar uma opção que apresente o melhor desempenho, a melhor avaliação, ou o melhor acordo entre as expectativas do decisor, considerando a relação entre os elementos. Podemos então, definir a decisão como um processo de análise e escolha entre várias alternativas disponíveis (Barros, Marins, & Souza, 2009).

O Método Multicritério de Análise de Decisão (MCDM - Multiple-Criteria Decision-Making) é utilizado na tomada de decisão, na medida em que permite a abordagem de problemas considerados complexos e ao mesmo tempo confere uma clareza e transparência que não seria possível através de métodos intuitivos. Ele estabelece um padrão no processo de tomada de decisão através de modelação matemática, ajudando o decisor a resolver problemas nos quais existem diversos objetivos a serem alcançados simultaneamente.

Um dos métodos mais conhecidos dentro do MCDM é o Processo de Análise Hierárquica (AHP - Analytic Hierarchy Process). A sua popularidade deve-se ao facto de ser um método muito intuitivo e fácil de executar, ao contrário dos outros métodos MCDM que têm uma base matemática sólida, mas que por sua vez são muito complexos só podendo ser utilizados por cientistas e analistas de decisão qualificados.

### **3.2. AHP – Conceito**

O método AHP foi criado pelo professor Thomas L. Saaty, em 1971, quando trabalhava no Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Foi desenvolvido em 1972, num estudo para a Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos sobre o racionamento de energia para indústrias (durante o mesmo ano, Saaty criou a escala que relaciona as opiniões aos números). Em 1973 a metodologia atinge a sua consolidação ao ser aplicada no estudo dos transportes do Sudão. Finalmente em 1981, Saaty publicou um livro intitulado “Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation”, consolidando seu método (Jordão & Pereira, 2006).

A motivação de Saaty para desenvolver a técnica AHP, teve origem nas dificuldades de comunicação que observou durante seu trabalho, onde reparou na existência de uma lacuna em relação à ausência de qualquer abordagem sistemática prática para determinação de prioridades na tomada de decisão (Santos F. F., 2008).

A metodologia AHP tornou-se bastante útil ao longo do tempo, uma vez que possui a capacidade de poder combinar duas abordagens, a objetividade e lógica da matemática com a subjetividade e instintividade da psicologia. Ou seja permite delinear um problema com dados quantitativos e com aspectos subjetivos, envolvendo ao mesmo tempo o grau de certeza ou incerteza envolvido no problema.

Desta forma o método fornece um quadro racional de estruturação de um problema de tomada de decisão, permitindo a representação e quantificação dos seus elementos, de maneira a relacioná-los com objetivos gerais e avaliar soluções alternativas. É ao mesmo tempo, uma ferramenta eficaz para lidar com decisões complexas, que ajuda dentro das possíveis alternativas, a definir prioridades e tomar a melhor decisão que se adequa às necessidades e compreensão do problema (Costa, 2012).

Segundo Bhushan & Rai (2004), a técnica AHP é uma abordagem sistemática desenvolvida para dar à tomada de decisão baseada na experiência, intuição e heurística, a estrutura de uma metodologia bem definida derivada de princípios matemáticos. Ela fornece uma abordagem formalizada para a criação de soluções para os problemas de tomada de decisão, onde a justificação económica de tempo investido no processo de tomada de decisão se reflete nas soluções de melhor qualidade dos problemas complexos apresentados.

### **3.3. Implementação do Método AHP**

A metodologia AHP fornece um meio de decomposição do problema numa hierarquia de subproblemas, de maneira a que possam mais facilmente ser compreendidos e subjetivamente avaliados. As avaliações subjetivas (dados, experiências, percepções e intuições) são convertidas em valores numéricos e processados para classificar cada alternativa em uma escala numérica (Bhushan & Rai, 2004).

Segundo Santos F. F. (2008), o método AHP baseia-se em três princípios, que sintetizam as etapas para a construção do modelo multicritério:

- **1º Princípio - Construção de hierarquias**

De acordo com Santos F. F. (2008), Saaty afirma que uma hierarquia “é uma abstração da estrutura de um sistema para estudar as interações funcionais de seus componentes e seus impactos no sistema total”. Ou seja, ao estruturar um problema em níveis hierárquicos consegue-se uma melhor compreensão e avaliação, do impacto relativamente à questão em causa. A estrutura chave de uma hierarquia é composta pelo objetivo global, pelo conjunto de critérios e subcritérios (requisitos para avaliação das alternativas) e finalmente pelo conjunto de alternativas viáveis (representam a possibilidade de decisão).

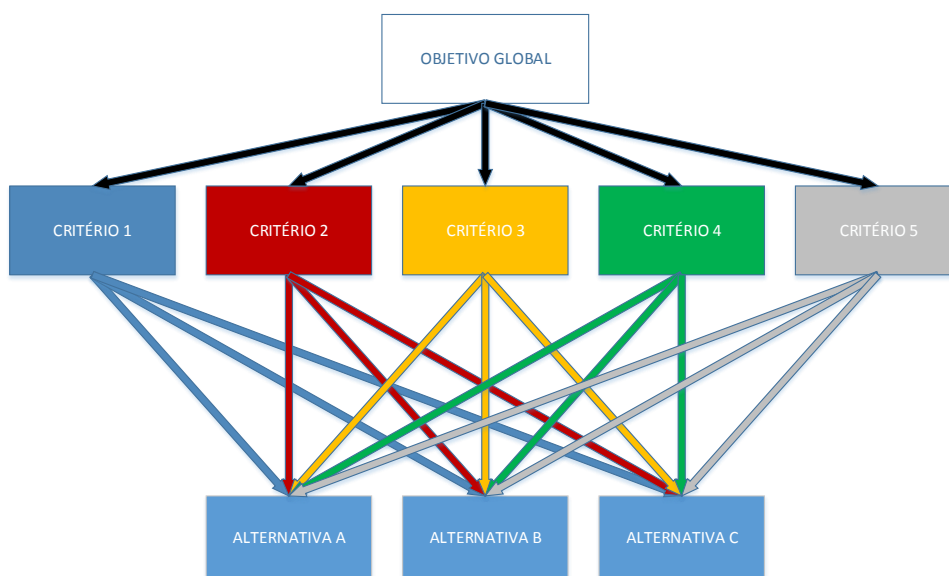


Figura 3 - Estrutura Hierárquica genérica de problemas de decisão Fonte: (Santos F. F., 2008)

- **2º Princípio – Definição de Prioridades e Comparações par-a-par**

Este princípio é baseado na capacidade do decisor entender a relação entre objetos e situações observadas, ao realizar comparações par-a-par de um determinado critério.

A priorização das alternativas obtém-se através de respostas a perguntas do género: “qual a importância do critério X em relação ao critério Y?” Este processo é conhecido por comparação par-a-par (*pairwise comparison*) e tem como objetivo estimar a escala em que os elementos de cada nível da hierarquia são medidos. As comparações par-a-par expressas em termos linguísticos/verbais, são convertidas em valores numéricos de acordo com a Escala Fundamental de Saaty, para comparação de critérios. A quantificação das comparações é feita usando uma escala de valores que varia de “1” a “9”, sendo assim possível medir o grau de importância do elemento de um determinado nível sobre os elementos de um nível inferior (Santos F. F., 2008).

Tabela 5 - Níveis de importância de comparações binárias Fonte: (Vilas Boas, 2006)

Nível de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Fraca importância	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
Recíprocos dos valores acima	Se o elemento j recebe um dos valores acima, quando comparado com o elemento i, então j tem o valor recíproco de i.	Uma designação razoável

Realizada a comparação entre pares de critérios e subcritérios, segue-se a construção de uma série de matrizes quadradas, onde o número na linha  $i$  e na coluna  $j$  dá a importância do critério  $C_i$  em relação à  $C_j$ , como se observa na matriz de preferências denotada por "A":

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Por conseguinte, o valor  $a_{ij}$  representa a importância relativa do critério da linha  $i$  ( $C_i$ ) face ao critério da coluna  $j$  ( $C_j$ ), onde  $\alpha$  é o valor da intensidade de importância. Como esta matriz é recíproca, apenas a metade triangular inferior necessita ser avaliada, já que a outra metade deriva desta e a diagonal principal assume valores iguais a 1. Por sua vez de acordo com Santos F. F. (2008) as mesmas regras são definidas para cada elemento  $a_{ij}$  da matriz:

- Se  $a_{ij} = \alpha$ , então  $a_{ji} = 1/\alpha$ ,  $\alpha \neq 0$ .
- Se  $C_i$  é julgado como de igual importância relativa a  $C_j$ , então  $a_{ij} = 1$ ,  $a_{ji} = 1$  e  $a_{ii} = 1$ , para todo  $i$ .

De seguida realiza-se a comparação par-a-par de cada alternativa dentro de cada critério do nível imediatamente superior, em que o método AHP usa a matriz de decisão “A” para calcular resultados parciais do conjunto “A” dentro de cada critério  $v_i(A_j)$ ,  $j= 1, \dots, n$ , denominado peso relativo da alternativa  $j$  em relação à alternativa  $i$ , ou vetor de prioridades. Estes resultados representam valores numéricos das atribuições verbais dadas pelo decisor a cada comparação de alternativas (Hein, et al.,2008). Os resultados são depois normalizados pela expressão:

$$\sum_{i=1}^n v_i(A_j) = 1$$

Onde  $n$  corresponde ao número de alternativas ou elementos comparados e cada parte desse somatório consiste em:

$$v_i(A_i) = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

Por conseguinte tem-se que o vetor de prioridades da alternativa  $i$  em relação ao critério  $C_k$  seja:

$$v_k(A_j) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i(A_j)}{n}$$

Depois de obtido o vetor de prioridades ou de impacto das alternativas sob cada critério  $C_k$ , continua-se com o nível dos critérios. Nessa situação, adota-se novamente a escala verbal para a classificação par-a-par dos critérios, que são normalizados pela fórmula:

$$w_i(C_j) = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^m C_{ij}}, j = 1, \dots, m$$

Onde  $m$  corresponde ao número de critérios do mesmo nível. Determina-se assim o vetor de prioridades:

$$w(C_i) = \frac{\sum_{i=1}^m w_i(C_j)}{m}, i = 1, \dots, m$$

Utilizando um processo de agregação, são gerados os valores finais das alternativas, ordenando-as por meio da seguinte função aditiva:

$$f(A_j) = \sum_{i=1}^m w(C_i) \times v_i(A_j), j = 1, \dots, m$$

E assim obtém-se a ordenação global por meio de uma função global de valor.

- **3º Princípio – Consistência Lógica**

A base do método AHP consiste na realização de comparações de critérios, e como tal é previsível que haja avaliações com alguma incongruência em determinados casos. De acordo com Santos F. F. (2008), para colmatar situações de inconsistência, Saaty propõe procedimentos que permitem avaliar a consistência das comparações, tais como:

- Cálculo do Índice de Consistência (*IC*), que avalia o grau de inconsistência da matriz de preferências, através da seguinte equação:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Onde *n* é a ordem da matriz e  $\lambda_{\max}$  é o maior autovalor da matriz de preferências.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i \cdot \frac{Aw_i}{w_i}$$

- Cálculo da Razão de Consistência (*RC*), que permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz de preferências, através da seguinte equação:

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Onde *IC* é o Índice de Consistência e *IR* é o Índice Aleatório (do inglês, Random Index).

O *IR* é o índice de consistência obtido para uma matriz aleatória recíproca, com elementos não-negativos, para vários tamanhos de matriz *n* e foram estimados por Saaty (com base num grande número de simulações) como demonstra a seguinte tabela:

Tabela 6 - Índices Aleatórios (*IR*) Fonte: (Santos F. F., 2008)

Ordem da Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Segundo Santos F. F. (2008), Saaty afirma que uma *RC* < 0,10 é aceitável. No entanto para valores de *RC* > 0,10 sugere-se uma revisão na matriz de comparações.

Esta medida de consistência pode ser usada para avaliar a coerência do decisor bem como a coerência de toda a hierarquia.

Na Figura 4 é apresentado um fluxograma, que ajuda a clarificar as etapas que caracterizam o funcionamento do método AHP.

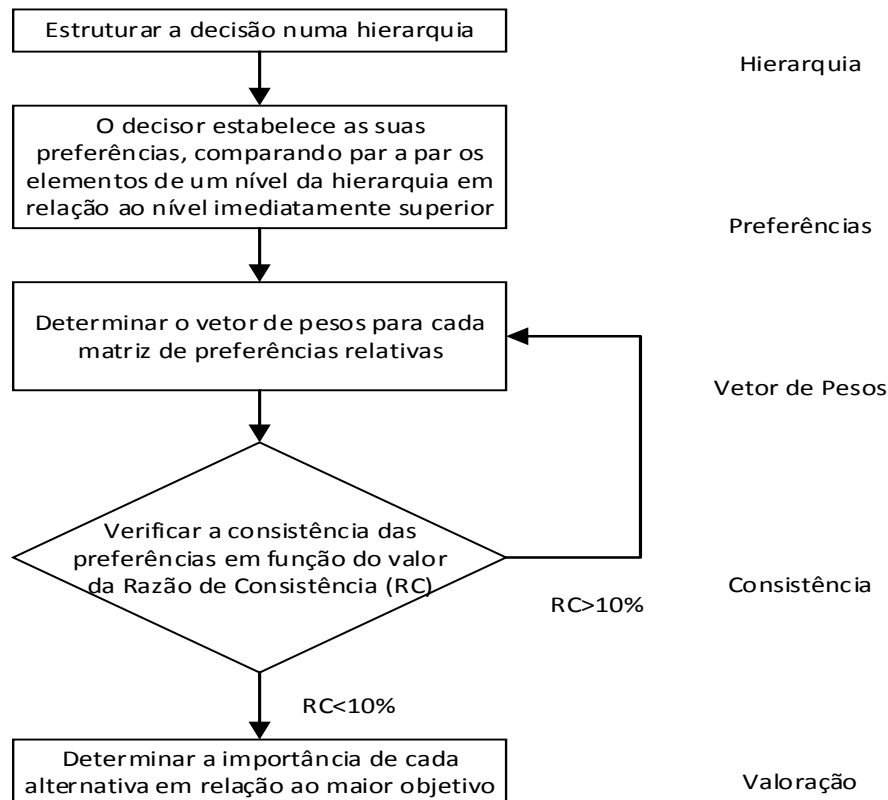


Figura 4 - Fluxograma geral do método AHP Fonte: (Vilas Boas, 2006)

### 3.4. Aplicações do AHP

O método AHP tem sido extensivamente usado em quase todas as aplicações relacionadas com a tomada de decisão multicritério nos últimos 20 anos. A vasta aplicabilidade deve-se à sua simplicidade e facilidade de utilização e também devido a uma grande flexibilidade. A ferramenta pode ser incluída com outras técnicas, como por exemplo, programação matemática, de maneira a considerar não só fatores qualitativos e quantitativos, mas também incluir algumas limitações de recursos do mundo real (Ho, 2008).

A aplicabilidade do AHP estende-se a diferentes áreas, tais como (Jordão & Pereira, 2006):

- Economia/ Problemas administrativos
  - Design

- Arquitetura
- Finanças
- Marketing
- Benchmarking
- Planeamento Estratégico
- Seleção de Portfólio
- Previsão
- Alocação de Recursos
- Análise de Benefício / Custo
- Análise de Investimentos
- Avaliação de Aquisições
  
- Questões Políticas
  - Resolução de Conflitos e Negociações
  - Jogos de Guerra
  
- Problemas Sociais
  - Educação
  - Medicina
  - Direito
  - Sector Público
  - Comportamento em Competição
  - Contratação e Avaliação de Desempenho de Profissionais
  
- Problemas Tecnológicos
  - Seleção de Mercado
  - Tecnologia de Transferência
  - Seleção de Fornecedores
  - Satisfação do Cliente
  - Qualidade Total

Segundo Vilas Boas (2006) é possível apresentar também alguns exemplos de aplicações práticas do AHP em instituições públicas e privadas, como por exemplo:

- Xerox - Decisões de pesquisa e desenvolvimento (P&D), implementação de tecnologia, seleção de design de engenharia e decisões de marketing.
- British Columbia Ferries (Canadá) - Seleção de produtos e suplementos.
- Edgewood Research Development and Engineering Center (Maryland - EUA) - Seleção de nova estrutura de gestão.

- NASA - Análise dos critérios segurança, desempenho fiabilidade e flexibilidade na avaliação das alternativas de células fotovoltaicas para reatores nucleares.
- Universidade de Santiago do Chile - Seleção de propostas de pesquisas ao governo, ordenando os projetos segundo critérios julgados importantes para o governo.
- Rockwell International - A divisão de sistemas espaciais usa o AHP num software de suporte à engenharia para avaliar critérios, funções de utilidade e análise de sensibilidade.
- General Motors - Avaliação de alternativas de design e gestão de performance para obter os melhores e mais custo-efetivos designs de automóveis.
- Pescadores de truta (Alasca) - Avaliação se os rios do Alasca são habitats apropriados a um tipo de truta (rainbow trout), considerando os fatores capacidade de reprodução e sobrevivência.
- Departamento de Polícia de Massachusetts - Estruturação de um modelo multicritérios para avaliação da performance dos polícias.
- Força Aérea dos Estados Unidos - Realocação de recursos da comunidade médica da Força Aérea americana.
- Autoridade Coreana de Telecomunicações - Priorização e alocação de recursos.
- Universidade do Havaí (Honolulu) - Medição da atratividade de projetos com relação a diferentes objetivos e cenários, considerando escassez e demanda da água.
- IBM Rochester (Minnesota - EUA) - Articulação dos requisitos necessários para se tornar a melhor empresa de computação do mundo.
- Escola de Medicina de Rochester - Determinação das preferências dos pacientes e dos médicos no diagnóstico de doenças gastrointestinais.
- Centro Médico do Exército de Tacoma (Washington - EUA) - Determinação do tipo do pessoal médico (equipas especializadas civis ou militares) a ativar e despachar no caso de desastres.
- Universidade de Anestesiologia de Pittsburgh - Decisões de compensação de mérito.
- 3M - Planeamento estratégico e decisões em grupo.
- Sociedade Americana para Teste e Materiais - Análise de decisão multicritérios dos investimentos relacionados a construções e sistemas de construção.

Além das aplicações supracitadas, o método AHP tem sido grande alvo de estudo para o desenvolvimento de vários artigos científicos, que tanto estudam o método isolado ou combinado com outras técnicas. Dentro dos vários artigos científicos, são apresentados os seguintes exemplos:

- Na área da medicina, Suner, et al., (2012) aplicaram o método AHP na determinação do modo mais apropriado para a construção de uma árvore de

decisão sequencial, usando o processo de hierarquia analítica para apoio à tomada de decisão no tratamento do cancro retal, usando vários critérios e tratamentos de pacientes específicos, tais como cirurgia, quimioterapia e radioterapia.

- Na área da agricultura, Karami (2006) aplicou o AHP como suporte à seleção de um método de irrigação adequado.
- Na área dos serviços Bruno, et al., (2012) realizaram abordagens baseadas na técnica AHP para avaliação de fornecedores, a nível de problemas e perspectivas.
- No sector energético Shen, et al., (2013) utilizaram a abordagem AHP para a criação de um quadro de desenvolvimento sustentável no contexto das indústrias mineiras.

### **3.5. Benefícios e Limitações do AHP**

Apesar do seu amplo e crescente espectro de aplicações, o AHP apresenta alguns problemas e limitações que devem ser levados em conta. Segundo Vilas Boas (2006), a maior vantagem do método AHP reside no facto de requerer que os elementos decisores realizem apenas comparações entre pares de alternativas e na capacidade que o método tem de medir o grau de inconsistência presente nas comparações par-a-par. Assim é possível assegurar que, as decisões usadas como base em avaliações e tomadas de decisão não estando completamente livres de subjetividades e incongruências, são mais concisas e concretas.

Por outro lado algumas limitações do método AHP, de acordo com Vilas Boas (2006), advêm das opiniões de especialistas em métodos multicritérios de análise de decisão (MCDM) manifestadas em intensos debates, que revelam a existência de dúvidas e até algumas críticas sobre a maneira como o método AHP funciona.

De seguida como forma de consolidar os benefícios e limitações do método AHP, são destacados os seus principais aspetos positivos e negativos. Dos aspetos positivos do método destacam-se os seguintes (Vilas Boas, 2006):

- O desenvolvimento dos sistemas estruturados hierarquicamente é preferível face aos construídos de uma forma geral, sem uma estrutura hierárquica;
- Pequenas alterações numa hierarquia bem estruturada têm efeitos pouco significativos, devido à sua estabilidade e flexibilidade;

- A capacidade de poder lidar com problemas que envolvam variáveis de caráter tanto quantitativo como qualitativo;
- A forma de agregação dessas variáveis exige que o elemento decisor participe ativamente no processo de estruturação e avaliação do problema, o que contribui para tornar os resultados propostos pelo modelo mais exequíveis;
- A estrutura hierárquica de um problema permite aos elementos decisores serem capazes de ordenar e comparar uma lista menor de itens dentro de seus próprios contextos;
- Sintetiza os resultados dentro de uma lista ordenada que permite a comparação de prioridades e importância relativa de cada fator;
- Tem a capacidade de fornecer pesos numéricos, para opções onde comparações subjetivas de alternativas quantitativas ou qualitativas constituem uma parte importante do processo de decisão.

Em sua antítese tem-se os aspectos negativos do método (Vilas Boas, 2006):

- Requer um procedimento para estruturar o questionário de perguntas e preferências;
- Grande número de comparações e alternativas eleva o trabalho computacional e a dificuldade de manter a consistência nos julgamentos;
- A escala de preferências de “1” a “9” é potencialmente inconsistente a nível interno;
- A ligação entre os pontos na escala de “1” a “9” e as descrições verbais correspondentes não têm fundamento teórico;
- A introdução de novas opções pode mudar a posição relativa de algumas das opções originais;
- O número de comparações requeridas pode ser muito alto;
- As prioridades dependem do método usado para derivá-las;
- Não são permitidas alternativas incomparáveis;

- Por não existir nenhuma base teórica para a formação das hierarquias, os elementos decisores, quando se deparam com situações idênticas de decisão, podem derivar hierarquias diferentes, obtendo então diferentes soluções;
- Existem falhas nos métodos para agregar os pesos individuais dentro dos pesos compostos;
- A ausência de fundamento da teoria estatística.

## 4. Secadores Industriais

### 4.1. Processo de Secagem

Segundo Mujumdar (2006) a secagem consiste num processo que “...converte uma matéria-prima sólida, semissólida ou líquida, num produto sólido por evaporação do líquido em fase de vapor através da aplicação de calor.”. Este processo é em grande parte responsável por desenvolver um papel importante na evolução da indústria em geral. Aliás muito antes da existência sequer do conceito de indústria, a secagem era um processo utilizado pelas antigas civilizações nos seus bens e produtos agrícolas para vários fins e das mais diversas maneiras, como por exemplo através do sol e do vento. Posteriormente avanços científicos levaram ao desenvolvimento de equipamentos que vieram beneficiar o processo de secagem, como é o caso dos rudimentares fornos da Revolução Industrial até aos modernos secadores por infravermelhos e micro-ondas. Hoje em dia o processo de secagem por troca de calor é o mais utilizado e pode apresentar grande simplicidade em alguns casos. Este método é mais simples e económico, quando comparado com sistemas de secagem por radiação e ao mesmo tempo permite uma secagem mais uniforme quando comparado com meios de secagem naturais (Resende, 2012).

O propósito da secagem tem cada vez maior peso na economia e na sociedade, dado que é uma operação omnipresente encontrada em quase todos os setores industriais, que vão desde a agricultura aos produtos farmacêuticos. É sem dúvida a operação mais antiga, a mais comum, mais diversificada e a maior consumidora de energia. No entanto é também uma das operações mais complexas e menos compreendidas por causa das dificuldades e deficiências nas descrições matemáticas dos fenómenos de transporte de calor, massa e força no meio sólido. A secagem é, portanto, uma mistura de ciência, tecnologia e arte (ou know-how baseado em observações experimentais extensas e experiência operacional) (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006).

Foi devido à crise energética e às necessidades relacionadas com o aumento da produtividade, a melhor qualidade do produto, novos processos e maior segurança e responsabilidade ambiental, que se desencadearam atividades de pesquisa e desenvolvimento de diversas tecnologias de secagem industrial. O aparecimento dos secadores industriais, tornou assim possível a produção de determinados produtos em escalas que antes seriam inalcançáveis quer por razões físicas ou económicas.

## **4.2. Secadores Industriais - Conceito**

Um secador industrial consiste num dispositivo inserido numa unidade industrial, em que entra material sólido, de forma contínua ou descontínua e um caudal de gases quentes com maior ou menor velocidade, que será responsável por secar de forma eficiente um volume considerável de diversas substâncias, produtos ou matérias-primas através do processo de secagem.

Os secadores industriais são conhecidos por desempenharem um papel essencial em inúmeras indústrias, das quais as que têm maior destaque são: a indústria farmacêutica, química, agrícola, alimentar, cerâmica, papelaria, polímeros e ainda as indústrias de processamento e transformação de madeira. A diversidade de indústrias em que estes equipamentos podem ser aplicados, permite obter em alguns casos o produto final ou a matéria-prima para posteriormente se obter o produto. Os produtos que beneficiam com a secagem industrial são principalmente: produtos minerais, químicos, lácteos, fertilizantes, grãos, papel, plásticos, entre outros. A secagem de várias matérias-primas com recurso a secadores industriais é essencial por permitir obter a qualidade desejada dos produtos, melhor conservação e armazenamento e ainda menores custos de transporte (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006).

## **4.3. Classificação e Seleção de Secadores Industriais**

Segundo Mujumdar (2013), “a seleção de um secador tem sido praticada mais como uma arte do que propriamente uma ciência, dependendo mais de experiências passadas e recomendações de fornecedores”. Esta afirmação do autor demonstra que a seleção do secador adequado para a secagem de um determinado produto, é um processo difícil e complexo, que não é totalmente científico, envolvendo o julgamento subjetivo e um empirismo considerável. Precisa de ter em conta as constantes exigências da produção, dos requisitos de qualidade, dos custos energéticos, das normas ambientais, entre outros (Albright, 2008).

Os especialistas recomendam que a seleção seja feita por um engenheiro perito na matéria, ou através de um sistema que entre em conta com os equipamentos disponíveis no mercado e os critérios principais no processo de seleção, bem como os prós e contras associados a cada tipo (Alonso, Cornejo, Fabbro, Park, & Park, 2007). Desta forma é possível obter várias alternativas antes de recorrer aos fornecedores deste tipo de equipamentos, que não são necessariamente especializados e cuja oferta normalmente é relativa aos secadores que comercializam.

O emprego destas recomendações é tempo e esforço bem gasto, pois ao contrário do que se poderia pensar, os principais custos associados a um secador, consistem na sua operação (devido principalmente ao intenso consumo de energia), ao invés do investimento inicial (caso dos secadores convencionais) (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006). Como tal, é importante referir que o custo de uma seleção incorreta de um secador pode ter um impacto a longo prazo na saúde económica de uma unidade industrial, visto que a vida útil deste equipamento é normalmente de 25 a 50 anos (Mujumdar, Jangam, & Lee, 2013).

De acordo com uma pesquisa recente realizada pela SPIN (Solids Processing Industrial Network, Reino Unido, fundada por 14 grandes empresas de produtos químicos com sede na Europa) a seleção de secadores é um dos principais problemas enfrentados por todas as empresas. Mais de 90% das empresas cometeram erros na seleção dos seus novos secadores, onde algumas das razões apontadas para o sucedido foram: fabrico de novos produtos com diferentes características, aumento da capacidade de produção e novos requisitos de segurança, bem como normas de impacto ambiental (Mujumdar A. S., ME5202 Industrial Transport Process, 2011).

Outra particularidade que se deve ter em conta no processo de seleção de um secador, é que vários tipos de secador podem ser igualmente técnica e economicamente viáveis para uma determinada aplicação, pelo que uma avaliação cuidadosa sobre os requisitos que afetam a escolha do secador irá ajudar a diminuir o número de opções. Para de alguma forma atenuar a complexidade à volta deste processo de seleção, Baker apresentou uma abordagem estrutural para a seleção de um secador, que é iterativa e inclui os seguintes passos (Albright, 2008):

- Listar todas as especificações-chave do processo;
- Realizar uma seleção preliminar;
- Realizar testes de bancada, incluindo testes de qualidade;
- Fazer uma avaliação económica das alternativas;
- Realizar ensaios em escala;
- Escolher os tipos de secadores mais adequados.

Nos casos em que a seleção é baseada por exemplo, na experiência dos responsáveis do projeto, em vez de uma abordagem técnica, irão existir algumas limitações. Ou seja, se a escolha realizada anteriormente satisfazia todos os requisitos mas não era a ideal, como consequência a nova escolha também não será a mais eficiente. Outras limitações têm a ver com o facto de logo à partida não serem consideradas novas técnicas de secagem e ser assumido implicitamente que a escolha do antigo secador realizou-se de uma forma lógica, o que muitas vezes não é o caso.

Antes de se prosseguir para o processo de seleção de um secador, é necessário uma breve abordagem sobre os numerosos sistemas utilizados para classificar os secadores. Atualmente são citados na literatura da especialidade, mais de 400 tipos de secadores, embora apenas 100 são normalmente postos em prática na indústria (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006).

Perante uma vasta gama de secadores, foram desenvolvidos diversos critérios de classificação de secadores. A Tabela 7, mostra como são classificados os secadores de acordo com alguns dos critérios de maior destaque na matéria.

*Tabela 7 - Critérios para a classificação de secadores Fonte: (Alonso, Cornejo, Fabbro, Park, & Park, 2007)*

<b>Critério para a classificação</b>	<b>Exemplo do tipo de secador</b>
Pressão utilizada no secador	Atmosférica ou vácuo
Modo de operação	Contínuos ou Descontínuos (Carga)
Método de permuta de calor	Convecção, condução, radiação, dielétrico e sublimação
Tipo de agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquido aquecido e gases rejeitados
Direção do fluxo de calor e sólidos	Concorrente, contracorrente e fluxo cruzado
Método do fluxo do agente de secagem	Livre ou forçado
Método do carregamento de material	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da humidade
Forma do material	Líquido, granular, pó, pasta, folha, camadas finas, lama
Tipo do fluxo do material (condição hidrodinâmica)	Regime estacionário, transiente ou disperso
Escala de operação	De 10 kg/h até 100 Ton/h
Construção do secador	Bandeja, túnel, esteira, tambor, rotativo, leito fluidizado e outros

O modo de classificação de secadores, acima demonstrado, é de certa forma insuficiente na medida em que existem tipos de secadores que se subdividem em classes de acordo com critérios adicionais. Ao mesmo tempo esta classificação não inclui novas tecnologias de secagem que são aplicadas em situações muito específicas. Como tal é necessário estar consciente da grande variedade de secadores disponíveis no mercado, bem como as suas vantagens e limitações especiais.

Outra forma de classificar os secadores poderá ser através do seu modo de operação: secadores descontínuos (carga) ou secadores contínuos. O diagrama da Figura 5 é exemplo deste modo de classificação de secadores, de onde se pode ter uma noção da variedade e aplicabilidade de cada um deles.

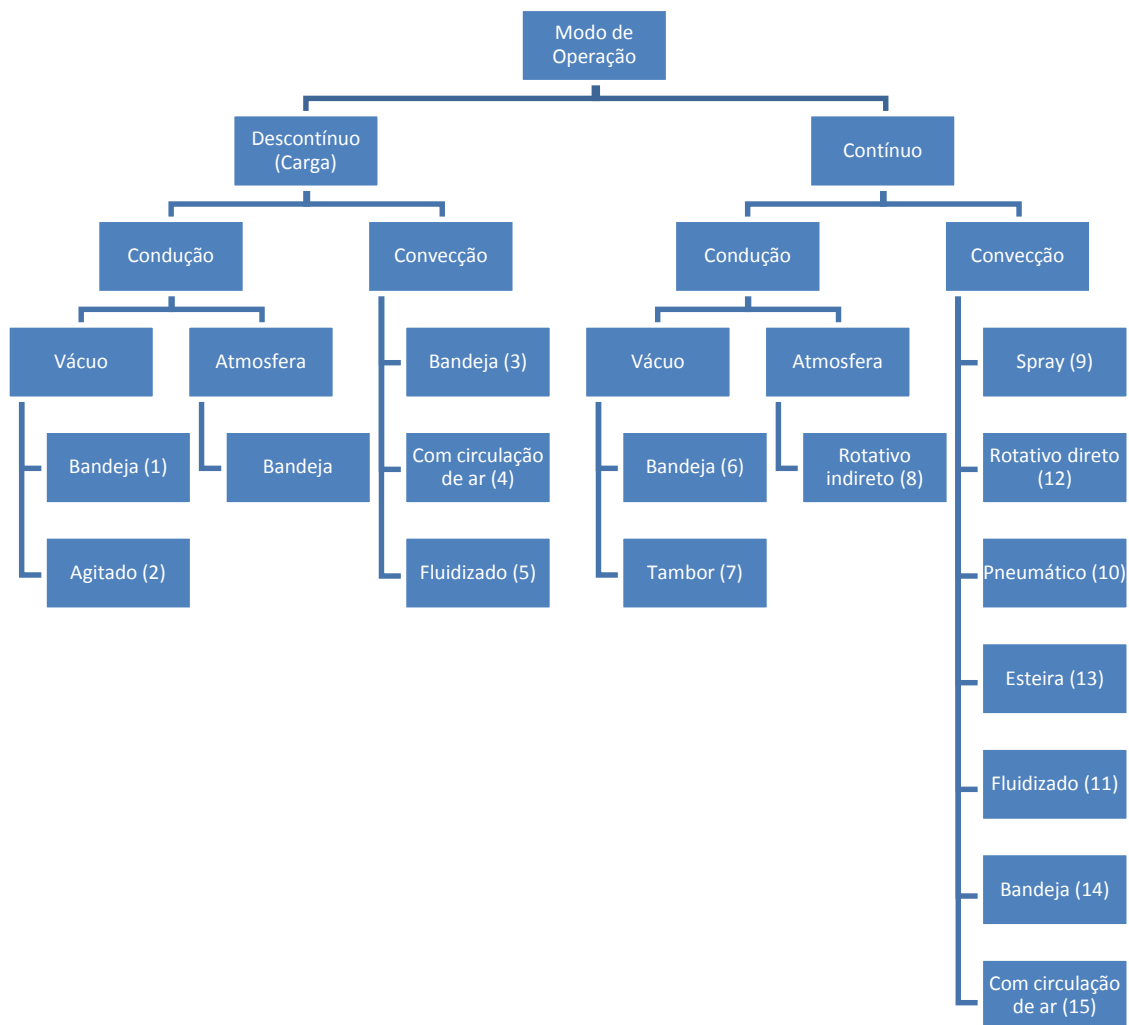


Figura 5 - Classificação de secadores segundo o modo de operação. Fonte: (Alonso, Cornejo, Fabbro, Park, & Park, 2007)

A seguir, encontram-se discriminados os materiais específicos para cada secador de acordo com a classificação anterior (Alonso, Cornejo, Fabbro, Park, & Park, 2007):

1. Pastas, pré-moldados, granulares, fibrosos e folhas;
2. Líquidos, lama, pastas e granulares;
3. Pastas, pré-moldado, granulares, fibrosos e folhas;
4. Pré-moldado, granulares e fibrosos;
5. Pré-moldado, granulares e fibrosos;
6. Lama e pastas;
7. Líquidos, lama, pastas e folhas;
8. Granulares e fibrosos;
9. Líquidos, lama e pastas;
10. Pastas, pré-moldado, granulares e fibrosos;
11. Pastas, pré-moldado, dura, granulares e fibrosos;
12. Granulares e fibrosos;

13. Pastas, pré-moldado, folhas;
14. Pastas, pré-moldado, granulares, fibrosos e folhas;
15. Pré-moldado, granulares e fibrosos.

Além dos métodos de classificação apresentados, existem outras formas de classificar os tipos de secadores industriais, como por exemplo: a classificação baseada na forma física da matéria-prima, na escala de produção, no modo de aquecimento, projetos especiais (produtos perigosos, inflamáveis, corrosivos), entre outros.

Tendo em conta as diversas opções de tipos de secador que se pode selecionar para a maioria dos produtos, a escolha do secador que melhor se adequa a cada situação (projeto) é uma tarefa desafiante como já foi referido anteriormente. Para se conseguir escolher o secador apropriado, é necessário portanto, reunir a informação que responda aos seguintes requisitos mínimos (Mujumdar A. S., ME5202 Industrial Transport Process, 2011):

- Modo de produção de matéria-prima (carga / contínuo);
- Propriedades físicas, químicas e bioquímicas da matéria por secar, bem como especificações dos produtos desejados;
- Variabilidade esperada nas características de alimentação;
- Operações de transformação a montante e a jusante;
- O teor de humidade da matéria e do produto;
- Cinética de secagem;
- Os parâmetros de qualidade (física, química, bioquímica);
- Aspectos de segurança, por exemplo, risco de incêndio e explosão, a toxicidade;
- Valor do produto;
- Necessidade de controlo automático;
- Propriedades toxicológicas do produto;
- Relação de abertura de cama, flexibilidade nos requisitos de capacidade;
- Tipo e custo de combustível, custo de eletricidade;
- Os regulamentos ambientais;
- Espaço na unidade industrial.

Dentro dos requisitos apresentados, os parâmetros da qualidade do produto são os que requerem maior atenção, pois nem sempre permitem optar pela solução mais barata, baseando a escolha apenas em considerações de transferência de calor e massa. A qualidade do produto desejada tem uma grande influência no processo de seleção, como por exemplo no caso de produtos de grande valor, tais como: produtos farmacêuticos, produtos alimentares e materiais complexos.

#### **4.4. Secadores Rotativos**

Após uma introdução sobre os secadores industriais de uma forma geral, inicia-se agora um percurso que passa pela demonstração de uma classe específica de secadores, como é o caso dos secadores rotativos. Dentro da panóplia de secadores anteriormente referidos, foi selecionado o secador rotativo indireto de tubos de vapor por ser aquele que tem milhares de aplicações na indústria desde a secagem e processamento de produtos químicos orgânicos e inorgânicos e outros materiais sólidos (Louisville Dryer Company, 2014).

Os secadores rotativos são conhecidos como o tipo de secador contínuo, mais antigo e de maior volume, que é mais usado na indústria e ao mesmo tempo aquele que mais evoluiu com adaptações tecnológicas face a qualquer outro tipo de secador. São conhecidos por permitirem um funcionamento contínuo e integrado sem necessitar de qualquer operação humana durante o seu funcionamento. Destaca-se também devido à sua simplicidade, baixo custo de operação e versatilidade (variabilidade em matéria-prima) bem como aptidão para lidar com materiais pesados (Traub, 2002).

Estes equipamentos são muito utilizados a nível mundial pelas indústrias, não só para efeitos de secagem mas também para efeitos de calcinação, mistura, granulação, arrefecimento e aquecimento. Alguns dos materiais secos através deste método são produtos farmacêuticos, produtos químicos orgânicos e inorgânicos, resíduos urbanos, fertilizantes, concentrados minerais, cimento, areia, milho e açúcar, sendo especialmente recomendado para o processamento de materiais facilmente aderentes (Resende, 2012).

#### **4.5. Constituição do Secador Rotativo**

Um secador rotativo é constituído por um tambor cilíndrico rotativo de aço carbono ou inoxidável, disposto de forma horizontal ou ligeiramente inclinada (1 a 4 graus), onde circula o caudal de material sólido e o caudal de gases quentes. O tambor é montado com grandes anéis de aço e suportado por conjuntos de rolamentos de rolos. Como o tambor expande com a temperatura de operação, é importante que apenas a extremidade de entrada tenha o deslocamento axial (direção longitudinal) condicionado (Traub, 2002). No interior do tambor cilíndrico encontram-se suspensores que elevam o material até ao topo do secador, sendo depois lançado e entrando em contacto com o caudal de gases quentes. Por outro lado, no exterior encontram-se martelos e batentes para diminuir a acumulação de produtos nas

paredes internas do tambor. A Figura 6 é um exemplar bastante elucidativo de como é constituído internamente um secador rotativo.

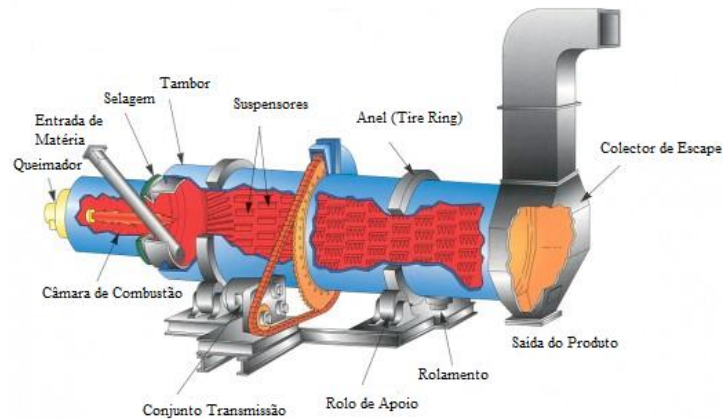


Figura 6 - Constituição de um Secador Rotativo Direto Fonte: (Followell, 2012)

No que diz respeito às extremidades do secador, podem ser vedadas com uma variedade de opções de selagem, de maneira a cumprir os requisitos do material. O movimento rotativo é obtido através de um acionamento direto (roda dentada e cremalheira) ou por corrente, que exigem uma coroa dentada sobre o tambor. O secador pode também ser configurado com um sistema de gases de escape, para onde os gases vão para um sistema de despoejamento, de maneira a que os mesmos sejam limpos e as substâncias perigosas sejam removidas antes de irem para a atmosfera (Followell, 2012).

#### 4.5.1. Modo de Operação do Secador Rotativo

O modo de funcionamento do secador rotativo é iniciado com a entrada da matéria-prima na extremidade do tambor. Por sua vez, no interior do tambor as correntes de ar quente e material sólido escoam na mesma direção, ou em sentidos opostos (concorrente ou contracorrente). Aqui o material sólido presente no interior do tambor (grãos e partículas sólidas) está em contacto com suspensores dispostos axialmente (com dimensões e geometrias diversas) e que são responsáveis pela ascensão e queda do material ao longo do tambor. Durante a fase de queda, o material sólido contacta com a corrente de ar quente sofrendo deste modo secagem e aquecimento por convecção. O ciclo de ascensão e queda proporciona um elevado grau de mistura das partículas, uma elevada taxa de transferência de calor e de massa e uma boa uniformização. Porém este fenómeno limita a adequação do secador apenas para partículas que não sofrem desintegração (Resende, 2012).

## 4.5.2. Tipos de Secadores Rotativos

Os secadores rotativos são classificados como sendo: do tipo direto, indireto, indireto-direto e especiais. Esta classificação baseia-se no método de transferência de calor, que pode ser direta (no caso do calor ser adicionado ou removido a partir dos sólidos por troca direta entre o gás e os sólidos), ou indireta (quando o meio de aquecimento é separado do contacto com os sólidos por uma parede ou tubo metálico) (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006).

A geometria dos secadores rotativos pode apresentar diversas variantes, conforme a sua classificação. Estas variações são utilizadas de acordo com o material sólido a secar, sendo apresentadas algumas em seguida (Resende, 2012):

- a) Secador rotativo contacto direto
- b) Secador rotativo indireto tubos de vapor
- c) Secador rotativo direto Roto-Louvre
- d) Forno rotativo direto

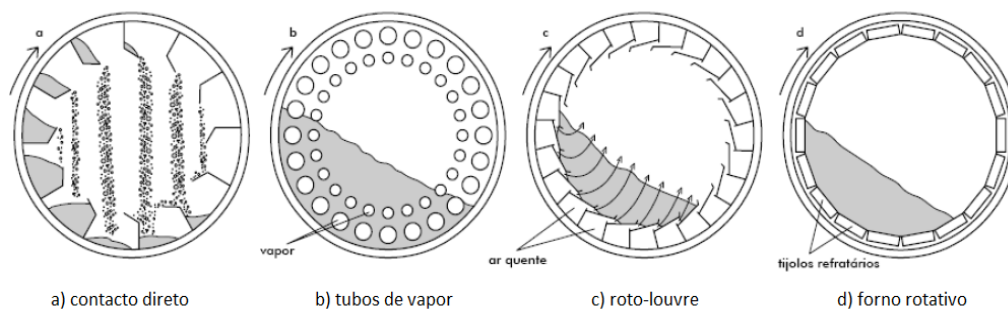


Figura 7 - Tipos de Secadores Rotativos Fonte: (Resende, 2012)

De forma a não tornar este capítulo muito extenso, será apenas abordado em detalhe o secador rotativo indireto de tubos de vapor, uma vez que será objeto de estudo no presente trabalho.

## 4.5.3. Secador Rotativo Indireto de Tubos de Vapor

O secador de tubos de vapor é uma variante do secador rotativo distinguindo-se dos restantes por ser um secador rotativo de contacto do tipo indireto, com vários tubos de vapor aquecido dispostos simetricamente no interior do tambor (em uma, duas ou três filas concêntricas). O tambor e os tubos funcionam como um permutador de calor rotativo, que de uma forma muito eficiente, utiliza o calor latente do vapor para transferir energia para o material que está a ser processado, para evaporar o líquido (Louisville Dryer Company, 2014). O material sólido cai suavemente em torno dos tubos, que rodam com o tambor, ao contrário das forças de atrito exigidas por

outros tipos de secadores. Consequentemente este tipo de secador tem uma vida útil maior do que a maioria dos secadores, requerendo pouca manutenção (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006). A Figura 8 representa a vista em corte de um secador de tubos de vapor onde é possível ter uma noção de como é o seu interior e como é feita a disposição dos tubos de vapor.

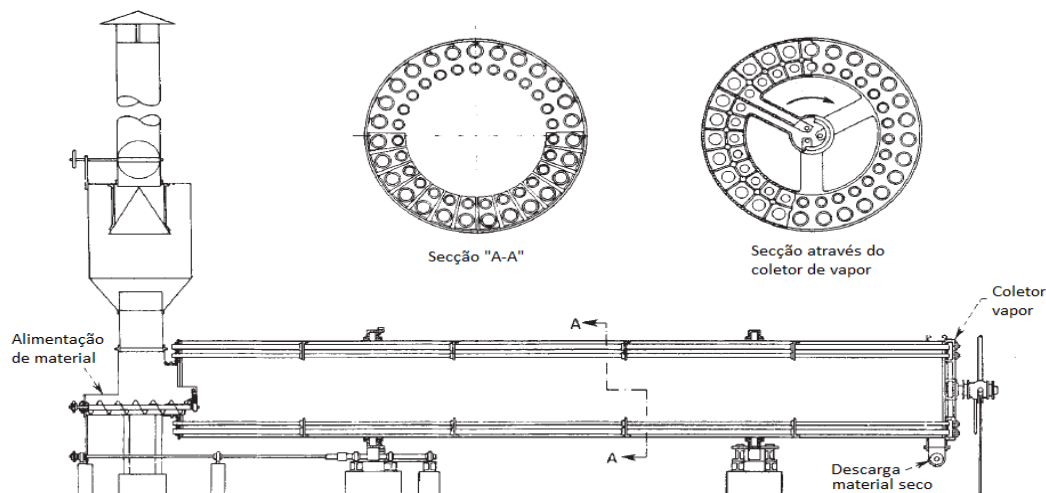


Figura 8 - Esquema de um Secador de Tubos de Vapor em corte Fonte: (Resende, 2012)

A aplicação deste tipo de secador, é feita na secagem ou no aquecimento contínuo de granulados ou sólidos em pó, que não podem ser expostos a gases atmosféricos ou de combustão, como é o caso de produtos petroquímicos. Dado que o secador gira a uma velocidade mais lenta e opera a uma temperatura mais baixa que os outros secadores gerando um aquecimento muito uniforme das partículas, tem especial aplicação em produtos orgânicos que tendem a ser sensíveis a temperaturas mais elevadas (Louisville Dryer Company, 2014).

O funcionamento do secador de tubos de vapor, começa com a alimentação da matéria-prima, através de um transportador de parafuso ou helicoidal. A entrada do material vai criar na extremidade de descarga do secador uma camada que cobre todas as filas de tubos com o produto, maximizando assim a área de transferência de calor de contacto entre o produto e os tubos de vapor, secando assim o material processado. Como o material do processo entra em contacto com o exterior dos tubos, o vapor no interior é condensado. Como tal, na extremidade de descarga do secador está montado um coletor de distribuição de vapor (Figura 9), que vai distribuir vapor para cada um dos tubos e ao mesmo tempo recolhe o condensado formado à medida que o vapor transfere o seu calor latente para o material a ser processado. Estas duas ações de entrega e recolha são realizadas com o auxílio de uma junta rotativa. Por sua vez os gases residuais não condensáveis deixados no interior dos tubos de vapor, são ventilados através de uma ligação flexível, que está ligada a um sistema de tubagens de respiro montado na extremidade de alimentação do secador. Este sistema tem válvulas de respiro termostáticas que permitem que os gases não-condensáveis mais

frios sejam eficientemente ventilados à medida que se acumulam, enquanto que o vapor reside no interior dos tubos. Em cada extremidade do secador existe um sistema de selagem que impede que o ar ambiente entre em contacto com o produto no interior do secador (Figura 10). São utilizadas várias técnicas de selagem dependendo dos parâmetros do processo, desde simples cintos de tecido de kevlar, às mais complexas como, empanques maquinados ou de purga de gás inerte (Louisville Dryer Company, 2014).

Uma característica importante no modo de funcionamento do secador de tubos de vapor reside na sua eficiência térmica, que se situa na gama dos 70-90%, quando bem isolado. Porém este valor de eficiência não entra em conta com a eficiência da caldeira, pelo que não pode ser comparado diretamente com os secadores de contacto direto (Mujumdar A. S., Handbook of Industrial Drying, 2006). Existe no entanto outro elemento que permite a comparação do secador de tubos de vapor com um secador de contacto direto, que é o fluxo de gases de escape. Uma vez que o secador de tubos de vapor utiliza o calor latente do vapor para acionar o processo de secagem, apenas uma pequena quantidade de ar de varrimento é necessária para remover o vapor de água evaporado do produto gerado no processo de secagem. Isto reduz significativamente o fluxo dos gases de escape, aproximadamente em cerca de 30% face à quantidade de gases de escape necessária para um secador de contacto directo para os mesmos parâmetros do processo (Louisville Dryer Company, 2014).

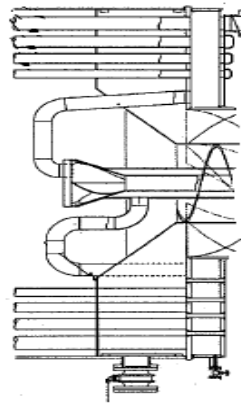


Figura 9 - Coletor de Distribuição de Vapor de um Secador de Tubos de Vapor (vista em corte) Fonte: (Tsukishima Kikai Co. Ltd, 2014)

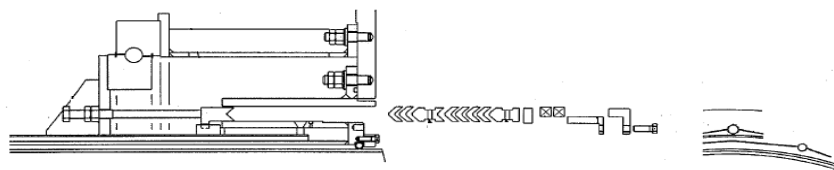


Figura 10 - Sistema de selagem de um Secador de Tubos de Vapor (vista em corte) Fonte: (Tsukishima Kikai Co. Ltd, 2014)

Após a apresentação dos conteúdos teóricos que servem de suporte a esta dissertação, dá-se agora continuação enveredando pela aplicação prática da ferramenta FMEA e o método AHP aplicados a um Secador Industrial.

## 5. Caso Prático

### 5.1 Enquadramento

O caso prático em estudo consiste num secador de tubos de vapor do fabricante Tsukishima Kikai Co Ltd (TSK), mais precisamente o modelo TSK S-CD (secador rotativo de contacto indireto, do tipo fechado e com descarga central) que pode ser visto na Figura 11.

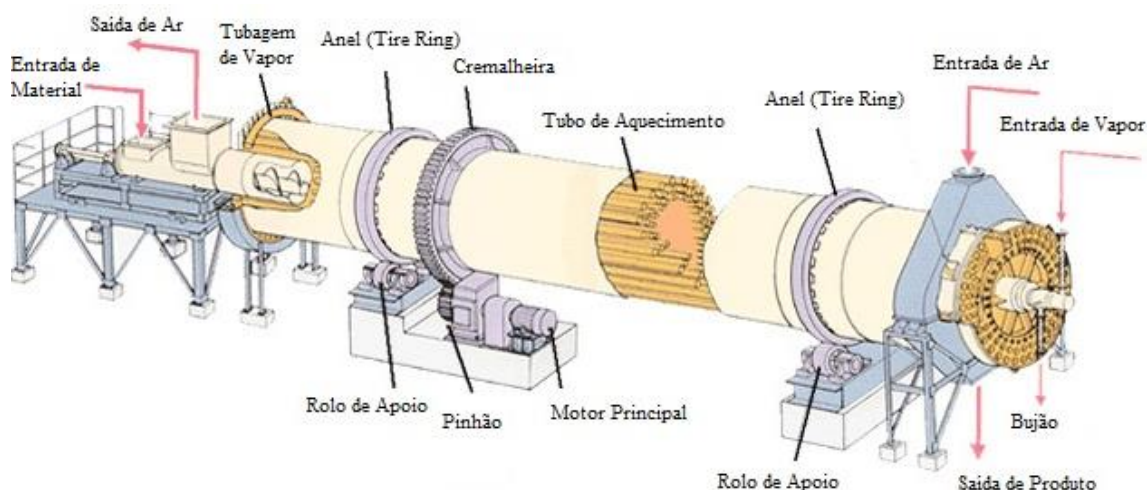


Figura 11 - Esquema de Secador Rotativo de Tubos de Vapor Fonte: (Tsukishima Kikai Co. Ltd, 2014)

Este modelo específico é usado para a secagem de vários tipos de tipos de resinas, onde se inclui o polietileno, o ácido tereftálico, poliacetal, policarbonato, etc. O secador em causa é usado para a secagem de cristais de ácido tereftálico ou PTA (purified terephthalic acid) tendo sido especialmente concebido pelo fabricante para comportar as seguintes características:

- Acomodar qualquer variação do teor de humidade do produto (capacidade de secagem para teores de humidade muito baixos);
- Adaptar-se às condições de funcionamento do material;
- Proporcionar uma velocidade do gás adequada para reduzir o arrastamento de poeiras;
- Evitar a fuga de solventes explosivos e perigosos para a atmosfera;
- Processar grandes quantidades de material;
- Secagem de materiais difíceis de filtrar;
- Secagem de materiais com sensibilidades térmicas;
- Capacidade de operação contínua, estável e segura;
- Processamento de materiais que utilizam solventes.

A Tabela 8 apresenta em maior pormenor as especificações do secador em estudo.

Tabela 8 - Especificações do secador TSK-CD (M1-423)

Principais características	Modelo TSK S-CD (M1-423)
Modo de operação	Fechado
Modo de ventilação	Gás inerte (azoto, etc.)
Modo de descarga do produto	Por um parafuso, no centro do terminal de descarga
Materiais aplicáveis	Facilmente afetados pela exposição ao ar
Pressão interna do secador	4.90 mbar 49.03 mbar
Pressão do vapor	3 bar
Tipo de vedação	Vedantes fechados como empanques, juntas, etc.
Dimensões principais	3800 mm diâmetro X 20500 mm comprimento
Área de transferência de calor	1206 mm <sup>2</sup>
Velocidade de rotação	3,3 Rotações por minuto
Inclinação	2/100
Potência do motor principal	240 KW
Potência do motor transportador helicoidal	30 KW
Capacidade	88635 Kg/h

No âmbito deste trabalho será realizada uma avaliação de riscos ao secador industrial recorrendo à metodologia de análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA). O objetivo pretendido é obter uma informação clara de quais os modos de falha que requerem maior atenção para posteriormente se proceder à realização de ações de melhoria. Após a identificação dos modos de falha do secador que requerem ação imediata para diminuir o risco, o próximo passo consiste em escolher qual a melhor ação recomendada para diminuir o risco em cada modo de falha. Nesta situação particular o método AHP vai ser aplicado como técnica de tomada de decisão capaz de selecionar a melhor alternativa que cumpra todos os critérios impostos, ou seja irá selecionar a melhor ação recomendada para cada modo de falha com grau de risco elevado.

## 5.2. Desenvolvimento e Aplicação da FMEA

### 5.2.1. Diagrama de Blocos

De forma a organizar a informação relativamente ao objeto de estudo, foi definida a divisão do sistema em blocos funcionais, com o objetivo de melhorar a identificação das funções de cada componente. Assim, é feita a abordagem às funções de cada componente do bloco, de forma individual, referindo os modos de falha mais críticos, os quais merecem maior relevância na sua análise.

De acordo com o diagrama representado na Figura 12, foram considerados 4 blocos funcionais, que representam os sistemas de maior destaque no secador. Todos os componentes dos sistemas em causa mereceram bastante atenção, porque são essenciais para o funcionamento eficiente e estável do secador.

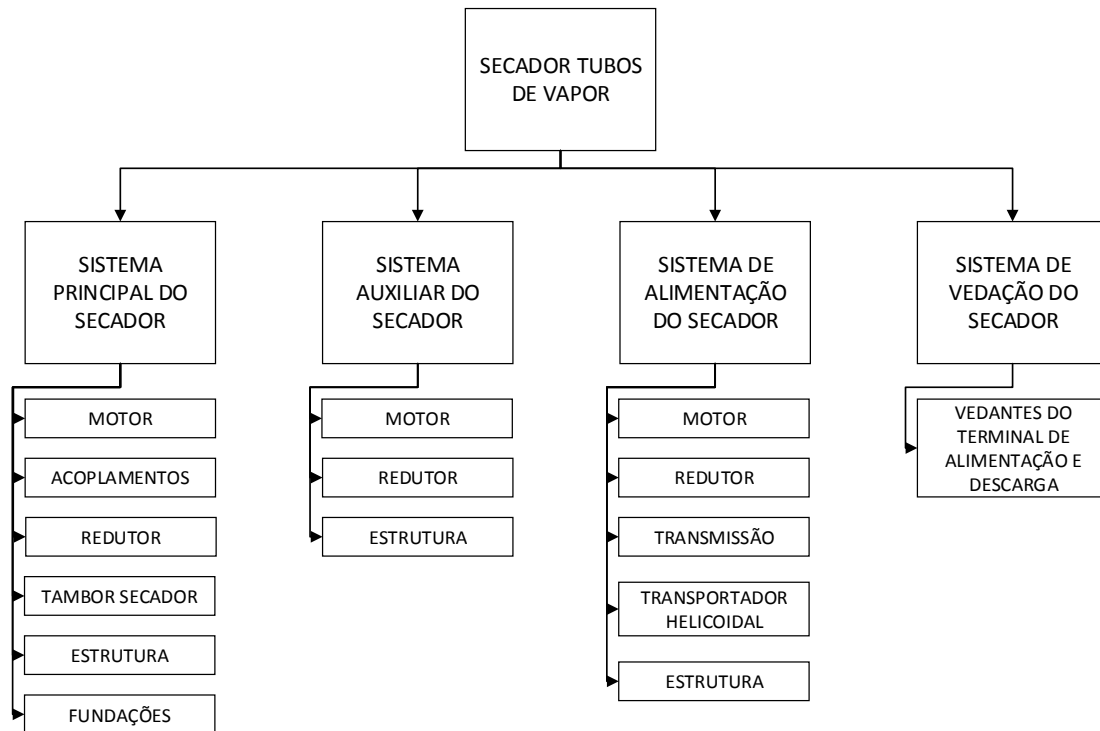


Figura 12 - Diagrama de blocos funcionais

Nota: Na tabela FMEA encontra-se uma breve descrição da função de cada subsistema do secador.

A análise de uma FMEA pode tornar-se bastante complexa, dependendo da extensão da sua abrangência, como tal é necessário definir fronteiras do sistema (Figura 13). Para simplificar, as ações de melhoria serão incidentes sobre os modos falhas mais problemáticos, sendo os menos problemáticos deixados para uma futura revisão da análise.

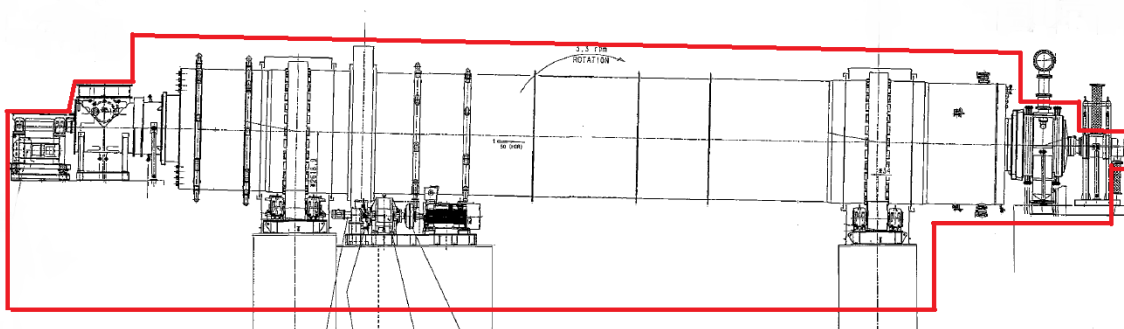


Figura 13 - Definição de fronteiras do sistema a ser analisado Fonte: Tsukishima Kikai Co. Ltd, 2014

## 5.2.2. Elaboração das Tabelas de Ocorrência, Detetabilidade, Severidade e Grau de Risco

Uma das grandes dificuldades no início da elaboração da FMEA consistiu na identificação dos modos falha potenciais, respetivas causas e efeitos. Simultaneamente surgiu outra dificuldade, que é a de como pontuar cada uma delas para o cálculo do risco.

Para a pontuação da coluna severidade dos efeitos de falha, recorreu-se ao brainstorming, visto não haver nenhum método específico para auxiliar esta tarefa. Os índices de ocorrência e deteção também foram definidos através brainstorming, contando apenas com recurso a dados técnicos e alguns planos de manutenção de componentes do secador, não sendo possível ter acesso a um histórico de avarias do mesmo.

Para classificar o índice de ocorrência dos modos de falha construiu-se a Tabela 9 representada em baixo, segundo o Manual de Referência FMEA (Moura, 2000) e tendo em conta as seguintes considerações:

- 1 Dia de produção do secador industrial = 24 horas
- 1 Mês de produção do secador industrial = 528 horas (22 dias X 24 horas)
- 1 Ano de produção do secador industrial = 5808 horas (11 meses X 22 dias X 24 horas) (Nota: tem-se em conta 1 mês de paragem num ano para realização de ações de manutenção e reparações profundas)
- Taxa de ocorrência = ocorrência de falha a dividir por horas funcionamento

*Tabela 9 - Tabela de índice de ocorrência aplicada ao caso de estudo*

Probabilidade de falha	Taxas de ocorrência em horas	Índice de ocorrência (O)
Muito alta: A falha é quase inevitável	$\leq 1$ em 528 (1 mês em funcionamento)	10
Alta: Falha frequente	1 em 1584 (3 meses em funcionamento)	8
Moderada: Falha ocasional	1 em 3168 (6 meses em funcionamento)	6
Baixa: Poucas falhas	1 em 5808 (1 ano em funcionamento)	4
Muito baixa: Falha isolada	1 em 11616 (2 anos em funcionamento)	2
Improvável: Falha é improvável	$\geq 1$ em 29040 (5 anos em funcionamento)	1

Por sua vez, a atribuição do índice de severidade neste caso de estudo, obtém-se determinando o grau de impacto dos efeitos dos modos de falha em cada

componente do sistema. Os efeitos são classificados nas seguintes categorias: Saúde e Segurança, Meio-ambiente, Custo de Não-Produção e Custo de Reparação. Após a atribuição dos valores para cada categoria, o índice de severidade é obtido escolhendo o maior valor dos valores atribuídos nas categorias para o modo de falha em causa. A Tabela 10 representada em baixo foi adaptada do trabalho de Herpich & Fogliatto (2013) e tendo em conta as seguintes considerações:

- O custo de não-produção (paragem) é visto nesta dissertação como uma estimativa tendo em conta a soma dos custos diretos e indiretos, ou seja o que se perde (custos) em não fornecer o produto ao cliente final;
- Para se obter o custo de não-produção por hora multiplica-se a produção de PTA por hora (80 Ton/h) pelo custo de produção de 1 tonelada de PTA (1108 €/Ton), obtendo o resultado de 88640 €/h ou aproximadamente 90000 €/h;
- O custo de reparação nesta dissertação entra em conta com a mão-de-obra especializada e peças/componentes a serem reparados ou substituídos;

*Tabela 10 - Índice de severidade aplicado ao caso de estudo*

Efeito	Saúde e Segurança	Meio-Ambiente	Custo de Não-Produção	Custo de Reparação	Índice de severidade (S)
Catastrófica	Mais que de 10 mortes	De grande magnitude e extensão, com danos irreversíveis	Impacto superior a 2 milhões de euros (paragem superior a 24 horas)	Custo maior que 100 mil euros	10
Crítica	De 1 a 10 mortes ou acidentes incapacitantes permanentes	De alta magnitude e de difícil reversão, com risco de danos irreversíveis	Impacto entre 720 mil euros e 1 milhão e 400 mil euros (paragem entre 8 e 16 horas)	Custo entre 10 mil e 50 mil euros	8
Alta	1 morte ou acidente incapacitante permanente	De magnitude considerável e de difícil reversão	Impacto entre 360 mil euros e 720 mil euros (paragem entre 4 e 8 horas)	Custo ente 5 mil e 10 mil euros	6
Moderada	1 acidente com perda de tempo ou incapacitante	De magnitude considerável, mas reversíveis com ações mitigadoras	Impacto entre 90 mil e 360 mil euros (paragem entre 1 e 4 horas)	Custo entre 500 e 5 mil euros	4
Baixa	1 acidente sem perda de tempo ou não incapacitante	De pequena magnitude e reversíveis com ações imediatas	Impactos até 90 mil euros (paragem ≤ 1 hora)	Custo menor que 500 euros	2
Sem Impacto	Sem danos pessoais	Sem danos ambientais	Sem impactos financeiros	Sem custo de reparação	1

No caso de classificação do índice de detecção dos modos de falha construiu-se a Tabela 11 representada em baixo, tendo como base o Manual de Referência FMEA (Moura, 2000). Para atribuição do índice de detecção dos modos de falha do objeto de estudo, foi considerado que a detetabilidade é vista como a capacidade de detetar o modo de falha logo após a sua ocorrência, ou seja a questão que se coloca é se após a ocorrência do modo de falha, a detetabilidade da sua causa é imediata, muito baixa ou algum nível intermédio.

Tabela 11 - Índice de detecção aplicado ao caso de estudo

Detetabilidade	Critério (probabilidade de detetar o modo de falha)	Índice de detecção (D)
Muito Baixa	As medidas de controlo têm uma probabilidade muito baixa de detetar a existência da falha	10
Baixa	As medidas de controlo têm uma probabilidade baixa de detetar a existência da falha	8
Moderada	As medidas de controlo têm uma probabilidade moderada de detetar a existência da falha	6
Alta	As medidas de controlo têm uma probabilidade alta de detetar a existência da falha	4
Muito alta	As medidas de controlo têm uma probabilidade muito alta de detetar a existência da falha	2
Imediata	É quase certo que as medidas de controlo irão detetar de imediato a existência da falha	1

Por último tem-se a classificação do grau de risco representado em baixo na Tabela 12, cujo objetivo é categorizar o NPR de modo a obter uma informação de quais os modos de falha que requerem maior atenção e a realização posterior de ações de melhoria de forma a diminuir o risco associado a cada uma das falhas.

Tabela 12 - Classificação do grau de risco aplicado ao caso de estudo

Grau de risco (NPR)		Grau de urgência das medidas
GR ≥ 96 *	Risco Elevado	Requer ação imediata para diminuir o risco (atuando em "O", "S" ou "D")
32 ≤ GR <96	Risco Moderado	Devem ser tomadas ações logo que possível para diminuir o risco
GR <32 **	Risco Baixo	Devem ser tomadas medidas de melhoria sem carácter de urgência

\* Considerou-se como limite inferior o NPR resultante do produto entre:  
6 (Ocorrência: Moderada) x 4 (Severidade: Catastrófica) x 4 (Detetabilidade: Moderada)

\*\* Considerou-se como limite superior o NPR resultante do produto entre:  
4 (Ocorrência: Baixa) x 4 (Severidade: Moderada) x 2 (Detetabilidade: Alta)

### **5.2.3. Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)**

Como já foi referido anteriormente uma das grandes dificuldades na elaboração da FMEA deste trabalho, consistiu na identificação dos modos falha potenciais dos vários sistemas que compõem o secador, bem como as suas respetivas causas e efeitos. A acrescentar também às dificuldades presentes, surge a complexidade da definição de fronteiras do objeto de estudo.

De seguida é apresentada a tabela FMEA que demonstra o resultado de um trabalho de brainstorming efetuado entre o pesquisador e os orientadores desta dissertação. O material que serviu como recurso para as suas decisões foi: dados técnicos dos componentes dos sistemas constituintes de um secador industrial, alguns planos de manutenção dos vários componentes e recomendações de serviço. É importante frisar que para a presente análise não foi possível ter acesso a um histórico de avarias do secador industrial, o que traria com certeza uma maior riqueza e consistência ao presente trabalho.

Tabela 13 - Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) (parte I)

APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423)															
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco	
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	MOTOR	Subsistema elétrico	Fornecer corrente elétrica	Motor não arranca	Interrupção do fornecimento corrente elétrica	6	1	1	2	1	2	2	24	Baixo	
					Cabos danificados devido a choques mecânicos	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo	
					Cabos queimados/derretidos devido a sobrecarga	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo	
					Avaria no arrancador	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo	
				Motor pára durante a operação	Sobrecarga mecânica	6	1	1	2	1	2	2	24	Baixo	
					Falta de uma ou mais fases	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo	
					Desequilíbrio de tensão	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo	
					Quedas de tensão	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo	
		Estator	Promover campo magnético	Avaria do estator	Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	2	2	2	1	12	Baixo	
					Enrolamentos com humidade	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo	
					Falhas de isolamento	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo	
					Arranques frequentes	4	1	1	2	1	2	2	16	Baixo	
					Pata coxa	4	1	1	2	2	2	6	48	Moderado	
		Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Avaria do rotor	Barras do rotor partidas	2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado	
					Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	2	2	2	1	12	Baixo	
					Excentricidade estática e dinâmica (falhas entreferro)	2	1	1	2	4	4	6	48	Moderado	
					Falhas de isolamento	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo	
					Pata coxa	4	1	1	2	2	2	6	48	Moderado	
				Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	2	1	1	4	2	4	2	16	Baixo	
			Rotor desequilibrado		2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado		
			Desalinhamento do veio		6	1	1	4	4	4	6	144	Elevado		
			Ajustes mecânicos incorretos		2	1	1	4	2	4	6	48	Moderado		
			Fratura do veio	Chumaceiras de rolamento defeituosas	1	1	1	4	2	4	6	24	Baixo		
				Flexão ou fadiga torsional proveniente do desalinhamento	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo		
				Sobrecarga durante a operação	2	1	1	4	4	4	10	80	Moderado		
				Rotor bloqueado	2	1	1	4	4	4	4	32	Moderado		
			Defeitos de fabrico	Danos provocados durante ação de manutenção	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado		
		Defeitos de fabrico		1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado			
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	ACOPLAMENTOS	Acoplamento hidráulico		Conversor de binário/Fornece um arranque suave e macio	Avaria no acoplamento	Sobreaquecimento	4	1	1	2	2	2	2	16	Baixo
						Deformação das lâminas	2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado
			Quebra do estator			2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado	
			Vedantes danificados/ressequidos			4	1	2	1	2	2	2	16	Baixo	
			Bujão-fusível derretido			4	4	2	2	2	4	1	16	Baixo	
			Fluido hidráulico insuficiente			4	1	1	2	2	2	1	8	Baixo	
			Acoplamento flexível de pinos			Transferir binário	Avaria no acoplamento	Desalinhamento do veio	4	1	1	2	2	2	6
Veios empenados, excentricidade excessiva	2	1		1	2			4	4	6	48	Moderado			
Vida útil limitada dos elastómeros	6	1		1	2			2	2	1	12	Baixo			
Vibrações torcionais	2	1		1	2			2	2	6	24	Baixo			
Binário elevado aplicado na chaveta	4	1		1	2			2	2	4	32	Moderado			

Tabela 14 - Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) (parte II)

APLICAÇÃO DA FMEA A UM SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423)																			
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco					
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação									
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	REDUTOR	Redutor	Fornecer binário/conversões de velocidade	Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	4	1	1	4	2	4	2	32	Moderado					
					Ajustes mecânicos incorretos	1	1	1	4	2	4	6	24	Baixo					
					Chumaceiras de rolamento defeituosas	1	1	1	4	2	4	6	24	Baixo					
					Lascamento de material nas engrenagens	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo					
				Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas	2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado					
					Lubrificação incorreta	4	1	1	4	4	4	2	32	Moderado					
					Corrosão por pites "pitting"	2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado					
					Lascagem de material "spalling"	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo					
					Sulcos e arranhões "scoring & scuffing"	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado					
					Deformação plástica por movimento de rolamento e escorregamento	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado					
					Deformação plástica por impacto nos dentes	2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado					
				Corrosão por ataque químico / água/ humidade / aditivos de extrema pressão (EP)	1	1	1	4	4	4	2	8	Baixo						
				Quebra de dentes nas engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo					
Sobrecarga durante a operação	2	1	1		4	4	4	6	48	Moderado									
Cargas de impacto repentinas	1	1	1		4	4	4	4	16	Baixo									
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Coroa dentada e pinhão	Fornecer momento ao tambor do secador	Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas	6	1	1	6	6	6	2	72	Moderado					
					Lubrificação incorreta	4	1	1	6	6	6	2	48	Moderado					
					Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	6	6	6	8	192	Elevado					
					Lascagem de material "spalling"	2	1	1	6	6	6	4	48	Moderado					
					Sulcos e arranhões "scoring & scuffing"	1	1	1	6	6	6	6	36	Moderado					
					Deformação plástica por movimento de rolamento e escorregamento	1	1	1	6	6	6	2	12	Baixo					
					Deformação plástica por impacto nos dentes	2	1	1	6	6	6	2	24	Baixo					
					Corrosão por ataque químico / água/ humidade / aditivos de extrema pressão (EP)	4	1	1	6	6	6	2	48	Moderado					
				Quebra de dentes nas engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão	1	1	1	6	6	6	6	36	Moderado					
					Sobrecarga durante a operação	2	1	1	6	6	6	6	72	Moderado					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Sistema de secagem	Secar o produto	Eficiência do processo de secagem anormal ou deficiente	A superfície externa do tambor não está isolada (suficientemente)	1	1	1	1	8	8	6	48	Moderado					
					Tubos de aquecimento (vapor) com ar	8	1	1	1	2	2	2	32	Moderado					
					Quantidade de vapor insuficiente	8	1	1	1	1	1	1	8	Baixo					
					Condensado de vapor não é descarregado corretamente	6	1	1	1	2	2	1	12	Baixo					
					Caudal de gás inerte muito baixo	6	1	1	1	1	1	1	6	Baixo					
					SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Tambor	Conter e agitar o produto a ser seco e gás inerte	Deterioração do tambor	Corrosão por pites "pitting"	1	1	1	10	8	10	6	60	Moderado
										Tensões nos tubos de aquecimento (vapor) devido a expansão térmica	1	1	1	10	6	10	8	80	Moderado
Tensões no tambor devido a expansão térmica repentina	1	1	1	10						8	10	8	80	Moderado					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Tubos de aquecimento (vapor)	Fornecer calor sob a forma de vapor ao secador	Rotura dos tubos	Tensões nos tubos de aquecimento (vapor) devido a expansão térmica	1	1	1	10	6	10	8	80	Moderado					
					Corrosão-erosão	2	1	1	10	6	10	6	120	Elevado					
					Suportes internos danificados (suportes de tubos e anéis de suporte)	2	1	1	10	6	10	2	40	Moderado					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Anel de rolamento (guiado e livre)	Fornecer superfície de rolamento	Desgaste do anel de rolamento	Corrosão sob tensão	1	1	1	10	6	10	6	60	Moderado					
					Lubrificação incorreta	6	1	1	8	8	8	1	48	Moderado					
					Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	8	8	8	6	192	Elevado					
					Desalinhamento vertical e horizontal	4	1	1	8	8	8	6	192	Elevado					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Anel de rolamento (guiado e livre)	Fornecer superfície de rolamento	Desgaste do anel de rolamento	Lubrificação insuficiente nos calços do anel de rolamento	2	1	1	8	8	8	2	32	Moderado					
					Adesão de poeiras na superfície	4	1	1	8	8	8	2	64	Moderado					

Tabela 15 - Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) (parte III)

APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423)																		
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco				
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação								
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Fratura do veio	Sobrecarga durante a operação	2	1	1	6	4	6	6	72	Moderado				
					Danos provocados durante ação de manutenção	1	1	1	6	4	6	6	36	Moderado				
					Corrosão por pites "pitting"	1	1	1	6	4	6	8	48	Moderado				
					Rolamentos gripados	2	1	1	6	4	6	4	48	Moderado				
				Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	2	1	1	4	4	4	2	16	Baixo				
					Desalinhamento do veio	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado				
					Ajustes mecânicos incorretos	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado				
					Chumaceiras de rolamento defeituosas	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo				
				Desgaste dos rolos	Lubrificação incorreta	6	1	1	4	4	4	1	24	Baixo				
					Desalinhamento dos veios (contato parcial entre os anéis de rolamento e rolos)	4	1	1	4	4	4	4	64	Moderado				
					Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado				
					Ajustes mecânicos incorretos (alinhamento)	2	1	1	4	4	4	4	32	Moderado				
					Rolamentos gripados	2	1	1	4	4	4	4	32	Moderado				
					Adesão de poeiras na superfície	4	1	1	4	4	4	2	32	Moderado				
				SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Junta rotativa	Fornecer vapor ao colector de distribuição de vapor e descarregar o condensado	Desgaste da superfície dos vedantes	Binário excessivo	1	1	1	2	2	2	6	12	Baixo
									Deterioração do revestimento superficial	2	1	1	1	2	2	4	16	Baixo
Presença de contaminantes	2	1	1						1	2	2	2	8	Baixo				
Operação a seco	8	1	1						1	2	2	1	16	Baixo				
Fratura dos vedantes	Corrosão sob tensão	4	1					1	4	2	4	6	96	Elevado				
	Ajustes mecânicos incorretos	2	1					1	4	2	4	4	32	Moderado				
	Temperatura elevada	4	1					1	4	2	4	4	64	Moderado				
Falha das juntas	Temperatura elevada	4	1					1	4	2	4	4	64	Moderado				
	Montagem instalação incorreta	2	1					1	4	2	4	2	16	Baixo				
Degradação das molas	Corrosão uniforme	2	1					1	4	2	4	1	8	Baixo				
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	ESTRUTURA	Estrutura metálica	Assegurar a rigidez do equipamento					Estrutura deformada	Fundações desniveladas	1	4	1	1	8	8	10	80	Moderado
									Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	4	1	1	8	8	1	8	Baixo
				Aperto desigual dos parafusos	2	4	1		1	8	8	2	32	Moderado				
				Colapso da estrutura	Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	8	4	10	10	10	1	10	Baixo				
					Corrosão uniforme	2	8	4	10	10	10	2	40	Moderado				
				Estrutura solta (com equipamento)	Porcas dos parafusos soltas	2	4	1	1	2	4	1	8	Baixo				
					Parafusos corroídos	1	4	1	1	2	4	1	4	Baixo				
					Vibração excessiva da máquina	2	4	1	1	2	4	4	32	Moderado				
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	FUNDAÇÕES	Fundações	Suportam a estrutura	Colapso das fundações	Terreno inadequado	1	8	4	10	8	10	8	80	Moderado				
					Subdimensionamento das fundações	1	8	4	10	8	10	10	100	Elevado				
				Ancoragem das fundações solta	Corrosão uniforme	1	6	4	10	8	10	8	80	Moderado				
					Degradação do betão	1	6	4	10	8	10	8	80	Moderado				

Tabela 16 - Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) (parte IV)

APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423)																		
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco				
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação								
SISTEMA AUXILIAR DO SECADOR	MOTOR	Subsistema elétrico	Fornecer corrente elétrica	Motor não arranca	Interrupção do fornecimento corrente elétrica	1	1	1	1	1	1	2	2	Baixo				
					Cabos danificados devido a choques mecânicos	1	1	1	1	2	2	4	8	Baixo				
					Cabos queimados/derretidos devido a sobrecarga	1	1	1	1	4	4	4	16	Baixo				
					Avaria no arrancador	1	1	1	2	2	2	4	8	Baixo				
				Motor pára durante a operação	Sobrecarga mecânica	2	1	1	2	1	2	2	2	8	Baixo			
					Falta de uma ou mais fases	1	1	1	2	2	2	4	8	Baixo				
					Desequilíbrio de tensão	1	1	1	2	1	2	2	4	Baixo				
					Quedas de tensão	1	1	1	2	1	2	2	4	Baixo				
		Estator	Promover campo magnético	Avaria do estator	Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	1	2	2	1	12	Baixo				
					Enrolamentos com humidade	4	1	1	1	2	2	2	16	Baixo				
					Falhas de isolamento	4	1	1	1	2	2	2	16	Baixo				
					Arranques frequentes	1	1	1	1	1	1	2	2	2	Baixo			
					Pata coxa	2	1	1	1	2	2	6	24	Baixo				
					Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Avaria do rotor	Barras do rotor partidas	1	1	1	1	4	4	6	24	Baixo	
		Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1				1	1	2	2	1	12	Baixo				
		Excentricidade estática e dinâmica (falhas entreferro)	1	1				1	1	4	4	6	24	Baixo				
		Falhas de isolamento	4	1				1	1	2	2	2	16	Baixo				
		Pata coxa	2	1				1	1	2	2	6	24	Baixo				
		Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	2			1	1	1	2	2	2	2	8	Moderado			
			Rotor desequilibrado	2			1	1	1	4	4	6	48	Moderado				
			Desalinhamento do veio	2			1	1	1	4	4	6	48	Moderado				
			Ajustes mecânicos incorretos	2			1	1	1	2	2	6	24	Baixo				
			Chumaceiras de rolamento defeituosas	1			1	1	1	2	2	6	12	Baixo				
		Fratura do veio	Flexão ou fadiga torsional proveniente do desalinhamento	1	1	1	1	4	4	6	24	Baixo						
Sobrecarga durante a operação	1		1	1	1	4	4	10	40	Moderado								
Rotor bloqueado	2		1	1	1	4	4	4	32	Moderado								
Danos provocados durante ação de manutenção	1		1	1	1	4	4	8	32	Moderado								
Defeitos de fabrico	1		1	1	1	4	4	8	32	Moderado								
SISTEMA AUXILIAR DO SECADOR	REDUTOR	Redutor	Fornecer binário/conversões de velocidade	Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	4	1	1	1	2	2	2	6	16	Baixo			
					Ajustes mecânicos incorretos	1	1	1	1	2	2	6	12	Baixo				
					Chumaceiras de rolamento defeituosas	1	1	1	1	2	2	6	12	Baixo				
					Lascamento de material nas engrenagens	1	1	1	1	4	4	6	24	Baixo				
				Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas	2	1	1	1	4	4	6	48	Moderado				
					Lubrificação incorreta	4	1	1	1	4	4	2	32	Moderado				
					Corrosão por pites "pitting"	2	1	1	1	4	4	8	64	Moderado				
					Lascagem de material "spalling"	1	1	1	1	4	4	6	24	Baixo				
					Sulcos e arranhões "scoring & scuffing"	1	1	1	1	4	4	8	32	Moderado				
					Deformação plástica por movimento de rolamento e escorregamento	1	1	1	1	4	4	8	32	Moderado				
					Deformação plástica por impacto nos dentes	2	1	1	1	4	4	8	64	Moderado				
					Corrosão por ataque químico / água / humidade / aditivos de extrema pressão (EP)	1	1	1	1	4	4	2	8	Baixo				
				Quebra de dentes nas engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão	1	1	1	1	4	4	6	24	Baixo				
					Sobrecarga durante a operação	2	1	1	1	4	4	6	48	Moderado				
				SISTEMA AUXILIAR DO SECADOR	ESTRUTURA	Estrutura metálica	Assegurar a rigidez do equipamento	Estrutura deformada	Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	1	1	1	4	4	1	4	Baixo
									Aperto desigual dos parafusos	2	1	1	1	4	4	2	16	Baixo
Colapso da estrutura	Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	2					1	1	4	4	1	4	Baixo				
	Corrosão uniforme	2	2					1	1	4	4	2	16	Baixo				
Estrutura solta (com equipamento)	Porcas dos parafusos soltas	2	2					1	1	2	2	1	4	Baixo				
	Parafusos corroídos	1	2					1	1	2	2	1	2	Baixo				
	Vibração excessiva da máquina	2	2					1	1	2	2	4	16	Baixo				

Tabela 17 - Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) (parte V)

APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423)														
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação				
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	MOTOR	Subsistema elétrico	Fornecer corrente elétrica	Motor não arranca	Interrupção do fornecimento corrente elétrica	6	1	1	2	1	2	2	24	Baixo
					Cabos danificados devido a choques mecânicos	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo
					Cabos queimados/derretidos devido a sobrecarga	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo
					Avaria no arrancador	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo
				Motor pára durante a operação	Sobrecarga mecânica	6	1	1	2	1	2	2	24	Baixo
					Falta de uma ou mais fases	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo
					Desequilíbrio de tensão	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo
					Quedas de tensão	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo
		Estator	Promover campo magnético	Avaria do estator	Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	2	2	2	1	12	Baixo
					Enrolamentos com humidade	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo
					Falhas de isolamento	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo
					Arranques frequentes	4	1	1	2	1	2	2	16	Baixo
					Pata coxa	4	1	1	2	2	2	6	48	Moderado
		Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Avaria do rotor	Barras do rotor partidas	2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado
					Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	2	2	2	1	12	Baixo
					Excentricidade estática e dinâmica (falhas entreferro)	2	1	1	2	4	4	6	48	Moderado
					Falhas de isolamento	2	1	1	2	2	2	2	8	Baixo
					Pata coxa	4	1	1	2	2	2	6	48	Moderado
					Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	2	1	1	4	2	4	2	16
				Rotor desequilibrado		2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado
				Desalinhamento do veio		6	1	1	4	4	4	6	144	Elevado
				Ajustes mecânicos incorretos		2	1	1	4	2	4	6	48	Moderado
				Chumaceiras de rolamento defeituosas		1	1	1	4	2	4	6	24	Baixo
				Fratura do veio		Flexão ou fadiga torsional proveniente do desalinhamento	1	1	1	4	4	4	6	24
Sobrecarga durante a operação	2				1	1	4	4	4	10	80	Moderado		
Rotor bloqueado	2	1	1		4	4	4	4	32	Moderado				
Danos provocados durante ação de manutenção	1	1	1		4	4	4	8	32	Moderado				
Defeitos de fabrico	1	1	1		4	4	4	8	32	Moderado				
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	REDUTOR	Redutor	Fornecer binário/conversões de velocidade		Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta	4	1	1	4	2	4	2	32
				Ajustes mecânicos incorretos		1	1	1	4	2	4	6	24	Baixo
				Chumaceiras de rolamento defeituosas		1	1	1	4	2	4	6	24	Baixo
				Lascamento de material nas engrenagens		1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo
				Falha das superfícies dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas	2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado
					Lubrificação incorreta	4	1	1	4	4	4	2	32	Moderado
					Corrosão por pites "pitting"	2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado
					Lascagem de material "spalling"	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo
					Sulcos e arranhões "scoring & scuffing"	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado
					Deformação plástica por movimento de rolamento e escorregamento	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado
					Deformação plástica por impacto nos dentes	2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado
					Corrosão por ataque químico / água/ humidade / aditivos de extrema pressão (EP)	1	1	1	4	4	4	2	8	Baixo
				Quebra de dentes das engrenagens	Cargas cíclicas, torção e compressão	1	1	1	4	4	4	6	24	Baixo
					Sobrecarga durante a operação	2	1	1	4	4	4	6	48	Moderado
					Cargas de impacto repentinas	1	1	1	4	4	4	4	16	Baixo

Tabela 18 - Aplicação da FMEA ao Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) (parte VI)

APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK S-CD (M1-423)																	
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco			
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação							
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	TRANSMISSÃO	Transmissão por corrente	Transferir potência	Rotura da corrente de transmissão	Corrosão sob tensão	1	1	1	2	2	2	4	8	Baixo			
					Tensionamento da corrente incorreto	4	1	1	2	2	2	2	16	Baixo			
					Lubrificação incorreta	4	1	1	2	2	2	1	8	Baixo			
					Presença de poeira, sujidade, detritos e humidade	4	1	1	2	2	2	1	8	Baixo			
					Pinos da corrente partidos devido a carga excessiva	4	1	1	2	2	2	4	32	Moderado			
					Sobrecarga durante a operação	4	1	1	2	2	2	6	48	Moderado			
					Roda dentada desalinhada	2	1	1	2	2	2	4	16	Baixo			
				Alongamento da corrente	1	1	1	1	2	2	2	4	Baixo				
				Quebra da coroa dentada	1	1	1	2	2	2	4	8	Baixo				
								Dentes da coroa dentada partidos	2	1	1	2	2	2	1	4	Baixo
				Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	1	1	2	2	2	2	4	Baixo				
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	TRANSPORTADOR HELICOIDAL	Calha	Conter o produto (granel)	Rotura da calha	Corrosão uniforme	1	1	1	4	2	4	1	4	Baixo			
					Deflexão do parafuso	2	1	1	4	2	4	2	16	Baixo			
					Corpo metálico estranho dentro do produto	1	1	1	4	2	4	2	8	Baixo			
					Rolamentos gripados	1	1	1	4	2	4	4	16	Baixo			
									Corpo metálico estranho dentro do produto	1	1	1	4	4	4	2	8
						Sobrecarga durante a operação (excesso de produto na calha)	4	1	1	4	4	4	4	64	Moderado		
		Hélice transportadora	Mover produto da entrada para a saída do secador	Fratura da hélice	Tolerâncias muito apertadas (distância entre a hélice e a calha do transportador helicoidal)	2	1	1	1	4	4	4	8	64	Moderado		
					Desgaste acelerado do bordo da hélice	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado			
					Rotações elevadas	1	1	1	1	4	4	4	8	32	Moderado		
		Veio + rolamentos	Transferir binário	Fratura do veio	Sobrecarga durante a operação	2	1	1	4	4	4	4	10	80	Moderado		
					Deflexão do veio	2	1	1	4	4	4	4	32	Moderado			
					Danos provocados durante ação de manutenção	2	1	1	4	4	4	8	64	Moderado			
					Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	4	4	4	4	64	Moderado			
					Rolamentos gripados	1	1	1	4	4	4	4	16	Baixo			
									Lubrificação incorreta	2	1	1	2	2	2	8	Baixo
									Veio desequilibrado	4	1	1	4	2	4	6	96
Falha dos rolamentos				Desalinhamento da transmissão (coroas dentadas)	1	1	1	2	2	2	4	8	Baixo				
				Ajustes mecânicos incorretos	2	1	1	4	2	4	6	48	Moderado				
				Chumaceiras de rolamento defeituosas	1	1	1	2	2	2	6	12	Baixo				
								Fundações desniveladas	1	2	1	1	4	4	10	40	Moderado
								Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	2	1	1	4	4	1	4	Baixo
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	ESTRUTURA	estrutura metálica (montada sobre carris)	Assegurar a rigidez do equipamento	Estrutura deformada	Aperto desigual dos parafusos	2	2	1	1	4	4	2	16	Baixo			
									Danos mecânicos (impacto por objeto)	1	6	4	6	8	1	8	Baixo
									Corrosão uniforme	2	6	4	6	8	4	64	Moderado
				Colapso da estrutura				Porcas dos parafusos soltas	2	2	1	1	2	2	1	4	Baixo
								Parafusos corroidos	1	2	1	1	2	2	1	2	Baixo
				Estrutura solta (com equipamento)				Vibração excessiva da máquina	2	2	1	1	2	2	4	16	Baixo
								Batente solto ou mal montado	8	2	1	1	2	2	1	16	Baixo
SISTEMA DE VEDAÇÃO DO SECADOR	VEDANTES DO TERMINAL DE ALIMENTAÇÃO E DESCARGA	Empanques, anéis de vedação (V ring), mangas de desgaste	Vedar o interior do secador e impedir a fuga de produto e gás inerte para o exterior	Falha nos empanques	Deterioração da superfície da manga	6	2	2	1	2	2	6	72	Moderado			
					Presença de contaminantes sólidos	6	2	2	1	2	2	2	24	Baixo			
					Aperto incorreto dos parafusos de ajuste dos empanques	2	2	2	1	2	4	16	Baixo				
					Pressão excessiva do gás inerte	2	2	2	1	1	2	8	Baixo				
					Temperatura elevada	4	2	2	1	1	2	16	Baixo				
					Empanques danificados	2	2	2	1	2	6	24	Baixo				
					Empanques com folga	2	2	2	1	2	6	24	Baixo				
					Lubrificação insuficiente (massa lubrificante)	6	2	2	1	2	2	24	Baixo				
					Centragem incorreta (excentricidade do tambor)	4	2	2	1	2	4	32	Moderado				
				Falha nos anéis de vedação				Anéis de vedação (V ring) danificados	2	4	2	1	2	4	6	48	Moderado
								Anéis de vedação (V ring) com folga	2	4	2	1	2	4	6	48	Moderado
								Empanques apertados demais	4	4	2	1	2	4	64	Moderado	
								Presença de contaminantes sólidos	6	4	2	1	2	4	48	Moderado	
								Deterioração da superfície da manga	2	4	2	1	2	4	6	48	Moderado
				Manga gasta				Anéis de vedação montados incorretamente	2	4	2	1	2	4	4	32	Moderado
								Presença de contaminantes sólidos	6	4	2	1	2	4	2	48	Moderado
								Empanques apertados demais	4	4	2	1	2	4	2	32	Moderado

Tabela 19 - Ações recomendadas da FMEA para Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)

Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco	Ações recomendadas
							Saúde / Segurança	Meio Ambiente	Custo de não produção	Custo de Reparação					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Anel de rolamento (guiado e livre)	Fornecer superfície de rolamento	Desgaste do anel de rolamento	Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	8	8	8	6	192	Elevado	Realização de análise de óleos ; realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Coroa dentada e pinhão	Fornecer momento ao tambor do secador	Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	6	6	6	8	192	Elevado	Realização de análise de óleos ; realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Anel de rolamento (guiado e livre)	Fornecer superfície de rolamento	Desgaste do anel de rolamento	Desalinhamento vertical e horizontal	4	1	1	8	8	8	6	192	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	MOTOR	Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Falha dos rolamentos	Desalinhamento do veio	6	1	1	4	4	4	6	144	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	MOTOR	Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Falha dos rolamentos	Desalinhamento do veio	6	1	1	4	4	4	6	144	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Tubos de aquecimento (vapor)	Fornecer calor sob a forma de vapor ao secador	Rotura dos tubos	Corrosão-erosão	2	1	1	10	6	10	6	120	Elevado	Realização de análise ultrasons
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	FUNDAÇÕES	Fundações	Suportam a estrutura	Colapso das fundações	Subdimensionamento das fundações	1	8	4	10	8	10	10	100	Elevado	Realização de análise ultrasons
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Desgaste dos rolos	Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado	Realização de análise de óleos ; realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Falha dos rolamentos	Desalinhamento do veio	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado	Realização de análise de óleos ; realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Falha dos rolamentos	Ajustes mecânicos incorretos	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline); Realização de análise termográfica
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Junta rotativa	Fornecer vapor ao colector de distribuição de vapor e descarregar o condensado	Fratura dos vedantes	Corrosão sob tensão	4	1	1	4	2	4	6	96	Elevado	Realização de análise ultrasons
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	TRANSPORTADOR HELICOIDAL	Veio + rolamentos	Transferir binário	Falha dos rolamentos	Veio desequilibrado	4	1	1	4	2	4	6	96	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online); Realização de análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)

Após a realização da análise FMEA ao secador, é possível obter uma informação clara de quais os modos de falha que requerem maior atenção para posteriormente se proceder à realização de ações de melhoria, que têm como objetivo a diminuição do risco associado a cada uma das falhas. A Tabela 19 acima apresentada indica os 12 modos de falha do secador industrial com um grau de risco elevado, ou seja identifica quais os modos de falha que necessitam maior atenção e urgência. Por sua vez a tabela recomenda também ações de melhoria a aplicar em cada um dos casos.

É importante salientar que as ações recomendadas encontradas na tabela FMEA, foram escolhidas para este objeto de estudo com base no conhecimento teórico e prático dos intervenientes deste trabalho.

#### 5.2.4. Análise de Resultados

Realizada a análise dos modos de falha e seus efeitos ao secador, de seguida procede-se à análise e interpretação dos resultados obtidos.

Após a análise das tabelas FMEA (tabelas 13 a 18) referentes ao secador, foi possível sintetizar os resultados, indicando-se na Tabela 20 as frequências relativas aos graus de risco obtidos. Verifica-se que dos 266 riscos analisados, 145 apresentam um grau de risco baixo, 109 apresentam um grau de risco moderado e 12 apresentam um grau de risco elevado.

Tabela 20 - Número de riscos segundo o grau obtido

	Total
Total de riscos	266
Risco Elevado	12
Risco Moderado	109
Risco Baixo	145

A partir do gráfico da Figura 14, é possível observar as percentagens de incidência segundo o grau de risco, tendo-se o grau de risco elevado com uma incidência de 4,51% da totalidade dos riscos, 40,98% o grau de risco moderado e o grau de risco baixo com 54,51% da totalidade dos riscos.

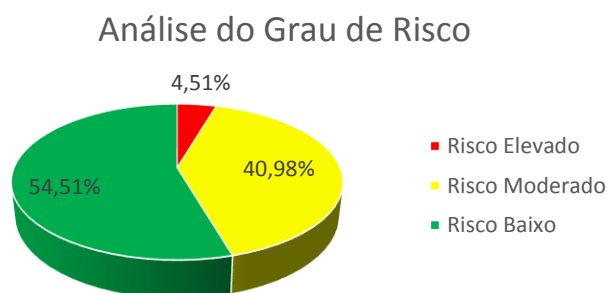
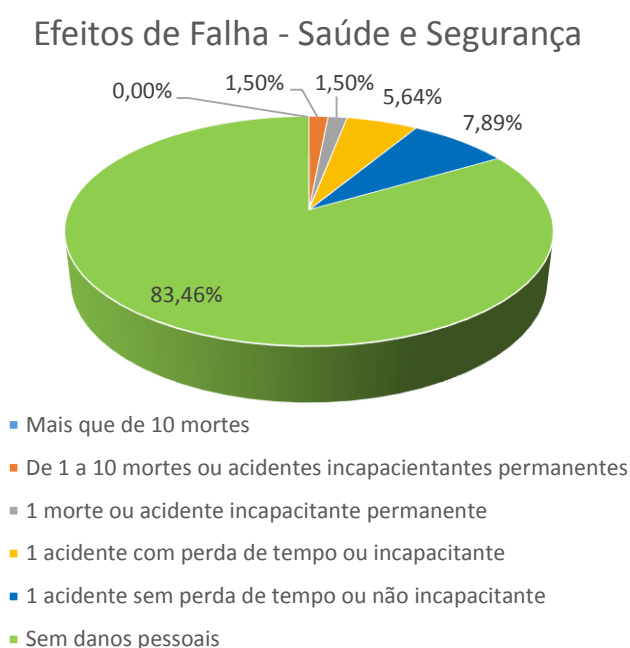


Figura 14 - Gráfico de Análise do Grau de Risco

Interpretando o gráfico da Figura 14 juntamente com a Tabela 12, rapidamente se conclui que apenas 4,51% da totalidade dos riscos (risco elevado) relativos aos modos de falha do secador, irão necessitar de uma ação imediata para diminuir o seu grau de risco. Os restantes 95,49% têm um grau de urgência consideravelmente menor, pelo que não obrigam a uma intervenção imediata no secador para implementar as ações de melhoria.

De seguida é feita uma análise sobre os efeitos das falhas do secador ao nível da saúde e segurança, meio-ambiente, custo de não-produção e custo de reparação.



*Figura 15 - Efeitos da Falha ao nível da Saúde e Segurança*

Da análise do gráfico da Figura 15, verifica-se que em 1,5% dos efeitos de falha analisados podem resultar em 1 a 10 mortes ou acidentes incapacitantes permanentes, outros 1,5% pelo menos uma morte ou acidente incapacitante permanente. Em 5,64% dos efeitos de falha tem-se um acidente com perda de tempo e em 7,89% acidente sem perda de tempo. Os restantes 83,46% efeitos de falha não provocam danos pessoais. Estes resultados permitem perceber que a gravidade dos efeitos dos modos de falha e o risco a que os trabalhadores estão expostos, na realização das tarefas de operação e manutenção do secador caso se materializem em acidentes, é de uma maneira geral muito baixa.

### Efeitos de Falha - Meio-Ambiente

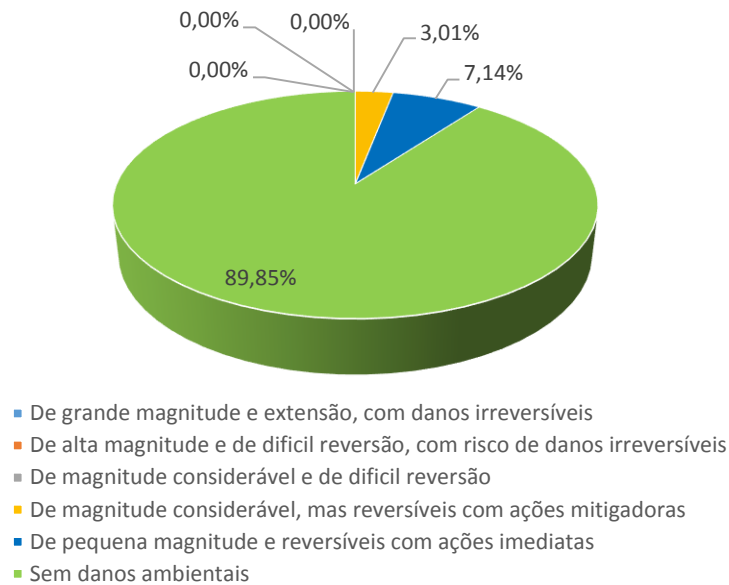


Figura 16 - Efeitos da Falha ao nível Meio-Ambiente

Da análise do gráfico da Figura 16, verifica-se que não existem acidentes de grande magnitude e extensão e que apenas 3,01% dos efeitos de falha têm como consequência a ocorrência de acidentes de magnitude considerável mas que são reversíveis com ações mitigadoras. Em 7,14% podem ocorrer acidentes de pequena magnitude e reversível com ação imediata e em 89,85% acidentes sem danos ambientais. Esta análise permite entender que o impacto para o meio-ambiente que os efeitos das falhas produzem na ocorrência de um acidente durante a realização das tarefas de operação e manutenção do secador é muito baixo.

### Efeitos de Falha - Custo de Não Produção

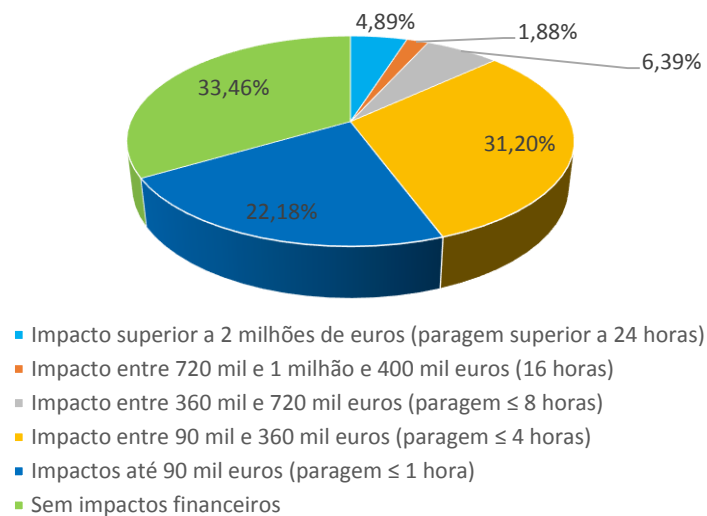


Figura 17 - Efeitos da Falha ao nível do Custo de Não Produção

Analisando o gráfico da Figura 17, verifica-se que são relativamente poucos os efeitos de falha que provocam um custo de não-produção no secador capaz de atingir valores consideravelmente altos, como por exemplo 4,89% dos efeitos de falha têm um impacto no custo de não-produção superior a 2 milhões de euros, outros 1,88% têm um impacto entre 720 mil e 1 milhão e 400 mil euros e 6,39% um impacto entre 360 mil e 720 mil euros. A grande maioria dos efeitos de falha está associada a um custo de não-produção entre os 90 mil e os 360 mil euros que correspondem a 31,20%, seguidos de 22,18% com impacto até 90 mil euros e finalmente 33,46% sem impactos financeiros. Estes resultados permitem averiguar que os efeitos dos modos de falha relativamente aos custos e tempos de paragem em que o secador não produz, situam-se entre os 90 mil e 360 mil euros ou entre 1 a 4 horas de paragem.

Efeitos de Falha - Custo de Reparação

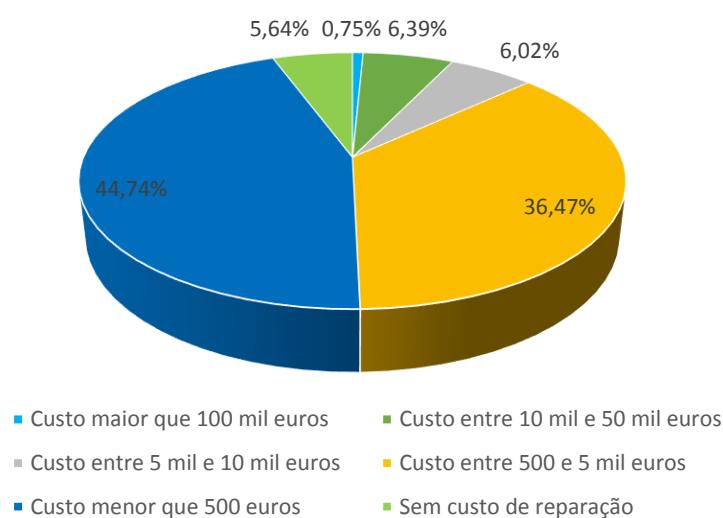


Figura 33 - Efeitos da Falha ao nível do Custo de Reparação

Através do gráfico da Figura 18, é possível verificar-se que apenas 0,75% dos efeitos de falha provocam um custo de reparação no secador superior a 100 mil euros. Logo abaixo deste valor tem-se 6,39% dos efeitos de falha com um custo de reparação entre 10 mil e 50 mil euros e 6,02% com um custo entre 5 mil e 10 mil euros. Os custos de reparação que representam a maioria dos efeitos de falha variam entre os 500 e os 5 mil euros (36,47%) e menos de 500 euros (44,74%). Da mesma forma que são poucos os efeitos de falha que tem um custo de reparação muito alto, apenas 5,64% dos efeitos de falha não têm qualquer custo de reparação.

Estes resultados permitem criar uma ideia geral sobre quais os custos de reparação que os efeitos de falha podem causar no secador.

### **5.3. Desenvolvimento e Aplicação do Método AHP**

Tendo identificado os modos de falha do secador que requerem ação imediata para diminuir o risco, o próximo passo consiste em escolher qual a melhor ação recomendada para diminuir o risco em cada modo de falha. Analisando a Tabela 19 verifica-se que na maioria dos casos existe mais do que uma ação de melhoria passível de ser escolhida e que fornece o mesmo resultado, entenda-se a diminuição do risco através do aumento da detetabilidade.

Nesta situação particular o método AHP vai ser aplicado como técnica de tomada de decisão capaz de selecionar a melhor alternativa que cumpra todos os critérios impostos, ou seja irá selecionar a melhor ação recomendada para cada modo de falha com grau de risco elevado, eliminando qualquer indício de subjetividade na escolha.

Seguindo os três princípios do pensamento analítico, demonstrados anteriormente seguem-se as etapas de construção e resolução do problema de decisão com o uso de um modelo multicritério:

- **5.3.1. Construção da Hierarquia**

A hierarquia foi definida pelo pesquisador deste trabalho considerando os critérios escolhidos para a resolução do problema de decisão como decisivos e principais, tendo em conta o contexto teórico e o objeto de estudo.

Por conseguinte a estrutura hierárquica é apresentada em quatro níveis de acordo com a Figura 19:

- Nível 1: Consiste no objetivo global “Selecionar a ação recomendada a ser implementada em cada modo de falha com grau de risco elevado”.
- Nível 2: Refere-se aos critérios definidos para avaliação das ações recomendadas.
- Nível 3: Representa as alternativas de decisão, ou seja, as ações recomendadas.

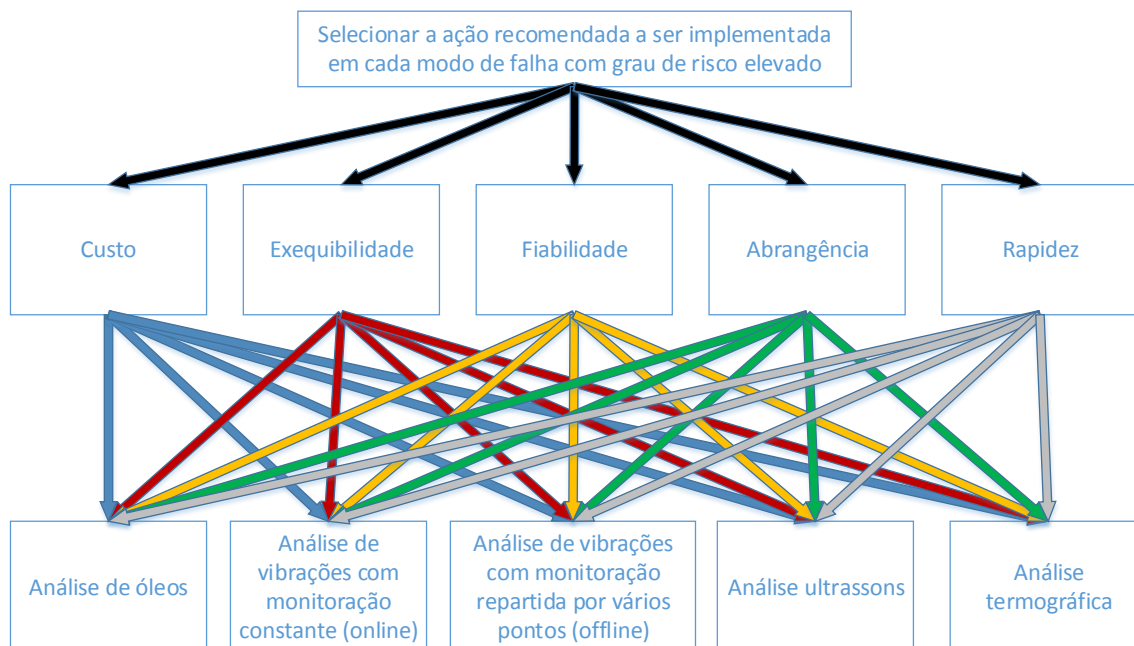


Figura 19 - Estrutura hierárquica de decisão

De seguida, tem-se uma descrição de todos os atributos que estão apresentados na hierarquia.

Descrição dos critérios:

- Custo – Este critério está relacionado com os custos diretos de implementação da ação de melhoria no sistema (secador industrial) e com os custos indiretos de execução da mesma ação após a sua implementação.
- Exequibilidade – Está relacionada com o grau de dificuldade de implementação e execução da ação recomendada.
- Fiabilidade – Consiste no grau de confiança da medição dos dados obtidos através da ação recomendada.
- Abrangência – Encontra-se diretamente relacionada com a possibilidade da ação recomendada poder ser aplicada em diferentes modos de falha.
- Rapidez – Consiste no tempo que se demora a obter uma resposta final e conclusiva dos dados medidos através da ação recomendada.

Descrição das alternativas:

- Análise de óleos – Consiste num tipo de análise em que as características físicas e químicas do óleo são verificadas, produzindo informações sobre o desgaste de metais e sobre o próprio óleo.
- Análise de vibrações com monitoração constante (online) – Consiste numa análise que requer a montagem de sensores fixos nos locais onde se deseja medir as vibrações, por sua vez os sensores estão ligados a um computador com software próprio de leitura constante, através de cabos ou rede sem-fios.
- Análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline) – Este tipo de análise é realizada com equipamento portátil (computador e sensores), o que permite efetuar várias medições em diversos pontos, porém a informação não é obtida de forma constante.
- Análise ultrassons - A análise por ultrassons permite detetar sons produzidos por falhas em praticamente todos os equipamentos existentes num ambiente fabril, como por exemplo a deteção de fissuras em sólidos e a localização de fugas numa instalação industrial.
- Análise termográfica – Esta análise realiza-se através de uma câmara de infravermelhos (câmara termográfica), que consegue ler os raios infravermelhos e transformam-nos, dando a conhecer a temperatura na superfície do material emissor.

### • 5.3.2. Definição de Prioridades e Comparações Par-a-Par

O processo de votação dos critérios aos pares foi feito com o apoio da estrutura hierárquica (Figura 19) e da escala verbal (Tabela 5).

Para facilitar o entendimento e a visualização das matrizes que serão apresentadas, define-se a seguinte nomenclatura (Tabela 21):

Tabela 21 - Nomenclaturas dos elementos da hierarquia

Objetivo global (Selecionar a ação recomendada a ser implementada para cada modo de falha com grau de risco elevado)	OG
Critério custo	CC
Critério exequibilidade	CE
Critério fiabilidade	CF
Critério abrangência	CA
Critério rapidez	CR
Alternativa análise de óleos	A1
Alternativa análise de vibrações com monitoração constante (online)	A2
Alternativa análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)	A3
Análise ultrassons	A4
Análise termográfica	A5

Para não tornar muito extensa a demonstração dos cálculos efetuados no desenvolvimento do método AHP em relação ao objeto de estudo, será apenas exemplificado o cálculo da matriz de comparação, vetor de prioridades e índice de consistência ao nível dos critérios. Os cálculos ao nível das alternativas serão apresentados através de tabelas.

O primeiro passo a realizar é construir a matriz de comparação par-a-par para os critérios em relação ao objetivo Global (Tabela 22).

Tabela 22 - Matriz de comparação dos critérios em relação ao objetivo global

	CC	CE	CF	CA	CR
CC	1	2	1/7	1/3	5
CE	1/2	1	1/7	1/3	3
CF	7	7	1	5	8
CA	3	3	1/5	1	3
CR	1/5	1/3	1/8	1/3	1

De seguida procede-se à normalização da matriz. O cálculo compreende o somatório dos elementos de cada coluna (Tabela 23) e a divisão de cada elemento da coluna pelo respetivo somatório. A matriz que resulta do processo é chamada de matriz normalizada (Tabela 24).

Tabela 23 - Cálculo da matriz de critérios normalizada

	CC	CE	CF	CA	CR
CC	1	2	1/7	1/3	5
CE	1/2	1	1/7	1/3	3
CF	7	7	1	5	8
CA	3	3	1/5	1	3
CR	1/5	1/3	1/8	1/3	1
Soma	11,70	13,33	1,61	7,00	20,00

Tabela 24 - Matriz de critérios normalizada

	CC	CE	CF	CA	CR
CC	0,0855	0,1500	0,0887	0,0476	0,2500
CE	0,0427	0,0750	0,0887	0,0476	0,1500
CF	0,5983	0,5250	0,6208	0,7143	0,4000
CA	0,2564	0,2250	0,1242	0,1429	0,1500
CR	0,0171	0,0250	0,0776	0,0476	0,0500

Posteriormente, tem-se o cálculo do peso relativo de cada critério face ao objetivo global. Aqui o cálculo compreende o somatório dos elementos de cada linha e a sua divisão pelo número de colunas (Tabela 24). O resultado deste processo tem o nome de vetor de prioridades (Tabela 25).

Tabela 25 - Vetor de prioridades dos critérios

	CC	CE	CF	CA	CR		Vetor prioridades
CC	0,0855	0,1500	0,0887	0,0476	0,2500	=	0,1244
CE	0,0427	0,0750	0,0887	0,0476	0,1500	=	0,0808
CF	0,5983	0,5250	0,6208	0,7143	0,4000	=	0,5717
CA	0,2564	0,2250	0,1242	0,1429	0,1500	=	0,1797
CR	0,0171	0,0250	0,0776	0,0476	0,0500	=	0,0435
							1,0000

Assim a interpretação dos resultados obtidos demonstra o seguinte:

- A fiabilidade é o primeiro critério mais importante com 57,17%.
- A abrangência é o segundo critério mais importante com 17,97%.
- O custo é o terceiro critério mais importante com 12,44%.
- A exequibilidade é o quarto critério mais importante com 8,08%.
- A rapidez é o quinto critério mais importante com 4,35%.

Em seguida, as tabelas de 26 a 30 apresentam as comparações par-a-par e os vetores de prioridades (peso relativo) das matrizes normalizadas, demonstrando o comportamento de cada alternativa, na avaliação realizada.

Tabela 26 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério custo

CC	A1	A2	A3	A4	A5	Vetor prioridades
A1	1,0000	0,1429	0,2000	0,3333	3,0000	0,0795
A2	7,0000	1,0000	5,0000	6,0000	7,0000	0,5585
A3	5,0000	0,2000	1,0000	2,0000	3,0000	0,1920
A4	3,0000	0,1667	0,5000	1,0000	2,0000	0,1165
A5	0,3333	0,1429	0,3333	0,5000	1,0000	0,0535

*Tabela 27 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério exequibilidade*

CE	A1	A2	A3	A4	A5	Vetor prioridades
A1	1,0000	9,0000	7,0000	3,0000	0,3333	0,2826
A2	0,1111	1,0000	0,3333	0,1429	0,1111	0,0308
A3	0,1429	3,0000	1,0000	0,3333	0,1429	0,0608
A4	0,3333	7,0000	3,0000	1,0000	0,2000	0,1390
A5	3,0000	9,0000	7,0000	5,0000	1,0000	0,4867

*Tabela 28 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério fiabilidade*

CF	A1	A2	A3	A4	A5	Vetor prioridades
A1	1,0000	0,2000	0,2500	3,0000	2,0000	0,1187
A2	5,0000	1,0000	2,0000	7,0000	6,0000	0,4745
A3	4,0000	0,5000	1,0000	4,0000	3,0000	0,2708
A4	0,3333	0,1429	0,2500	1,0000	0,5000	0,0532
A5	0,5000	0,1667	0,3333	2,0000	1,0000	0,0827

*Tabela 29 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério abrangência*

CA	A1	A2	A3	A4	A5	Vetor prioridades
A1	1,0000	0,2000	0,2000	2,0000	3,0000	0,0992
A2	5,0000	1,0000	0,5000	6,0000	8,0000	0,3353
A3	5,0000	2,0000	1,0000	7,0000	9,0000	0,4645
A4	0,5000	0,1667	0,1429	1,0000	2,0000	0,0621
A5	0,3333	0,1250	0,1111	0,5000	1,0000	0,0389

*Tabela 30 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério rapidez*

CR	A1	A2	A3	A4	A5	Vetor prioridades
A1	1,0000	0,3333	0,5000	0,2500	0,2000	0,0624
A2	3,0000	1,0000	2,0000	0,5000	0,3333	0,1611
A3	2,0000	0,5000	1,0000	0,3333	0,2500	0,0986
A4	4,0000	2,0000	3,0000	1,0000	0,5000	0,2618
A5	5,0000	3,0000	4,0000	2,0000	1,0000	0,4162

Após a avaliação de todos os pesos relativos, procede-se ao cálculo de um único peso para cada alternativa, que representa o desempenho da alternativa face ao objetivo global (Tabela 31). Este cálculo é obtido realizando o produto da matriz dos pesos relativos das alternativas em relação a cada critério pela matriz do peso relativo dos critérios.

Tabela 31 - Cálculo do peso relativo das alternativas em relação ao objetivo global

	Peso relativo das alternativas					*	Peso relativo dos critérios		
	CC	CE	CF	CA	CR				
A1	0,0795	0,2826	0,1187	0,0992	0,0624		0,1244	CC	0,1211
A2	0,5585	0,0308	0,4745	0,3353	0,1611		0,0808	CE	0,4105
A3	0,1920	0,0608	0,2708	0,4645	0,0986		0,5717	CF	0,2714
A4	0,1165	0,1390	0,0532	0,0621	0,2618		0,1797	CA	0,0787
A5	0,0535	0,4867	0,0827	0,0389	0,4162		0,0435	CR	0,1184
									1,0000

Assim a interpretação dos resultados obtidos demonstra o seguinte:

- A análise de vibrações com monitoração constante (online) é a primeira alternativa mais importante com 41,05%.
- A análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline) é a segunda alternativa mais importante com 27,14%.
- A análise de óleos é a terceira alternativa mais importante com 12,11%.
- A análise termográfica é a quarta alternativa mais importante com 11,84%.
- A análise ultrassons é a quinta alternativa mais importante com 7,87%.

### • 5.3.3. Consistência Lógica

Para determinar alguma incongruência que possa existir nas comparações efetuadas, será necessário proceder-se ao cálculo do índice de consistência e a razão de consistência das decisões tomadas.

Continuando a demonstração dos cálculos efetuados ao nível dos critérios, tem-se que para o cálculo do índice de consistência em primeiro lugar é realizado o produto da matriz de comparação pelo vetor de prioridades.

	CC	CE	CF	CA	CR	X	Vetor de prioridades	
CC	1,0000	2,0000	0,1429	0,3333	5,0000			0,1244
CE	0,5000	1,0000	0,1429	0,3333	3,0000	0,0808		0,4149
CF	7,0000	7,0000	1,0000	5,0000	8,0000	0,5717		3,2540
CA	3,0000	3,0000	0,2000	1,0000	3,0000	0,1797		1,0399
CR	0,2000	0,3333	0,1250	0,3333	1,0000	0,0435		0,2266

Em seguida é realizado o cálculo do  $\lambda_{\text{máx}}$  e do índice de consistência (IC) através das equações abaixo demonstradas.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i \cdot \frac{Aw_i}{w_i} = \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{0,6449}{0,1244} + \frac{0,4149}{0,0808} + \frac{3,2540}{0,5717} + \frac{1,0399}{0,1797} + \frac{0,2266}{0,0435} \right) = 5,4028$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5,4028 - 5}{5 - 1} = 0,1007$$

Finalmente tem-se o cálculo da razão de consistência (RC), que resulta da divisão do índice de consistência (IC) pelo índice aleatório (IR), conforme pode ser verificado na equação abaixo.

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,100694}{1,12} = 0,0899 < 0,10$$

(consultando a Tabela 6 tem-se que para uma matriz de ordem n=5 o IR=1,12)

Verifica-se que a razão de consistência é menor que 0,10 significando que a inconsistência das comparações feitas ao nível dos critérios é aceitável.

Procedendo de igual forma para a avaliação da consistência das alternativas em relação aos critérios, pode-se confirmar analisando a Tabela 32, que a inconsistência de todas as alternativas é igualmente menor que 0,10 demonstrando que estão dentro do limite aceitável estabelecido por Saaty.

Tabela 32 - Razão de consistência das alternativas em relação aos critérios

Alternativas em Relação aos Critérios	Razão de consistência (RC)
CC - Critério custo	0,0979
CE – Critério Exequibilidade	0,0696
CF – Critério Fiabilidade	0,0349
CA – Critério Abrangência	0,0235
CR – Critério Rapidez	0,0153

### 5.3.4. Análise de Resultados

Realizada a implementação do método AHP na análise dos modos de falhas e seus efeitos (FMEA) aplicada ao secador industrial, de seguida procede-se a uma breve análise e interpretação dos resultados obtidos.

Apresenta-se na Figura 20, a árvore de decisão AHP, obtida após a determinação do peso dos critérios e das alternativas.

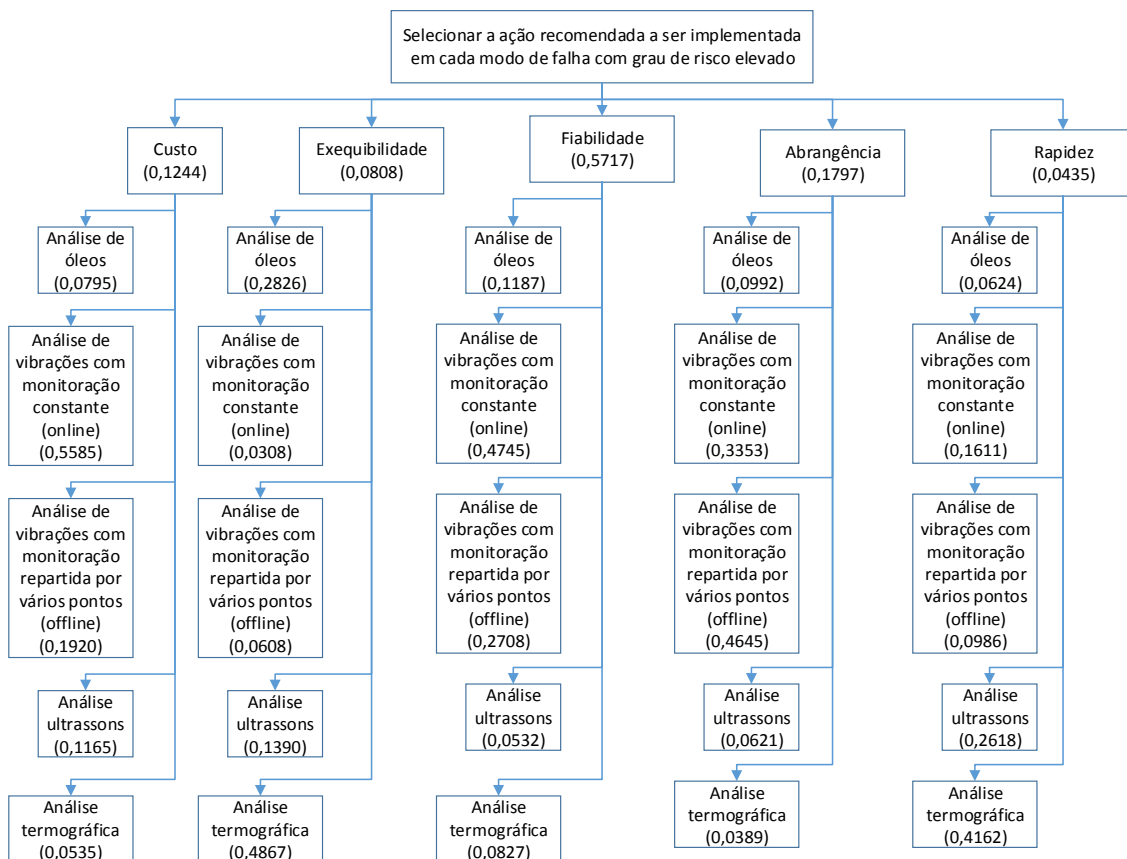


Figura 20 - Árvore de decisão AHP contendo peso dos critérios e alternativas

Analisando a Tabela 33, verifica-se que dos critérios escolhidos para a resolução do problema de tomada de decisão em questão, o critério com maior peso é a fiabilidade. Isto significa que o critério fiabilidade é um fator decisivo na tomada de decisão das diferentes alternativas (ações recomendadas). Por sua vez, através da Tabela 34, verifica-se que a alternativa com maior peso é a análise de vibrações com monitoração constante (online).

Tabela 33 - Hierarquia dos critérios

Hierarquia dos Critérios		
CC – Critério custo	12,44%	O terceiro critério mais importante
CE – Critério exequibilidade	8,08%	O quarto critério mais importante
CF – Critério fiabilidade	57,17%	O primeiro critério mais importante
CA – Critério abrangência	17,97%	O segundo critério mais importante
CR – Critério resposta	4,35%	O quinto critério mais importante

Tabela 34 - Hierarquia das alternativas

Hierarquia das Alternativas		
A1 - Alternativa análise de óleos	12,11%	A terceira alternativa mais importante
A2 - Alternativa análise de vibrações com monitoração constante (online)	41,05%	A primeira alternativa mais importante
A3 - Alternativa análise de vibrações com monitoração repartida por vários pontos (offline)	27,14%	A segunda alternativa mais importante
A4 - Análise ultrassons	7,87%	A quinta alternativa mais importante
A5 - Análise termográfica	11,84%	A quarta alternativa mais importante

Dos resultados obtidos conclui-se que a ação recomendada a ser implementada em cada modo de falha com grau de risco elevado, consiste na análise de vibrações com monitoração constante (online), visto que é a alternativa no método AHP com maior peso relativamente às restantes.

Por conseguinte, a aplicação do método AHP conseguiu resolver o problema de tomada de decisão relativamente aos casos em que existiam mais do que uma ação de melhoria para cada modo de falha com grau de risco elevado (ver Tabela 19), ao selecionar a melhor ação recomendada para cada modo de falha, conforme pode ser analisado na Tabela 35. Esta tabela tal como a Tabela 19, representa os modos de falha do secador industrial com grau de risco elevado, com a diferença de que agora cada modo de falha tem uma ação recomendada devidamente selecionada e com o menor grau de subjetividade possível.

Tabela 35 - Ações recomendadas da FMEA para Secador Industrial TSK S-CD (M1-423) após implementação do AHP

Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN	Grau de Risco	Ações recomendadas
							Saúde / Segurança	Meio Ambiente	Custo de não produção	Custo de Reparação					
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Anel de rolamento (guiado e livre)	Fornecer superfície de rolamento	Desgaste do anel de rolamento	Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	8	8	8	6	192	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Coroa dentada e pinhão	Fornecer momento ao tambor do secador	Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	6	6	6	8	192	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Anel de rolamento (guiado e livre)	Fornecer superfície de rolamento	Desgaste do anel de rolamento	Desalinhamento vertical e horizontal	4	1	1	8	8	8	6	192	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	MOTOR	Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Falha dos rolamentos	Desalinhamento do veio	6	1	1	4	4	4	6	144	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	MOTOR	Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Falha dos rolamentos	Desalinhamento do veio	6	1	1	4	4	4	6	144	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Tubos de aquecimento (vapor)	Fornecer calor sob a forma de vapor ao secador	Rotura dos tubos	Corrosão-erosão	2	1	1	10	6	10	6	120	Elevado	Realização de análise ultrasons
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	FUNDAÇÕES	Fundações	Suportam a estrutura	Colapso das fundações	Subdimensionamento das fundações	1	8	4	10	8	10	10	100	Elevado	Realização de análise ultrasons
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Desgaste dos rolos	Corrosão por pites "pitting"	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Falha dos rolamentos	Desalinhamento do veio	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Falha dos rolamentos	Ajustes mecânicos incorretos	4	1	1	4	4	4	6	96	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	TAMBOR SECADOR	Junta rotativa	Fornecer vapor ao colectador de distribuição de vapor e descarregar o condensado	Fratura dos vedantes	Corrosão sob tensão	4	1	1	4	2	4	6	96	Elevado	Realização de análise ultrasons
SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO SECADOR	TRANSPORTADOR HELICOIDAL	Veio + rolamentos	Transferir binário	Falha dos rolamentos	Veio desequilibrado	4	1	1	4	2	4	6	96	Elevado	Realização de análise de vibrações com monitoração constante (online)



## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1. Considerações Finais

Pode-se concluir que foram atingidos os objetivos fundamentais inicialmente propostos, apesar de alguma complexidade e exigência das tarefas estudadas.

No desenvolvimento do presente trabalho, foi possível concluir através do estudo desenvolvido, que a FMEA é uma ferramenta altamente versátil e adaptável à realidade onde é aplicada. Tanto que é possível moldar a sua utilização ao produto ou processo analisado e desta forma permitir alguma criatividade na sua elaboração, não ficando limitada por regras rígidas e não tolerantes. Porém a implementação desta técnica é uma atividade exigente e que ao mesmo tempo obriga à equipa participante a adquirir um conhecimento mais detalhado sobre cada componente que faz parte do objeto de estudo. Este conhecimento torna-se bastante útil para a eliminação dos modos de falha ou até mesmo para a identificação de novos modos de falha. Por conseguinte, a utilização desta técnica mostra ser muito útil para a implementação de ações de melhoria que se pretendam realizar no objeto de análise, com vista a diminuir o risco associado aos modos de falha.

Pode-se concluir também no desenvolvimento do trabalho que a aplicação do método AHP mostrou ser uma grande mais-valia, uma vez que permite que os elementos decisores tenham uma ferramenta relativamente simples, específica e matemática de apoio à decisão. Esta ferramenta suporta e qualifica as decisões, além de permitir que os elementos decisores justifiquem suas escolhas e simulem os resultados, o que é um facto muito importante na medida em que vem eliminar quaisquer vestígios de subjetividade na tomada de decisões. Outro aspeto importante que foi possível verificar, consiste no facto que o método AHP toma em conta a qualidade das avaliações realizadas, pois a tomada de decisão precisa de ser consistente e coerente. No entanto durante a realização do trabalho chegou-se à conclusão que é importante ter em conta que além dos resultados obtidos pelo método, deverão ser realizados estudos que abordem as viabilidades financeiras sobre cada opção.

Relativamente ao secador industrial indireto de tubos de vapor que foi o objeto de estudo do presente trabalho, foi possível concluir através da ferramenta FMEA que de uma forma geral os graus de risco dos modos de falha apresentam-se com grau moderado ou baixo, o que demonstra uma grande robustez e fiabilidade do equipamento. Esta realidade é provada pelo facto de que dos 266 riscos analisados apenas 12 apresentam um grau de risco elevado, aos quais foram sugeridas ações de melhoria que devem ser realizadas de imediato dado o seu grau de risco.

## **6.2. Dificuldades Sentidas**

As principais dificuldades sentidas na elaboração do presente trabalho passaram essencialmente pela dificuldade em efetuar a ligação entre os conceitos teóricos e a componente prática, no que respeita:

- Falta de contacto com pessoas com conhecimento e experiência sobre o objeto de estudo, o que dificultou a existência de diferentes perspetivas e abordagens, bem como troca de ideias.
- Estudo muito intensivo e exaustivo sobre os modos de falha do secador industrial, o que obrigou a um estudo individual de cada componente.
- Falta de dados estatísticos referentes ao histórico de avarias do secador industrial.
- Falta de elementos referente a planos de manutenção do secador industrial.
- Elementos estatísticos (acidentes, custos de não-produção, custos de reparação) que permitissem atribuir a valoração à severidade e à probabilidade da ocorrência, com menor grau de subjetividade.
- Aplicação das escalas da metodologia FMEA visto que a sua aplicação direta não era propriamente a mais indicada ao caso de estudo, obrigando à adaptação das mesmas.
- Falta de dados concretos que permitissem atribuir a valoração às comparações entre ações recomendadas efetuadas no método AHP, diminuindo o grau de subjetividade.
- Complexidade e extensão dos cálculos efetuados manualmente na aplicação do método AHP.

Apesar das razões expostas, releva-se o facto de ter sido possível o acesso a literatura técnica sobre todos os componentes do secador industrial e o apoio dos orientadores do presente trabalho, que permitiu a aquisição de conhecimentos relativamente ao seu funcionamento e constituição, quer às ações de melhoria a aplicar, bem como ter contribuído para a aquisição de conhecimentos para se atribuírem as valorações relativas a cada um dos fatores que entram na determinação do grau de risco.

## **6.3. Trabalhos Futuros**

De forma a dar continuidade ao estudo efetuado no presente trabalho e com vista a diminuir as causas das dificuldades encontradas dever-se-ia:

- Realizar um levantamento completo de todo o tipo de informação referente ao secador industrial, nomeadamente: histórico de avarias, de acidentes com o pessoal e meio-ambiente, plano de manutenção, gastos de manutenção (diretos e indiretos), entre outros. Pretende-se assim complementar a informação que foi reunida até ao presente sobre o secador industrial, de maneira a que a aplicação da FMEA possa assentar em dados menos teóricos e mais reais.
- Reunir dados concretos que possam servir de suporte aos critérios estabelecidos no método AHP, de maneira a que a seleção da ação recomendada para cada modo de falha seja feita com a menor subjetividade possível.



## Bibliografia

- Albright, L. F. (2008). *Albright's Chemical Engineering Handbook*. CRC Press.
- Almeida, D. (2008). Descrição da implementação da ferramenta FMEA no processo de montagem do eixo traseiro de um veículo em uma Indústria Automobílica. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
- Alonso, L. F., Cornejo, F. E., Fabbro, I. M., Park, K. J., & Park, K. J. (2007). SELEÇÃO DE SECADORES: FLUXOGRAMA. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 179-202.
- Barros, M. S., Marins, C. S., & Souza, D. O. (2009). O uso do Método de Análise Hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - Um estudo de caso. XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão., (pp. 1-13).
- Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 839-848.
- Bhushan, N., & Rai, K. (2004). *Strategic Decision Making - Applying the Analytic Hierarchy Process*. Springer-Verlag.
- Braglia, M. (2000). MFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability International*, 17(9), 1017-1033.
- Bruno, G., Esposito, E., Genovese, A., & Passaro, R. (2012). AHP-based approaches for supplier evaluation: Problems and perspectives. *Journal of Purchasing & Supply Management*, 18, 159-172.
- Chiozza, M. L., & Ponzetti, C. (2009). FMEA: A model for reducing medical errors. *Clinica Chimica Acta*, 75-78.
- Costa e Silva, S. R., Fonseca, M., & de Brito, J. (2006). Metodologia FMEA e sua aplicação à Construção de Edifícios. LNEC.
- Costa, R. P. (2012). Utilização de metodologias multicritério de apoio à decisão como ferramenta de suporte numa empresa de serviços energéticos. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Crow, K. (2002). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). Retrieved from New Product Development Solutions: <http://www.npd-solutions.com/fmea.html>
- Ferreira, L. A. (2003). Estratégias de Manutenção e Análise de Riscos Industriais. 1º Encontro Luso-Brasileiro de Manutenção, (pp. 1-12).
- Followell, C. (2012, November 30). Industrial Drying: Best Practices and Techniques. Retrieved from HubPages: <http://clare-followell.hubpages.com/hub/Industrial-Drying-Best-Practices-and-Techniques>
- Gavin Robbins Consulting Ltd 2013. (2014, January). Note on benefits of FMEA / FMECA. Retrieved from Failure Modes & Effects Analysis (FMEA): [http://www.fmea.co.uk/FMEA\\_benefits.html](http://www.fmea.co.uk/FMEA_benefits.html)
- Haq, J., & Lipol, L. S. (2011). Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. *IJBAS/IJENS*, 74-82.
- Hein, N., Kroenke, A., Junior, M. R., & Corrente, P. D. (2008). Análise de áreas para construção de conjuntos habitacionais - Um modelo matemático para a reconstrução. EREMAT SUL - Encontro Regional de Estudantes de Matemática do Sul XVI, 80-90.

- Herpich, C., & Fogliatto, F. S. (2013). Aplicação de FMECA para definição de estratégias de manutenção em um sistema de controle e instrumentação de turbogeradores. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 70-88.
- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186, 211-228.
- Hoseynabadi, H. A., Oraee, H., & Tavner, P. J. (2010). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. *Electrical Power and Energy Systems*, 817-824.
- International Marine Contractors Association (IMCA). (2002). Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs). IMCA.
- Jordão, B. M., & Pereira, S. R. (2006). A análise multicritério na tomada de decisão - O método analítico hierárquico de T.L Saaty (Desenvolvimento do método com recurso à análise de um caso prático explicado ponto a ponto). INSTITUTO POLITÉCNICO DE COIMBRA.
- Karami, E. (2006). Appropriateness of farmers' adoption of irrigation methods: The application of the AHP model. *Agricultural Systems*, 87, 101-119.
- Liu, H.-C., Liu, L., Bian, Q.-H., Lin, Q.-L., Dong, N., & Xu, P.-C. (2011). Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. *Expert Systems with Applications*, 38, 4403-4415.
- Louisville Dryer Company. (2014, February). Steam Tube Dryers. Retrieved from Louisville Dryer Company: <http://www.louisvilledryer.com/steamtubedryers.asp>
- Miller, R. (2006). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA, FMECA). Clinic and Laboratory Standards Institute.
- Moura, C. (2000). Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial (FMEA) Manual de Referência SAE J-1739. ASQC.
- MTain. (2014, March). MTain Inc. Retrieved from MTain Inc. - Information: <http://www.mtain.com/pdf/MTain%20Failure%20Modes%20Effects%20ans%20Criticality%20Analysis%20Notes.pdf>
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying* (Third ed.). (A. S. Mujumdar, Ed.) CRC Press.
- Mujumdar, A. S. (2011). ME5202 Industrial Transport Process. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore.
- Mujumdar, A. S., Jangam, S., & Lee, D.-J. (2013). Some Recent Advances in Drying Technologies to Produce Particulate Solids. *KONA Powder and Particle Journal*, 70-84.
- NP EN 13306. (2007). Norma Portuguesa para terminologia de manutenção. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- Omdahl, T. P. (1988). *Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) Dictionary*. Milwaukee: ASQC Quality Press.
- Pariazar, M., Shahrabi, J., Zaeri, M. S., & Parhizi, S. (2008). A Combined Approach for Maintenance Strategy Selection. *Journal of Applied Sciences*, 8, 4321-4329.
- ReliaSoft Corporation. (2014, March). Applications and Benefits of FMEA and Xfmea. Retrieved from ReliaSoft Corporation for Reliability Software, Training and Consulting Services: <http://www.reliasoft.com/xfmea/benefits.htm>
- Resende, A. d. (2012). Conceção, modelação e simulação de um secador de pão moído. Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica.

- Riplová, K. (2007). Tool of Risk Management: Failure Mode and Effects Analysis and Failure Modes, Effects and Criticality Analysis. *Journal of Information, Control and Management Systems*, 5, 111-120.
- Rodrigues, M. S., Teixeira, J. C., & Cardoso, J. P. (2011). Buildings envelope anomalies: A visual survey methodology. *Construction and Building Materials*, 25, 2741-2750.
- Santos, A. C. (2011). Análise dos modos de falhas no desenvolvimento de novos produtos de SVA: Uma abordagem para a indústria de telecomunicações. Faculdade de Economia Universidade de Coimbra.
- Santos, C. D. (2008). PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FMEA NO FORNO DE VAPOR TEKA. Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia e Gestão Industrial.
- Santos, F. F. (2008). Análise de investimentos em AMT (Advanced Manufacturing Technology): Uso de um modelo multicriterial - AHP (Analytic Hierarchy Process). Universidade Federal de Minas Gerais.
- Sardinha, G. P., Claro, F. A., & Pereira, R. L. (2009). Uso combinado do AHP e do FMEA para análise de riscos em gerenciamento de projetos. *SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, (pp. 1-13).
- Scipioni, A., Saccarola, G., Centazzo, A., & Arena, F. (2002). FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. *Food Control*, 13, 495-501.
- Shen, L., Muduli, K., & Barve, A. (2013). Developing a sustainable development framework in the context of mining industries: AHP approach. *Resources Policy*, 1-12.
- Smith, M. T. (2014, January). History of the FMEA. Retrieved from Elsmar: <http://elsmar.com/FMEA/sld011.htm>
- Sobral, J., & Abreu, A. (2013). Manutenção Produtiva Total. In *Manutenção Produtiva Total e Gestão Lean*.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee: American Society for Quality, Quality Press.
- Suner, A., C, elikoğlu, C. C., Dicle, O., & Sökmen, S. (2012). Sequential decision tree using the analytic hierarchy process for decision support in rectal cancer. *Artificial Intelligence in Medicine*, 56, 59-68.
- Teoh, P. C., & Case, K. (2004). Failure modes and effects analysis through knowledge modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 253-260.
- Traub, D. A. (2002). Rotary dryers, part 1: A review of major dryer types. *Process Heating*, 9, 1.
- Tsukishima Kikai Co. Ltd. (2014, January). Steam Tube Dryer (STD). Retrieved from Tsukishima Kikai: <http://www.tsk-g.co.jp/en/tech/equip/kanso/STD.html>
- Vargas, R. V. (2010). Utilizando A Programação Multicritério (Analytic Hierarchy Process - AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. *PMI Global Congress 2010 – North America*.
- Vilas Boas, C. d. (2006). Modelo multicritérios de apoio à decisão aplicado ao uso múltiplo de reservatórios: estudo da barragem do ribeirão João Leite. Brasília: Departamento de Economia da Universidade de Brasília.
- Wikipedia, the free encyclopedia. (2014, March). Failure mode and effects analysis. Retrieved from Wikipedia, the free encyclopedia:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Failure\\_mode\\_and\\_effects\\_analysis#cite\\_ref-MIL-P-1629\\_1-0](http://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode_and_effects_analysis#cite_ref-MIL-P-1629_1-0)