

ANÁLISE DE MANUTENÇÃO DOS AERO-ARREFECEDORES NA REFINARIA DE MATOSINHOS

José Fernandes Oliveira

Relatório da Dissertação do MIEM

Orientador na Refinaria do Porto: Eng. Carlos Manuel Fagundes

Orientador na FEUP: Prof. Luís António de Andrade Ferreira



FEUP

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Fevereiro 2010

Dedicada aos meus pais

Resumo

Introdução: As actividades de manutenção, em conjunto com análise de avarias e as suas soluções, podem ser consideradas como uma ferramenta para evitar falhas. Contudo, antes de se aplicar qualquer estratégia, é necessário reunir toda a informação possível sobre os modos de falha e frequências de falha.

Objectivo: Realização de uma análise de fiabilidade aos aero-arrefecedores e investigação de possíveis medidas, com o intuito de melhorar esta mesma fiabilidade.

Metodologia: Inicialmente, foi feito um resumo sobre manutenção e fiabilidade, particularizando a análise de inspecção por vibrações. Foi desenvolvida a metodologia depois da análise do histórico. A Metodologia compreende dez etapas: 1 – definição do sistema; 2 – descrição funcional do sistema; 3 – realização do diagrama funcional do sistema; 4 – divisão do sistema; 5 – análise das características mecânicas dos componentes considerados relevantes; 6 – análise FMEA; 7 – realização de árvore de falhas do sistema (FTA); 8 – análise de fiabilidade; 9 – análise individual dos modos de falha críticos; 10 – definição do plano de estudo.

Resultados e Conclusões: Seleccionaram-se os modos de falha críticos a nível de fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade, e para eles foi possível concluir que existe discrepância de resultados no número de falhas por aero-arrefecedor na unidade. Através da distribuição de falhas no tempo, observou-se que existem falhas aglomeradas e falhas logo a seguir às intervenções de manutenção.

Para os modos de falha e aero-arrefecedores críticos definiu-se o plano de intervenção a vários níveis – análise de avarias, manutibilidade e análise crítica à inspecção por vibrações, com a finalidade de melhorar os modos de falha e aero-arrefecedores críticos, tornando-os mais fiáveis e disponíveis ao longo dos seus ciclos de vida.

Palavras-chave: *fiabilidade, manutenção, aero-arrefecedores, modos de falha, análise de avarias, manutibilidade, inspecção por vibrações.*

Abstract

Introduction: Machinery maintenance activities, together with failure analysis and troubleshooting, can be regarded as failure fighting process. However, before we can apply any strategies, we must gather as much information as possible about failure modes and failure frequencies.

Aim: Perform an analysis of air-coolers reliability and study of possible interventional plans, in order to improve their reliability.

Method: Initially, was made a summary about maintenance and reliability with an emphasis on the inspection by vibration. It was also developed the method to use on the reliability's analysis after exploring failure data. This method has ten steps: 1 – system definition; 2 – functional description of the system; 3 – construction of the functional diagram of the system; 4 – division of the system; 5 - mechanical characteristics analysis of the components considered relevant; 6 – perform FMEA analysis; 7 – perform the failure tree; 8 – reliability analysis; 9 – individual analysis of critical failure modes; 10 – definition of the action plan.

Results and Conclusion: There were selected the critical failure modes regarding reliability, maintainability and availability, and for them it was concluded that there is discrepancy in results of number of failures per air cooler in unit. There is a clear pattern of clustering of failures shortly after overhaul.

It was defined a study plan including different levels for critical failure modes and air coolers: the failure analysis, maintainability and a review of the inspection of vibrations, in order to improve the failure modes and air-coolers, making them more reliable and available throughout its life cycle.

Keywords: *reliability, maintenance, air coolers, failure analysis, failure modes, maintainability, inspection by vibrations.*

Agradecimentos

Aos meus coordenadores, Professor Luís Andrade Ferreira e Engenheiro Carlos Fagundes, pelos conselhos fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

Às pessoas que trabalham na área de Fiabilidade, Fernão Lopes, António Costa, Daniel Baptista, António Freitas, José Carlos, André Lopes e Hugo Araújo, pela ajuda prestada na recolha de informação nas suas áreas de conhecimento.

À minha família, namorada e amigos, que pela análise crítica, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

À empresa Galp Energia pela oportunidade.

Índice de conteúdos

Resumo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	v
Abstract	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vii
Índice de Conteúdos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	xi
Índice de Tabelas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	xiii
Índice de Figuras	-	-	-	-	-	-	-	-	-	xiv
1. Introdução -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
1.1 Contextualização do Projecto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
1.2 Objectivo do Projecto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
1.3 Organização do Projecto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
2. Manutenção e Fiabilidade: Estado-da-arte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
2.1. Manutenção	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
2.1.1 Evolução da Importância da Função Manutenção	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
2.1.2 Objectivos da Manutenção	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
2.1.3 Funções da Manutenção	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
2.1.4 Tipos da Manutenção	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
2.1.5 Técnicas de Inspeção	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
2.2 Fiabilidade	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
2.2.1 Definições de Falha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
2.2.2 Causas de Falha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
2.2.3 Sistemas Reparáveis e Não Reparáveis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
2.2.4 Estatística e Fiabilidade	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
2.2.4.1 Métodos Estatísticos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
2.2.4.2 Lei Normal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
2.2.4.3 Lei Weibull	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
2.2.5 Tratamento da Informação	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15
2.2.6 <i>Proportional Hazards Modelling</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16
3. Metodologia de Análise Desenvolvida e sua Aplicação	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19
3.1 Definição do Sistema	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
3.1.1 Aero-Arrefecedores	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
3.2 Descrição Funcional do Sistema	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24
3.3 Diagrama Funcional do Sistema	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25

3.4 Divisão do Sistema/Diagrama Mecânico-	-	-	-	-	-	-	-	25
3.5 Características mecânicas dos componentes considerados relevantes								
para o estudo -	-	-	-	-	-	-	-	26
3.6 Realização da análise FMEA	-	-	-	-	-	-	-	26
3.7 Realização da árvore de falhas (FTA)	-	-	-	-	-	-	-	27
3.8 Análise de Fiabilidade	-	-	-	-	-	-	-	29
3.9 Análise individual dos modos de falha prioritários	-	-	-	-	-	-	-	36
3.10 Plano de Estudo -	-	-	-	-	-	-	-	42
3.10.1 Monitorização de vibrações	-	-	-	-	-	-	-	43
3.10.2 Análise de Avarias	-	-	-	-	-	-	-	47
3.10.2.1 Análise de Avarias – Caso A	-	-	-	-	-	-	-	47
3.10.2.2 Análise de Avarias – Caso B	-	-	-	-	-	-	-	50
3.10.3 Análise à inspecção por vibrações para Aero-Arrefecedores	-	-	-	-	-	-	-	55
3.10.4 Análise às intervenções de manutenção	-	-	-	-	-	-	-	57
3.10.4.1 Manutenção de rolamentos do motor eléctrico	-	-	-	-	-	-	-	57
3.10.4.2 Importância do alinhamento preciso de polias-	-	-	-	-	-	-	-	58
3.10.4.3 Manutenção contra a Corrosão -	-	-	-	-	-	-	-	61
3.10.5 Análise ao Projecto	-	-	-	-	-	-	-	63
3.10.5.1 Rigidez da Estrutura ao Suporte do Motor Eléctrico	-	-	-	-	-	-	-	63
4. Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros	-	-	-	-	-	-	-	65
4.1 Conclusões	-	-	-	-	-	-	-	65
4.2 Sugestões de trabalhos futuros	-	-	-	-	-	-	-	66
5. Bibliografia	-	-	-	-	-	-	-	67
Anexo A	-	-	-	-	-	-	-	69
Anexo B	-	-	-	-	-	-	-	71
Anexo C	-	-	-	-	-	-	-	73
Anexo D	-	-	-	-	-	-	-	77
Anexo E	-	-	-	-	-	-	-	86
Anexo F	-	-	-	-	-	-	-	95

Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Exemplo de formato da FMEA adaptada	27
Tabela 3.2. Símbolos FTA	28
Tabela 3.3. Identificação dos modos de falha prioritários	35
Tabela 3.4. Parâmetros Weibull	38
Tabela 5.1. Unidades da Fábrica de Combustíveis	70
Tabela 5.2 Capacidades de Produção da Unidade 3000	70
Tabela 5.3. Características dos Motores Eléctricos	73
Tabela 5.4. Características das correias	74
Tabela 5.5. Características das polias	74
Tabela 5.6. Características das pás	75
Tabela 5.7. Análise FMEA teórica	77
Tabela 5.8 Análise FMEA Real	86

Índice de Figuras

Figura 2.1. Objectivos da manutenção	4
Figura 2.2. Curva da banheira	12
Figura 2.3. Distribuição dos tempos [4]	13
Figura 2.4. Influência do parâmetro β no gráfico da função densidade de probabilidade [4]	15
Figura 2.5. Gráfico. Falha vs tempo (intervalo de manutenção programada 1000h)	16
Figura 3.1. Utilização típica dos aero-arrefecedores [18]	20
Figura 3.2. Aspiração Forçada	21
Figura 3.3. Aspiração Induzida	21
Figura 3.4. Aero-Arrefecedor da fábrica de combustíveis – aspiração induzida	22
Figura 3.5. Subsistemas do aero-arrefecedor	23
Figura 3.6. Subconjuntos do Aero-Ventilador	23
Figura 3.7. Subsistema – Permutador	24
Figura 3.8. Diagrama Funcional do aero-arrefecedor	25
Figura 3.9. Diagrama funcional geral	25
Figura 3.10. FTA para o subsistema – Permutador	29
Figura 3.11. Número de avarias e taxa de avarias	30
Figura 3.12. Número de falhas por modo de falha	31
Figura 3.13. Número de falhas por componente por aero-arrefecedor	32
Figura 3.14. Número de falhas por potência de motor eléctrico	33
Figura 3.15. Número médio de falhas por tipo de pá	33
Figura 3.16. Número médio de falhas com ou sem variadores	33
Figura 3.17. MTTR por modo de falha	34
Figura 3.18. Indisponibilidade anual por modo de falha	35
Figura 3.19. Número de falhas por aero-arrefecedor (RD)	36
Figura 3.20. Distribuição de falhas no tempo (RD)	37
Figura 3.21. Distribuição Weibull	37
Figura 3.22. Número de falhas por aero-arrefecedor (CD)	38
Figura 3.23. Distribuição de falhas no tempo (CD)	39
Figura 3.24. Número de falhas por aero-arrefecedor (CMT)	39
Figura 3.25. Distribuição de falhas no tempo (CMT)	40
Figura 3.26. Número de falhas por aero-arrefecedor (PMPD)	40

Figura 3.27. Distribuição de falhas no tempo (PMPD)	41
Figura 3.28. Descrição do Plano de Intervenção	42
Figura 3.29. Efeito de vibração num sistema mecânico	43
Figura 3.30. Posições de medição de vibrações nos motores eléctricos	44
Figura 3.31. Obtenção e medição de vibração	44
Figura 3.32. Espectro envolvente – defeito BPOR [26]	46
Figura 3.33. Metodologia utilizada na análise de avarias	47
Figura 3.34. Espectro envolvente [g's] (1H)	48
Figura 3.35. Anel superior (1)	49
Figura 3.36. Anel superior (2)	49
Figura 3.37. Correia desgastada (2)	49
Figura 3.38. Correia desgastada (1)	49
Figura 3.39. Polia danificada (1)	50
Figura 3.40. Polia danificada (2)	50
Figura 3.41. Espectro velocidade [mm's] (1V)	51
Figura 3.42. Espectro velocidade [mm's] (2A)	52
Figura 3.43. Espectro envolvente [g's] (2H)	52
Figura 3.44. Anel inferior do rolamento	53
Figura 3.45. Anel superior do rolamento	53
Figura 3.46. Polia danificada (1)	54
Figura 3.47. Polia danificada (2)	54
Figura 3.48. Localização de acelerómetros (horizontal, vertical)	55
Figura 3.49. Localização de acelerómetros nas chumaceiras	56
Figura 3.50. Aquecedor por indução	57
Figura 3.51. Montagem de rolamento (1)	57
Figura 3.52. Montagem de rolamento (2)	58
Figura 3.53. Montagem de rolamento (3)	58
Figura 3.54. Desalinhamento típico.	59
Figura 3.55. Espectro velocidade [mm's] (2V)	60
Figura 3.56. Vista inferior do aero-arrefecedor	60
Figura 3.57. Corrosão uniforme no chassis	61
Figura 3.58. Corrosão no chassis	61
Figura 3.59. Suporte do motor eléctrico da unidade 3000.	63
Figura 3.60. Suporte do motor eléctrico da unidade 1200.	63

Figura 3.61. Comparação de unidades 1200 e 3000	64
Figura 5.1. Refinaria do Porto	69
Figura 5.2. Logótipo da Galp Energia	69
Figura 5.3. Diagrama Mecânico geral	71
Figura 5.4. Diagrama Mecânico do subsistema – Sistema de Lubrificação	71
Figura 5.5. Diagrama Mecânico do subsistema – Permutador	71
Figura 5.6. Diagrama Mecânico do subsistema – Estrutura	71
Figura 5.7. Diagrama Mecânico do subsistema – Aero-Ventilador	72
Figura 5.8. Forma da correia em forma em V	74
Figura 5.9. Forma das pás	75
Figura 5.10. Forma da estrutura do permutador	76
Figura 5.11. FTA inicial	87
Figura 5.12. FTA do subsistema transmissão	87
Figura 5.13. FTA do subsistema Ventilador	87
Figura 5.14. FTA do subsistema Accionamento	87
Figura 5.15. FTA do subsistema Permutador	87
Figura 5.16. FTA do subsistema Estrutura	87
Figura 5.17. FTA do subsistema do Sistema de Lubrificação	87

1. Introdução

1.1 Contextualização do Projecto

O projecto final de 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com possível realização numa empresa, permitiu que o mesmo fosse realizado na área de Fiabilidade da Galp Energia.

Um projecto universitário final, no campo da Engenharia Mecânica, ao ser realizado numa empresa de produção intensiva, em especial num Departamento tão específico como o de Fiabilidade, revelou-se interessante e, ao mesmo tempo, desafiador. Foram analisados indicadores de condição dos aero-arrefecedores em operação intensiva, quer tenham sido realizados pelo próprio departamento, quer tenham sido realizados por empresas externas. Foram abordadas todas as problemáticas o mais cientificamente possível, usando o conhecimento e o engenho da forma mais correcta.

O projecto teve como data de início 14 de Setembro de 2009 e terminou a 12 de Fevereiro de 2010 nas instalações da Galp Energia na Refinaria do Matosinhos. Durante 5 meses, inúmeras tarefas e estudos foram desenvolvidos. Foram analisados problemas puramente técnicos no terreno, no sentido de colaborar na obtenção da causa provável.

A manutenção é uma das funções mais importantes de uma empresa, e também uma das mais dispendiosas, como tal deve ser merecedora de especial atenção. A disponibilidade, a qualidade e eficiência das máquinas/equipamentos e outros equipamentos produtivos têm neste contexto um papel determinante na competitividade da empresa. Quando se constata o impacto da Manutenção nos custos de fabrico, na qualidade do produto, na flexibilidade e rapidez de resposta a encomendas e na diminuição de prazos de entrega, compreende-se quanto é importante implementar uma política eficaz na empresa.

Para realizar uma manutenção bem programada e organizada, é necessário conhecer os componentes e modos de falha críticos do sistema. É neste contexto que esta dissertação se

insere, aliada aos interesses da Refinaria do Matosinhos, e desenvolve uma metodologia de análise de manutenção e fiabilidade aos aero-arrefecedores.

1.2 Objectivos do Projecto

Segundo a Refinaria do Matosinhos, a fiabilidade e manutenção dos aero-arrefecedores da unidade 3000 da Fábrica de Combustíveis pode ser melhorada.

A primeira fase do projecto tem como objectivo a avaliação da fiabilidade dos aero-arrefecedores. Esta avaliação requer que o aero-arrefecedor seja descrito mecanicamente e funcionalmente. De seguida, é necessário contabilizar e categorizar o histórico de avarias através da utilização dos registos de manutenção, que inclui o programa SAP e relatórios de inspecção dinâmica. Após esta contabilização é necessário a descrição dos modos de falha existentes, utilizando a análise FMEA, e calcula-se, de seguida, os indicadores de fiabilidade. Finalizando esta primeira fase, solicita-se que se analise criticamente todos os resultados obtidos.

A segunda fase do projecto tem como objectivo a avaliação dos procedimentos e intervenções existentes, através de observação de procedimentos de manutenção e metodologias de inspecção, fazendo-se, depois, uma análise crítica.

Na fase final, propõem-se melhorias e alterações aos processos actualmente existentes.

1.3 Organização do Projecto

De acordo com os objectivos do projecto propostos, este trabalho está dividido em três partes:

- **Manutenção e Fiabilidade: Estado-da-arte.** Neste capítulo fez-se uma breve descrição bibliográfica de manutenção e fiabilidade, pormenorizando mais os temas que foram considerados pertinentes no desenvolvimento deste trabalho.
- **Desenvolvimento da Metodologia e Aplicação.** Neste capítulo desenvolve-se e aplica-se uma metodologia de análise, de modo a cumprir os objectivos propostos. Define-se, também, neste capítulo, o plano de estudo onde descrevem-se as fases do plano que foi desenvolvido com o principal objectivo melhorar os indicadores de fiabilidade dos aero-arrefecedores.
- **Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros.** Neste capítulo resumem-se as conclusões do projecto em global e o seu possível impacto na empresa. São mencionados estudos futuros considerados interessantes.

2. Manutenção e Fiabilidade: Estado-da-arte

Neste capítulo é realizado um resumo sobre manutenção e fiabilidade, focando temas que se consideram pertinentes na realização da presente dissertação.

A globalização e o contexto de competitividade nos mercados actuais lançam um desafio cada vez mais exigente e real para as organizações. A entrega ao cliente do produto ou serviço que este pretende, com a qualidade exigida assegurada, e no prazo acordado, é cada vez mais uma questão de sobrevivência, e cada vez menos um factor de diferenciação. Assim, a manutenção tem um papel fulcral no sucesso da organização, capacitando os equipamentos do processo para o desempenho ao nível que lhes é exigido [1] .

2.1. Manutenção

A Manutenção, a nível industrial e segundo a AFNOR [2], pode ser definida como um conjunto de acções que permitem manter ou restabelecer um bem num estado específico, ou com possibilidade de assegurar um determinado serviço.

Pode ser definida, também, como a combinação de todas as acções técnicas e administrativas, incluindo as acções de supervisão, com o objectivo de manter ou repor o produto num estado no qual pode executar uma determinada função [3].

2.1.1 Evolução da Importância da Função Manutenção

Os equipamentos de produção têm sofrido ao longo dos tempos evoluções importantes [4]:

- a) Os equipamentos de produção são cada vez mais automatizados. Tornam-se mais compactos, mais complexos e são utilizados mais intensamente;

- b) Os equipamentos são mais dispendiosos (investimentos mais elevados) e com períodos de amortização mais pequenos;
- c) Os tempos de indisponibilidade sobre um “processo” são economicamente mais críticos que sobre um parque de máquina em linha;
- d) A exigência imposta por novos métodos de gestão de produção. Assim, o *Just-in-time* exige a eliminação total dos problemas e avarias das máquinas.

2.1.2 Objectivos da Manutenção

Depois de se ter assumido a importância da manutenção, como qualquer outra actividade da empresa, terá de conduzir-se por uma estratégia definida e devidamente integrada no plano estratégico da empresa. Essa estratégia é influenciada por factores internos e externos à empresa, como está resumido na figura 2.1, e que, depois de estabelecida, serão desenvolvidas políticas adequadas [5].

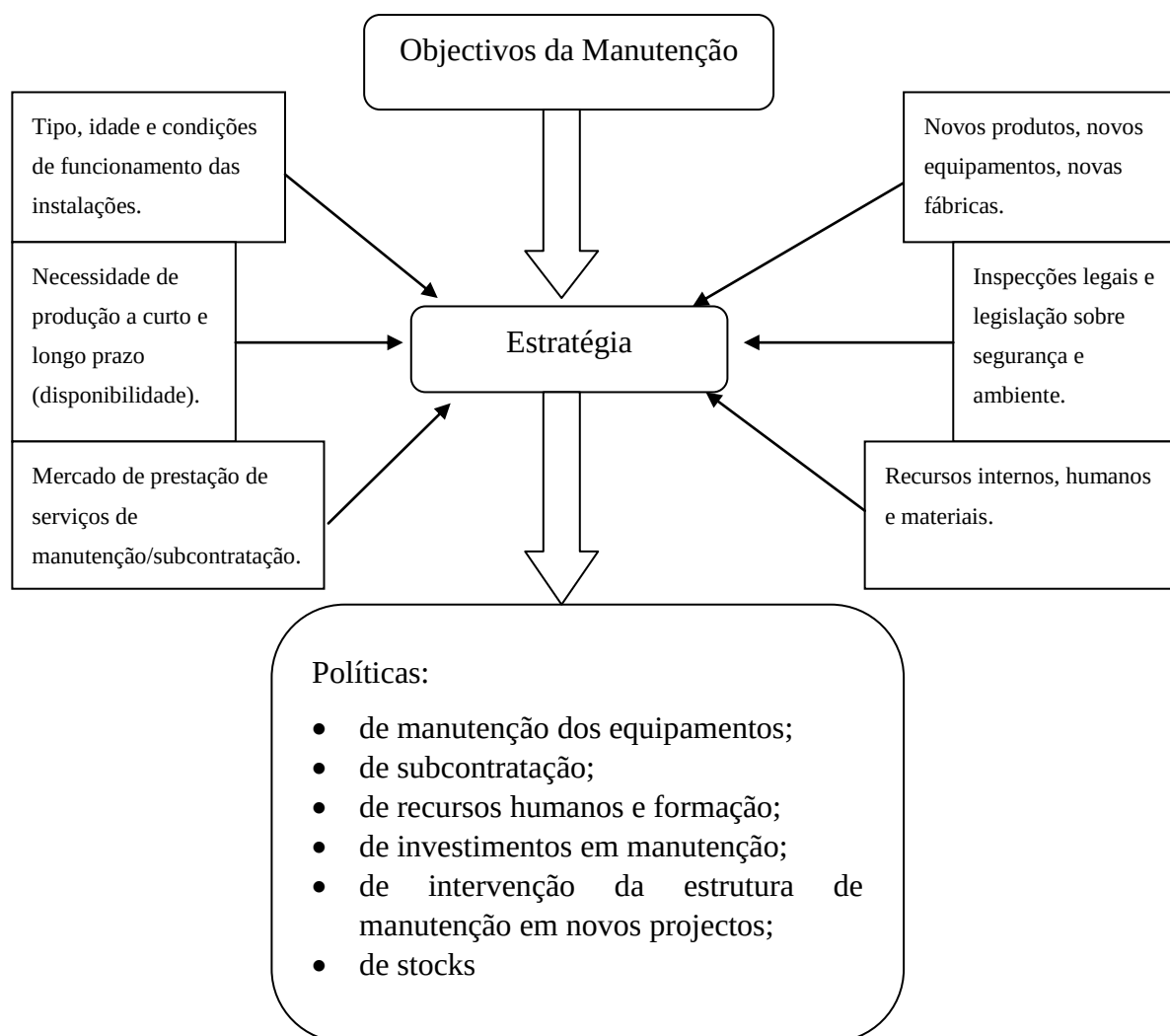


Figura 2.1. Objectivos da manutenção

O papel fundamental de um Departamento de Manutenção é, então, o de manter os equipamentos de uma empresa a funcionar de modo adequado e eficaz à sua missão produtiva, com um custo mínimo [4].

2.1.3 Funções da Manutenção

As funções da manutenção podem dividir-se em dois grandes grupos – funções primárias e funções secundárias.

As funções primárias são [6]:

- Manter, reparar e inspeccionar equipamentos e instalações;
- Garantir a geração e distribuição dos serviços eléctricos, ar comprimido, água ou gás;
- Modificar, instalar ou remover equipamentos;
- Garantir a instalação de novos equipamentos, edifícios ou melhorar os mesmos;
- Desenvolver programas de manutenção preventiva bem planeados;
- Desenvolver estudos e acções de manutenção preventiva;
- Selecção, formação e treino pessoal.

As funções secundárias são [6]:

- Assegurar, do ponto de vista técnico, a compra de novos equipamentos;
- Fazer pedidos de reposição de ferramentas ou material;
- Controlar e assegurar um inventário de reposição de materiais;
- Manter em bom estado os equipamentos de segurança e demais sistemas de protecção;
- Qualquer outro serviço delegado pela administração.

2.1.4 Tipos de Manutenção

Existem dois grandes grupos que se podem descrever [4]:

- Manutenção curativa – Manutenção efectuada após a avaria.
- Manutenção preventiva – Manutenção efectuada com intenção de reduzir a probabilidade de avaria de um bem ou de um serviço prestado.

A manutenção curativa é efectuada após a constatação de uma anomalia num órgão, com o objectivo de restabelecer as condições que lhe permitam cumprir a sua missão. Se a anomalia se verificar de forma catastrófica, pode dizer-se que ocorreu uma avaria e a manutenção tem de intervir de emergência. Se a anomalia se revelar de forma progressiva, a intervenção da manutenção pode ser planeada para o momento mais oportuno [7].

Divide-se, assim, a manutenção curativa em dois grupos: Paliativa (“desenrascar”) e Curativa (“reparar”).

A manutenção preventiva é sempre planeada, podendo ser sistemática ou condicionada [8]:

- Preventiva sistemática – é uma manutenção periódica realizada em intervalos constantes;
- Preventiva condicional – recorre a meios de vigilância sistemáticos para determinar qual é a oportunidade certa para intervir em determinado componente para evitar que falhe. Se funcionar bem não se actua; intervém-se apenas quando houver indícios de mau funcionamento ou aproximação de avaria.

O conceito de manutenção preventiva tem vindo a afirmar-se como uma das ideias base de suporte ao sempre crescente esforço de racionalização e optimização do esforço de manutenção. Tudo se resume à utilização de indicadores externos que possam, não só caracterizar o estado interno de um equipamento, mas também prever a sua tendência de evolução. Conseguir-se-á, assim, evitar acções de manutenção desnecessárias e/ou contraproducentes, minimizando simultaneamente a probabilidade de avaria por falta de manutenção.

Uma política de manutenção eficaz consiste em colocar, de acordo com cada tipo de equipamento (conjunto, subconjunto, parte), a parcela de manutenção preventiva que é requerida em função dos objectivos humanos, técnicos e económicos que são definidos, entendidos, admitidos e realizáveis pela equipa de manutenção [9].

A possibilidade de diagnóstico de avarias, através de técnicas de inspecção, melhora a fiabilidade do sistema, uma vez que é possível planear as intervenções de manutenção de uma forma mais distribuída e gerir de forma mais eficiente o stock de peças de substituição e os recursos humanos [5].

2.1.5 Técnicas de Inspeção

A existência de equipamentos de diagnóstico tecnologicamente evoluídos permite o recurso a diversas técnicas que podem ser utilizadas na manutenção condicionada, no controlo de condição ou no diagnóstico dos equipamentos.

Existe uma série de técnicas de controlo da condição das máquinas e equipamentos com aplicação na manutenção, das quais se destacam [8]:

- Análise de vibrações: técnica de grande expressão que pode ser executada com equipamentos portáteis ou através de sensores fixos (monitorização em contínuo), em pontos pré-definidos. A informação é enviada para uma unidade de controlo, onde foram introduzidos os valores máximos de alerta ou paragem. A evolução dos valores recolhidos permite ajustar os limites pré-definidos [10]. Terá um desenvolvimento mais detalhado no capítulo 3;
- Análise do lubrificante: é uma técnica não destrutiva bastante eficiente, que permite diagnosticar o estado de qualquer componente lubrificado, uma vez que as partículas metálicas geradas pelo processo de desgaste vão sendo incorporadas no lubrificante. O mapa metalográfico possibilita a determinação das zonas ou

elementos que estão com um processo de desgaste acelerado. Permite, também, acompanhar o estado de condição do lubrificante. As análises devem ser feitas a partir de uma amostra recolhida sob condições bem definidas;

- **Análise de parâmetros:** trata-se de uma técnica muito utilizada, por exemplo na verificação da eficiência dos motores. A medição da taxa de compressão, das rotações do motor, da corrente absorvida pelo motor de arranque e respectiva rotação, da pressão no colector de admissão, etc., são alguns dos parâmetros que determinam o bom desempenho do motor;
- **Termografia:** é uma técnica de diagnóstico que, pela análise das temperaturas dos componentes, permite detectar zonas de aquecimento excessivo;
- **Inspecção visual:** é extremamente importante em qualquer programa de manutenção condicionada. A experiência e boa memória dos técnicos é fundamental. Permite detecção de sintomas, tais como fugas, desaperto de componentes, fissuras, etc.;
- **Ultra-sons:** Técnica apropriada para a detecção de fugas de gases ou líquidos em tubos, válvulas e acessórios de montagem e, também, para a medição de espessuras de chaparia, tubos e reservatórios [8].

2.2 Fiabilidade

“Desde que o homem inventou ferramentas, tornou-se dependente delas para conseguir trabalhar devidamente. Assim nasceu o conceito de fiabilidade!” [11].

A fiabilidade de um produto é a medida da sua capacidade para desempenhar a sua função quando necessário, para um tempo específico num ambiente particular [12].

Pode-se definir fiabilidade como a probabilidade dum sistema poder executar uma função requerida sob determinadas condições durante um dado intervalo de tempo (t_1, t_2) [3].

Com o propósito de produzir bons produtos com elevada qualidade em sistemas de produção altamente confiáveis, a fiabilidade tem ganho grande importância com as recentes inovações tecnológicas. Com esta nova ideia de aposta no correcto funcionamento de equipamentos, a fiabilidade conjugada com a manutenção ganham um papel primordial em qualquer empresa. Para obter uma política óptima de manutenção, é preciso primeiro determinar a fiabilidade do sistema, disponibilidade e *Mean time between failure* (MTBF) [13].

O aparecimento de falhas, bem como os seus tempos de ocorrência são variáveis que raramente se podem prever com precisão. A fiabilidade é, assim, um ponto de engenharia incerto. Se um componente vai trabalhar por um período particular, é uma questão que pode ser respondida pela probabilidade [14].

A fiabilidade pode, também, ser expressa como o número de falhas durante um período. A durabilidade é um aspecto particular da fiabilidade que está relacionada com a capacidade de um componente resistir ao efeito do tempo (ou distância percorrida, ciclos de operação, etc.), dependente de mecanismos, tais como fadiga, desgaste, corrosão,

mudança de parâmetros eléctricos, etc. Expressa-se durabilidade, também, como o tempo mínimo anterior de falha de um componente [14].

Os objectivos da fiabilidade em engenharia, por ordem de prioridade são:

1. Aplicar o conhecimento de engenharia e técnicas especiais para prevenir ou para reduzir a probabilidade ou frequência de falhas;
2. Identificar e corrigir as causas de falhas que ocorrem;
3. Determinar como lidar com as falhas que acontecem, se as suas causas não foram corrigidas;
4. Aplicar métodos para estimar a fiabilidade de novos projectos, e analisar a fiabilidade de projectos com históricos.

A razão para esta análise de prioridade tem como causa a forma eficaz de trabalho, em termos de minimização de custos e produção de produtos fiáveis [14].

2.2.1 Definições de Falha

Sob o conceito de fiabilidade, considera-se que falha da função requerida significa: cessão de funcionamento ou, mais frequentemente, degradação de um parâmetro de funcionamento até um nível considerado insatisfatório.

A falha de um componente pode acontecer de forma súbita, denominando-se falha catastrófica. Se a falha de um componente for lenta e progressiva é intitulada falha por degradação.

A falha catastrófica resulta da variação súbita de uma ou mais características do componente, inutilizando-o. A sua ocorrência é casual e, logo, imprevisível.

A falha por degradação resulta da variação progressiva de uma ou mais características de um componente, para além dos seus limites de resistência. Estas falhas manifestam-se sobretudo em componentes de equipamentos que se encontram em contacto com o produto que fabricam. Embora se verifiquem aleatoriamente, estas falhas podem ser previstas e, logo, evitadas através de manutenção preventiva [7].

Embora o tempo de falha de um bem seja aleatório, a derradeira falha de um bem que está em serviço é certa. Cada bem, não importando a qualidade de projecto, fabricação ou manutenção, falhará mais cedo ou mais tarde [15].

Os conceitos falha e avaria são distintos. O termo avaria refere-se não só à ocorrência de uma falha, mas integra, também, a consequência da paragem do equipamento. A avaria é, portanto, um caso particular de falha [7].

2.2.2 Causas de Falha

Existem muitas razões para que um componente possa falhar. “O conhecimento, na medida do possível, das causas potenciais das falhas é fundamental para as prevenir”. Raramente, é possível antecipar as causas de falhas, por isso é necessário também ter em

conta a incerteza envolvida. O grande esforço da fiabilidade, durante o projecto, é realizar um estudo intensivo que deverá abordar todas as causas previstas e imprevisas que poderão ocorrer, com o intuito de as minimizar [14].

As principais razões pelas quais ocorrem falhas são [14]:

1. O projecto pode ser inerentemente incapaz. Pode ser muito fraco, consumir muita potência, sofrer ressonância em frequência errada, etc;
2. Um componente pode, de alguma maneira, sofrer excesso de carga. Se a carga aplicada é superior à carga admissível, a falha ocorrerá. Este tipo de falhas não será frequente, desde que o projecto inclua os cálculos de coeficientes de segurança;
3. Falhas causadas pelo desgaste – fadiga de materiais, desgaste entre superfícies de contacto, corrosão, isolamento deteriorado;
4. Falhas podem ser causadas por outros tempos de mecanismos diferentes. Falha na bateria, deformação causada em simultâneo entre altos valores de temperatura com tensão de tracção, como os discos da turbina e ligações soldadas finas, etc.;
5. Falhas causadas por *sneaks*. A *sneak* é uma condição em que o sistema não funciona correctamente, mesmo que, todos os componentes estejam em perfeitas condições;
6. Falhas causadas por erros, tais como especificações incorrectas, erros de projecto ou código de *software*, falha de montagem ou teste, inadequada ou incorrecta manutenção, ou incorrecto uso;
7. Há muitas outras causas potenciais de falhas. As engrenagens podem emitir ruídos, as selagens de óleo podem verter, os monitores podem cintilar, as instruções de operação podem estar erradas ou ambíguas, os sistemas electrónicos podem sofrer interferências electrónicas, etc.

2.2.3 Sistemas Reparáveis e Não Reparáveis

Define-se componente como um conjunto de peças indivisíveis funcionalmente, e sistema como um conjunto de subsistemas que estão interligados por forma a cumprirem uma função específica.

É essencial distinguir entre sistema reparável e não reparável quando se está a prever ou medir a fiabilidade.

Para um sistema não reparável, como por exemplo, uma lâmpada, um transístor ou uma nave espacial não tripulada, a fiabilidade é a probabilidade de sobrevivência, ou seja, da não ocorrência de avarias, durante a vida esperada do sistema ou durante um determinado período da sua vida. A probabilidade instantânea de acontecer a primeira e única avaria, durante a vida do sistema, é designada por *hazard rate* (taxa de avaria). Os valores da vida média, *Mean Time to Failure* (MTTF), percentagem de vida esperada na qual poderia ter ocorrido uma avaria, são outras características de fiabilidade que podem

ser calculadas. Quando uma parte de um sistema não reparável avaria, o sistema avaria, e a sua fiabilidade é, portanto, em função do tempo da ocorrência da primeira avaria.

No caso dos sistemas que são reparados quando avariam, a fiabilidade é a probabilidade da não ocorrência de uma avaria, num determinado período de tempo, quando mais de uma avaria pode ocorrer. Pode ser também designada como *failure rate* (taxa de avaria), ou de *rate of occurrence of failures* (ROCOF). Porém, a taxa de avaria expressa a probabilidade instantânea de avaria por unidade de tempo, quando várias avarias podem ocorrer, em tempo contínuo. Isto significa que nos sistemas reparáveis que contêm uma parte não reparável, esta última contribui com esse montante para a taxa de avaria. A parte que não pode ser reparada não pode ter taxa de avaria, mas nem sempre tem significado prático.

A fiabilidade dos sistemas reparáveis pode ser caracterizada pelo MTBF, mas apenas sob a condição particular de uma taxa de avaria constante. Também é necessário ter em conta a disponibilidade dos itens reparáveis, pois a sua reparação requer tempo. A disponibilidade é afectada pela taxa de ocorrência de avarias e pelo tempo de manutenção [14].

2.2.4 Estatística e Fiabilidade

Existe a necessidade de quantificar o número de avarias no tempo, devido às implicações técnicas, económicas e de segurança que essas avarias podem ter. Essa quantificação pela incerteza, que existe sempre relativamente ao momento em que as avarias vão surgir, envolve sempre métodos estatísticos [4].

A qualidade dum produto é a conformidade a uma especificação à saída da fábrica ($t=0$) e fiabilidade é a capacidade de mantê-la durante a sua “vida de funcionamento” [4].

A disponibilidade (D) pode ser definida como a capacidade do produto se encontrar num estado de executar uma função requerida, sob dadas condições e num determinado momento ou intervalo de tempo, assumindo que os recursos externos necessários são fornecidos [3]. Matematicamente pode ser definida por:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.1)$$

Aumentar a disponibilidade é um objectivo clássico dos serviços de manutenção. Isto implica o aumento da fiabilidade dos equipamentos MTBF e a diminuição dos tempos de intervenção MTTR [4].

Sendo:

$f(t)$ – função densidade de probabilidades de avarias

$F(t)$ – função acumulada de avarias

$R(t)$ – função de fiabilidade

Considerando a variável aleatória (T) até à avaria, verifica-se que a função de repartição desta variável é definida por:

$$F(t) = Prob(T < t) \quad (2.2)$$

A fiabilidade, função complementar de $F(t)$, será:

$$R(t) = Prob(T \geq t) \quad (2.3)$$

A densidade de probabilidade, $f(t)$, derivada da função $F(t)$ é então;

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Para um intervalo de tempo dt

$$Prob(t \leq T \leq t + dt) = f(t)dt \quad (2.5)$$

$f(t)$ exprime a probabilidade de avaria no intervalo de tempo dt . Definindo a taxa de avarias instantânea $\lambda(t)$ como probabilidade da existência de avaria no instante t , na condição de que não tenha havido qualquer avaria até esse instante, verifica-se que:

$$\lambda(t)dt = \frac{F(t + dt) - F(t)}{R(t)} \quad (2.6)$$

em que;

$$R(t) = 1 - F(t) \text{ e } F(t = 0) = 0 \quad (2.7)$$

Então:

$$\lambda(t)dt = \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (2.8)$$

$$\int_0^t \lambda(t)dt = \int_0^t \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (2.9)$$

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \int_0^t -\frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (2.10)$$

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = [\ln(1 - F(t))]_0^t \quad (2.11)$$

$$-e^{\int_0^t \lambda(t)dt} = 1 - F(t) \quad (2.12)$$

donde:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (2.13)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (2.14)$$

$$f(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (2.15)$$

Estas são estas as expressões mais gerais que ligam as leis da fiabilidade à taxa de avarias instantânea, podendo assim ser definida por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.16)$$

A taxa de avarias pode ser decrescente, constante ou crescente. A figura 2.2 representa um padrão de avarias, conhecido por “curva da banheira”, onde cada uma daquelas variações corresponde a um período distinto, juventude, maturidade e obsolescência do sistema. No maior período representado, período de maturidade ou de vida útil, a taxa de avarias é, aproximadamente, constante, isto é, não depende do tempo. As avarias ocorrem aleatoriamente sendo independentes e identicamente distribuídas.

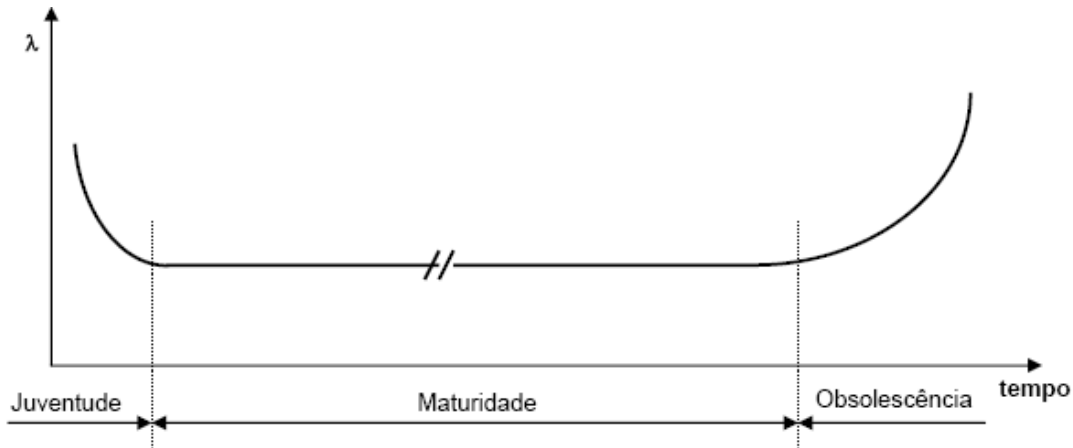


Figura 2.2. Curva da banheira

Em termos práticos, é utilizada a taxa de avarias média que expressa o número de avarias por unidade de operação (dias, quilómetros, ciclos, etc.).

O MTBF, nos itens reparáveis e nos não reparáveis, representa a esperança matemática das avarias. Assim:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.17)$$

O MTBF é um indicador de fiabilidade, podendo ser definido como o inverso da taxa de avarias quando a mesma é constante.

A manutibilidade define-se como a probabilidade de recuperar um sistema e repô-lo nas condições normais de serviço no intervalo de tempo *time to repair* (TTR).

A manutibilidade é, fundamentalmente, uma característica de concepção e fabricação do sistema, onde todos os aspectos que sejam susceptíveis de influenciar a aptidão do mesmo, para receber manutenção, devem ter sido em conta.

O MTTR é o valor médio dos TTR's e pode representar:

- O tempo médio de reparação de uma avaria específica numa população de itens idênticos;
- O tempo médio de reparação de uma avaria num dado equipamento.

A taxa de reparação (μ) pode ser definida como o inverso do MTTR e estima-se, na prática, pela expressão:

$$\mu = \frac{\text{número total de reparações}}{\text{tempo total de reparações}} \quad (2.18)$$

A taxa de reparação e o MTTR são indicadores de manutibilidade.

Na figura 2.3, esquematizam-se os conceitos MTBF e MTTR [4].

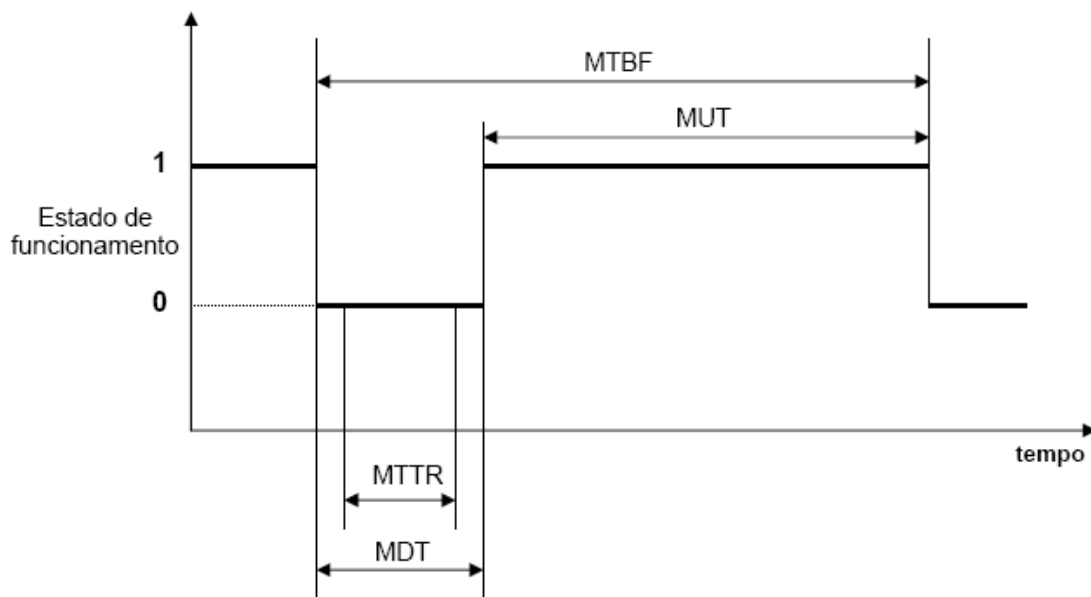


Figura 2.3. Distribuição dos tempos [4]

O *Mean Down Time* (MTD), ou média dos tempos de paragem, corresponde ao período durante o qual o equipamento não se encontra disponível para assegurar a função requerida. Pode ser afectado por inúmeros factores como a dimensão da avaria, o tempo de reacção dos serviços da manutenção, a logística de apoio e a reposição em marcha.

O *Mean Up Time* (MUT), ou média do tempo de funcionamento, corresponde ao período em que o equipamento se encontra disponível para assegurar a função requerida. O MUT pode ser afectado pela ocorrência da avaria, pelos procedimentos de reposição em marcha e pela própria condução do equipamento.

2.2.4.1 Métodos Estatísticos

Não é possível empreender qualquer estudo de fiabilidade sem um suporte estatístico prévio, já que a eventualidade de ocorrência de avaria num determinado intervalo de tempo apenas pode ser expressa como uma probabilidade. Assim, podem mencionar-se três leis (contínuas) clássicas utilizadas em fiabilidade [4]:

- a) Lei exponencial
- b) Lei normal
- c) Lei Weibull

A lei exponencial já foi descrita anteriormente.

2.2.4.2 Lei Normal

Devido à sua forma e às suas propriedades, a distribuição normal é a que mais frequentemente se utiliza para descrever fenómenos que se traduzem através de variáveis aleatórias contínuas. A terceira região da curva da banheira é caracterizada pela distribuição normal sendo, por este motivo, um razoável modelo a aplicar em componentes em fadiga.

A distribuição normal é caracterizada a partir de dois parâmetros:

- Valor esperado (μ , que toma qualquer valor real);
- Variância (σ^2 , que toma qualquer valor real positivo).

A função densidade de probabilidade da distribuição normal é descrita por [16]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(t-\mu)^2\right]}, -\infty < t < +\infty, -\infty < \mu < +\infty, \sigma^2 > 0 \quad (2.19)$$

2.2.4.3 Lei Weibull

É a mais versátil das distribuições utilizadas em análises fiabilísticas com uma vasta gama de aplicações. Pela sua variedade de formas, esta distribuição a três parâmetros [parâmetro de forma β (adimensional), parâmetro de escala η e parâmetro de posição γ] pode ajustar-se a qualquer das regiões da curva em banheira [16]. Assim:

- $\beta < 1$ – taxa de avarias decrescente, região de juventude;
- $\beta = 1$ – taxa de avarias constante, região de maturidade;
- $\beta > 1$ – taxa de avarias crescente, região de envelhecimento.

A figura 2.4 mostra a influência do parâmetro β .

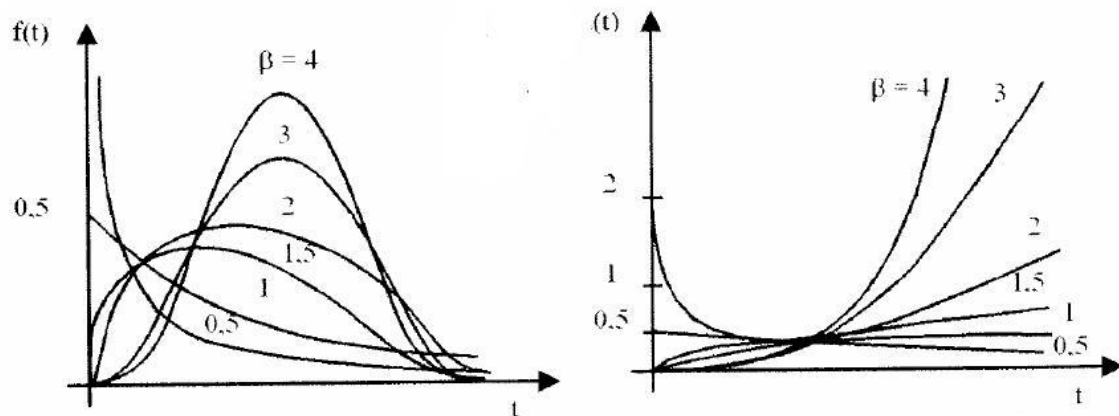


Figura 2.4. Influência do parâmetro β no gráfico da função densidade de probabilidade [4]

A distribuição de Weibull é adequada para sistemas ou equipamentos compostos por diferentes peças ou componentes, cuja falha depende do defeito ou problema mais severo, ou seja, pode representar a função densidade probabilidade do elemento mais fraco.

De entre as suas inúmeras aplicações, destacam-se:

- Resistência à corrosão;
- Tempo até à falha de rolamentos de esferas;
- Tempo até à falha de alguns motores eléctricos;
- Tempo até a falha de componentes de sistemas, mesmo nos casos em que o tempo de falha do sistema segue uma distribuição exponencial.

A função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull é descrita por [16]:

$$f(t) = \frac{\beta}{a} \left(\frac{t-\gamma}{a} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{a} \right)^{\beta}}, t > \gamma, \beta > 0, \alpha > 0, -\infty < \gamma < +\infty \quad (2.20)$$

- γ – Parâmetro de localização: correspondente ao menor valor assumido por t ;
- β – Parâmetro de forma: traduz o mecanismo de degradação física da falha;
- α – Parâmetro de escala: corresponde ao valor característico.

2.2.5 Tratamento da Informação

Com base numa amostra, pode estimar-se qual a forma aproximada da curva de probabilidade acumulada de falha. A partir desta curva, podem calcular-se os valores dos parâmetros da função teórica cuja forma gráfica melhor adira à falha. Este procedimento é tanto mais útil quanto menor for a quantidade de *time to failure* (TTF) disponíveis, pois as previsões de fiabilidade vêm, assim, a sua precisão aumentada [7].

Considera-se informação censurada quando, ao analisar-se os dados sobre os momentos de falha disponíveis de um componente, se constata que alguns não correspondem

verdadeiramente a falhas. É o caso de, por exemplo, o momento em que se inicia as observações (se não tiver coincido com a ocorrência da ultima falha) ou, ainda, o momento em que o componente foi substituído de acordo com uma política de substituição preventiva [7].

Para os casos de informação censurada utiliza-se um método alternativo conhecido por aproximação de *Bernard* [7].

$$F(t_j) = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (2.21)$$

Um aspecto relevante tem a ver com o cálculo dos TTF na abordagem de distribuição de probabilidade através do método Weibull, isto é, é necessário perceber se os TTF's pertencem ao mesmo modo de falha. Assim, é importante que a natureza física das falhas seja investigada, quando os resultados se destinam à engenharia, para a realização de estudos de melhoria [7].

2.2.6 Proportional Hazards Modelling

No contexto de fiabilidade, os históricos de falha são representados como um gráfico de séries temporais, juntamente com outra informação. Como por exemplo, intervalos de manutenção sistemática, mudanças sazonais ou padrões de funcionamento diferentes podem ser demonstrados no gráfico. A figura 2.5 mostra, graficamente, as falhas em função do tempo entre manutenção programada.

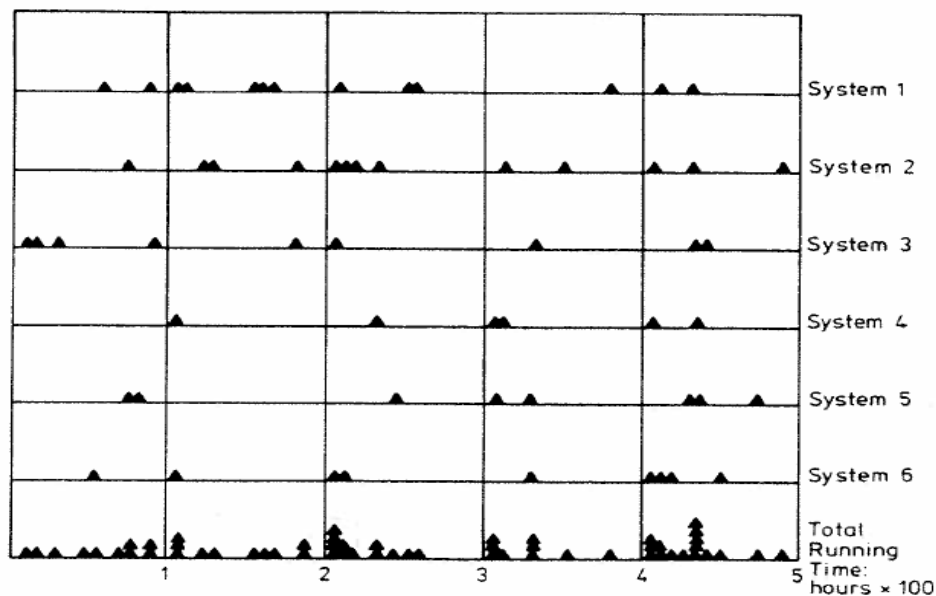


Figura 2.5. Gráfico. Falha vs tempo (intervalo de manutenção programada 1000h)

Pode visualizar-se que existe um padrão de falhas aglomeradas depois de cada manutenção programada para os diversos sistemas. Isto indica que a manutenção programada actual afecta negativamente a fiabilidade. Neste caso, uma investigação

adicional será necessária para determinar as razões para tal acontecer, por exemplo a qualidade das manutenções programadas pode ser inadequada. O facto de aparecerem falhas aglomeradas poderá indicar que as falhas não são sempre diagnosticadas ou não reparadas correctamente na primeira vez.

Este método de apresentação de dados pode ser muito útil para detectar causas da diminuição de fiabilidade em sistemas, tais como frotas de automóveis, unidade de processo industrial, etc. Os dados podem aparecer separadamente para cada item, categoria de utilização, etc., dependendo da situação, e podem ser analisados por conexões ou correlações entre falhas e factores de explicativos.

Proportional hazards modelling (PHM) é uma extensão matemática que tem a forma:

$$\lambda(t; Z_1; Z_2; \dots; Z_k) = \lambda_0(t) \exp(\beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \dots + \beta_k Z_k) \quad (2.22)$$

Onde $\lambda(t; Z_1; Z_2; \dots; Z_k)$ representa a taxa de avaria no tempo t , $\lambda_0(t)$ é a base da taxa de risco, $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ são os factores explicativos (ou co-variáveis) e $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os parâmetros modelo.

No *proportional hazard modelling* presume-se que as co-variáveis têm um efeito multiplicativo sobre a taxa de risco total. Na análise de padrões de regressão ou variância, os efeitos presumem-se de forma aditiva. O pressuposto multiplicativo é realista quando um sistema com diversos modos de falha está sujeito a diferentes níveis de carga tendo efeitos similares em quase todos os modos de falha. A abordagem através deste método pode ser aplicada ao histórico de falhas de sistemas reparáveis e não reparáveis.

Os limites desta aplicação estão inseridos no conhecimento técnico, visto que a derivação dos parâmetros deste modelo requer o uso de *software* avançado de estatística, assim como análises baseadas em processos iterativos [14].

3. Metodologia de Análise Desenvolvida e sua Aplicação

Neste capítulo descreve-se a metodologia desenvolvida e os resultados da sua aplicação. Esta metodologia foi realizada com a finalidade de atingir os objectivos e tarefas propostos. Ao longo do capítulo serão feitas conclusões dos resultados obtidos.

Esta metodologia foi desenvolvida com o principal objectivo de melhorar os indicadores de fiabilidade do aero-arrefecedor. Pode dividir-se em dois grupos – conhecimento do sistema e estudo para melhoria.

A implementação da metodologia, após a análise do histórico, permite identificar os modos de falha e respectivos componentes prioritários de acção. Deste modo, conhecem-se os principais problemas e o estado de funcionamento dos aero-arrefecedores, podendo secundariamente analisá-los e perceber as principais causas destes mesmos problemas.

A metodologia segue a ordem cronológica das seguintes etapas:

1. Definição do sistema;
2. Descrição funcional do sistema;
3. Realização do diagrama funcional do sistema;
4. Divisão do sistema/Diagrama mecânico;
5. Análise das características mecânicas dos componentes considerados relevantes para o estudo;
6. Análise FMEA;
7. Realização da árvore de falhas (FTA);
8. Análise de fiabilidade;
9. Análise individual dos modos de falha prioritários;
10. Definição do plano de estudo.

Durante esta sequência, descreve-se cada ponto detalhadamente de forma teórica e a aplicação ao caso prático – aero-arrefecedor.

3.1 Definição do Sistema

Nesta etapa reúne-se toda a informação relativa ao sistema que permite ao engenheiro da manutenção entender o sistema, o seu contexto operativo, as suas funções e as funções do componentes, bem como as suas ligações funcionais [17].

3.1.1 Aero-Arrefecedores

Os aero-arrefecedores têm um uso comum em aplicações industriais, principalmente onde a água não está disponível como meio de arrefecimento. Mesmo onde a água está disponível, em certos casos, os aero-arrefecedores têm vantagem em aspectos económicos ou razões operacionais, tendo em conta que não utilizam circuitos de água complexos. Os sistemas de água complexos usam elementos, tais como bombas, sistemas de arrefecimento de água, e o seu condicionamento implica grande investimento e, consequentemente, elevados custos de operação e manutenção.

O objectivo do aero-arrefecedor é criar um caudal de ar, com a finalidade de passar na superfície externa de um permutador, onde passa um fluido quente. O caudal referido é produzido através do movimento circular das pás. Assim, a taxa de transferência de calor é função da área da superfície das alhetas do permutador com a velocidade do fluxo de ar.

Os aero-arrefecedores são utilizados principalmente em refinarias sob condições hostis: pressão e temperatura elevadas, assim como quando existe interacção com fluidos e ambientes corrosivos.

A utilização deste tipo de sistema de arrefecimento visa, principalmente, o arrefecimento do produto (hidrocarbonetos). Estes hidrocarbonetos provêm da saída de topo de colunas de destilação como se pode visualizar na figura 3.1, onde o vermelho representa o produto quente e o azul o produto arrefecido [18].

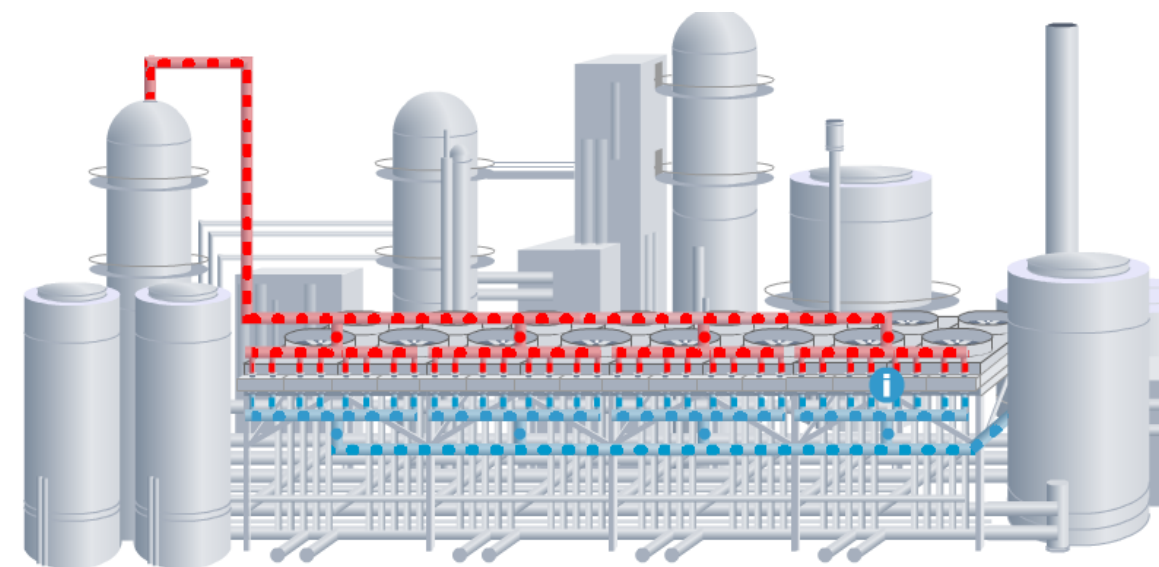


Figura 3.1. Utilização típica dos aero-arrefecedores [18]

O posicionamento da ventoinha do aero-arrefecedor pode ser em linha superior ou inferior, ou seja, o ar é aspirado de forma induzida ou forçada, respectivamente. As figuras 3.2, 3.3 representam as diferentes formas de aspiração do ar.

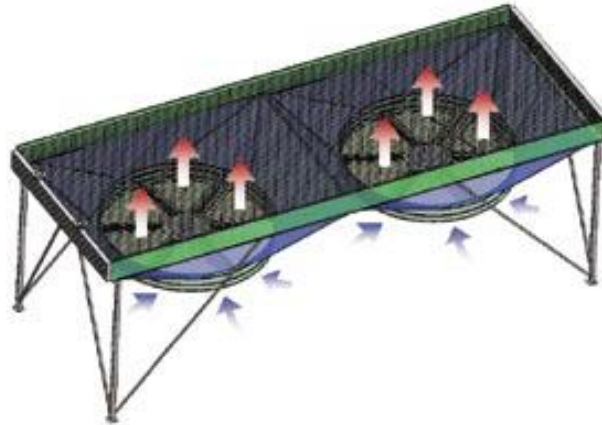


Figura 3.2. Aspiração Forçada



Figura 3.3. Aspiração Induzida

A aspiração induzida apresenta as seguintes vantagens [18]:

- Melhor distribuição do fluxo de ar através do permutador;
- Processo melhor controlado e mais estável, visto que cerca de 60% da área das tubagens está coberta pelo ventilador, reduzindo, assim, os efeitos nocivos provocados pelas condições atmosféricas;
- Maior capacidade de circulação natural do ar em caso de falha ou paragem do aero-arrefecedor, este facto deve-se ao efeito da convecção natural;
- Menor possibilidade de recirculação do ar quente na zona de admissão de ar, visto que o ar é expelido com uma velocidade duas vezes superior em relação ao ar que entra;
- Maior facilidade de acesso às tubagens do permutador, em casos de intervenção da manutenção.

Como desvantagens podem seleccionar-se:

- Menor acessibilidade ao ventilador para se efectuar a sua manutenção;

- O ventilador tem que ser removido para se efectuar a substituição das tubagens;
- A temperatura do ar que circula deve estar limitada a 105°C para prevenir danos nas pás, rolamentos ou outros componentes pelo qual passa o fluxo de ar quente.

Em relação à aspiração forçada pode eleger-se as seguintes vantagens:

- Melhor acessibilidade às pás, chumaceira superior e tubagens para se efectuar a sua manutenção;
- Maior facilidade de suportar temperaturas elevadas que o normal quando o produto está a entrar nas tubagens;
- Custo de aquisição e manutenção inferior em comparação à circulação induzida;

Relativamente às desvantagens podem referir-se:

- Pior distribuição do fluxo de ar através do permutador;
- Tubagens expostas às condições atmosféricas, o que resulta num maior desgaste das tubagens e num processo com menor controlo e menos estável;
- Menor capacidade de circulação natural em caso de paragem do aero-arrefecedor;
- Maior possibilidade de recirculação de ar quente devido a uma velocidade mais baixa de descarga nas tubagens e uma maior velocidade de entrada.

A figura 3.5 é um exemplo da estrutura de aero-arrefecedor de aspiração induzida utilizado na fábrica de combustíveis.



Figura 3.4. Aero-Arrefecedor da fábrica de combustíveis – aspiração induzida

Os aero-arrefecedores da unidade 3000 têm este tipo de estrutura (aspiração induzida). A unidade 3000 é composta por 24 aero-arrefecedores.

O aero-arrefecedor pode dividir-se em quatro subsistemas: Aero-Ventilador, Estrutura, Permutador e Sistema de Lubrificação. A figura 3.5 descreve visualmente alguns dos subsistemas mencionados.

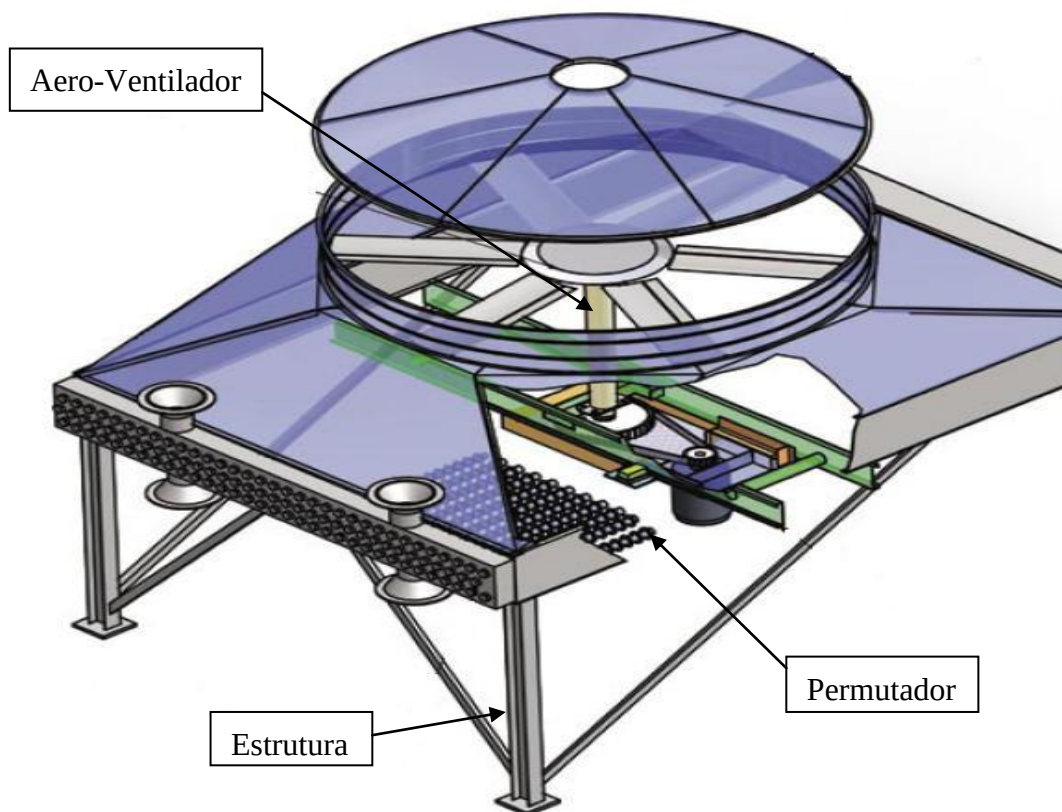


Figura 3.5. Subsistemas do aero-arrefecedor

O subsistema Aero-Ventilador é dividido em três subconjuntos: Ventilador, Transmissão e Accionamento. Na figura 3.6 visualizam-se os subconjuntos referidos. Na figura 3.7 visualizam-se os componentes do subsistema “Permutador”.

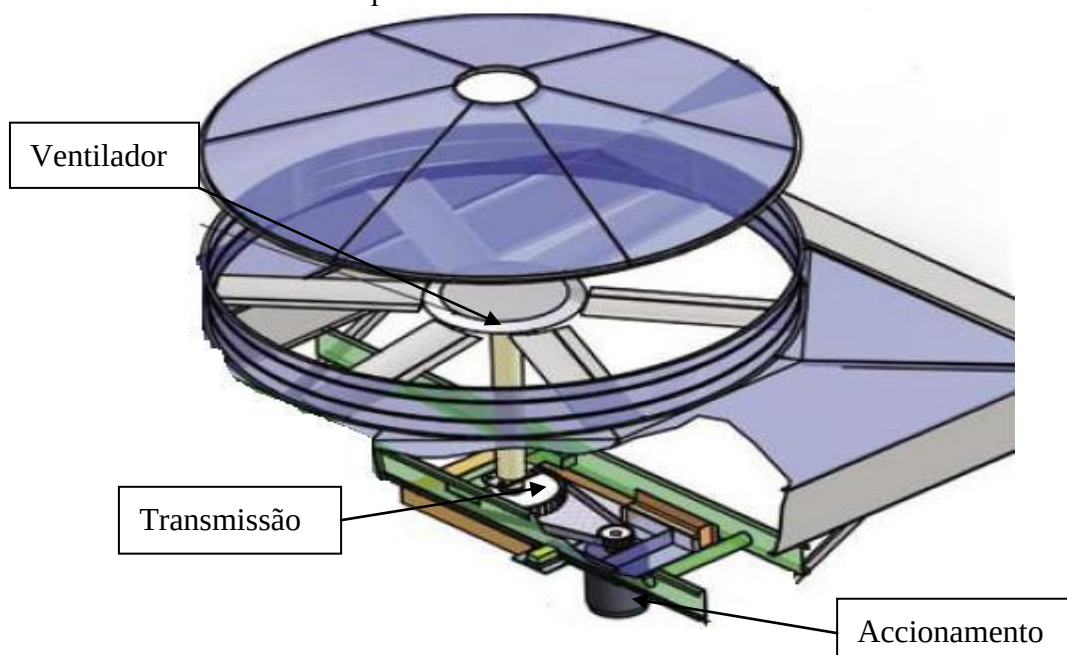


Figura 3.6. Subconjuntos do Aero-Ventilador

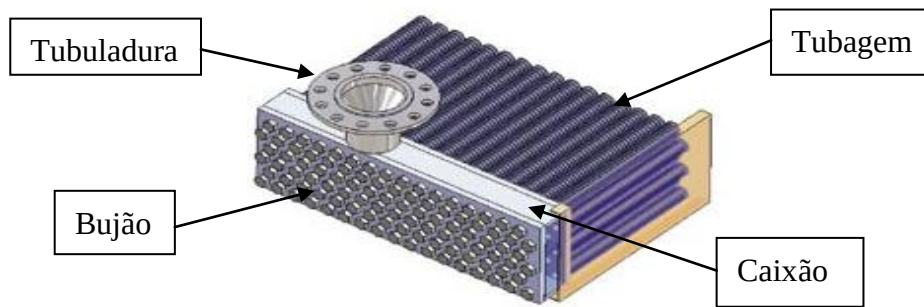


Figura 3.7. Subsistema – Permutador

3.2 Descrição Funcional do Sistema

Para o sistema em análise, a descrição funcional é a seguinte:

- O motor eléctrico transforma energia eléctrica proveniente da rede em energia mecânica;
- A energia mecânica é transmitida do motor eléctrico através do seu veio;
- Através de uma ligação com chaveta entre o veio e a bucha da polia motora, é transferido movimento de rotação para a polia motora;
- A transmissão do movimento da polia motora para a polia conduzida é feita através de uma correia;
- O veio do ventilador recebe o movimento da polia conduzida pela conexão bucha/chaveta;
- O cubo (porta-pás) obtém uma determinada velocidade de rotação, proveniente do veio do ventilador pela ligação bucha/chaveta;
- As pás, que estão encaixadas no cubo, recebem o movimento deste, que por sua vez criam um movimento vertical ao ar;
- O caudal de ar criado entra em contacto com as alhetas de superfície dos tubos do permutador;
- O produto resultante da destilação, entra e sai no permutador através das tubuladuras, e por sua vez é direccionado para dentro dos caixões e seguidamente distribuído pelas tubagens;
- Ocorre uma transferência de calor entre o ar gerado nas pás e o produto que circula no interior dos tubos;
- No final do trajecto tubular o produto entra novamente no caixão, saindo pela tubuladura;
- O ar, após a passagem no permutador, é expelido para atmosfera.

3.3 Diagrama Funcional do Sistema

O diagrama funcional mostra graficamente a relação funcional entre os diferentes subsistemas, permitindo a quem observa identificar rapidamente as funções dos diferentes subsistemas e a sua relação funcional [17].

Na figura 3.8 pode observar-se o diagrama funcional do aero-arrefecedor.

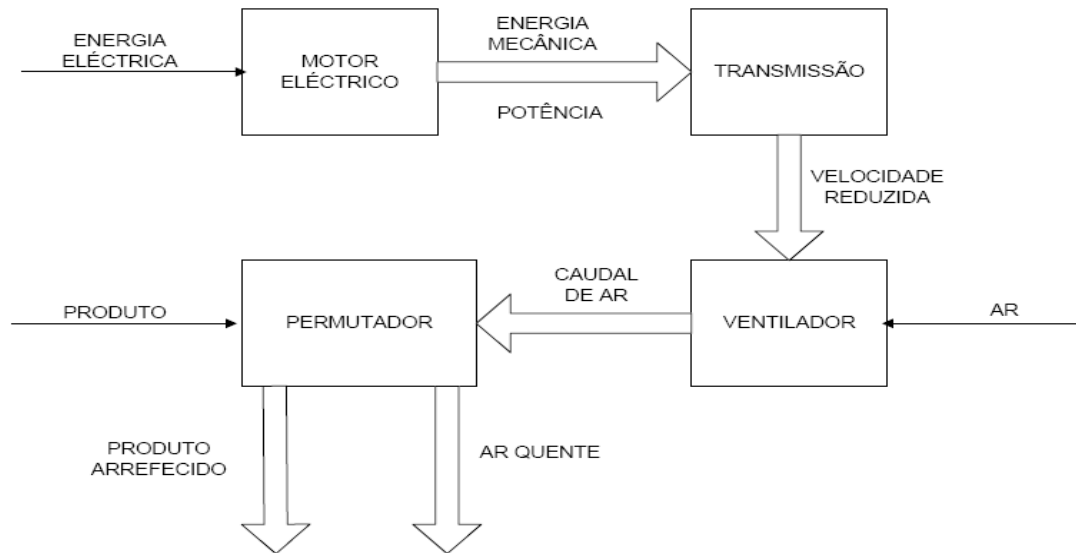


Figura 3.8. Diagrama Funcional do aero-arrefecedor

3.4 Divisão do Sistema/Diagrama Mecânico

Para identificar as diferentes funções dos vários componentes, as ligações funcionais entre eles e os diferentes subconjuntos a que pertencem, é necessário dividir o sistema de uma forma lógica, clara e objectiva, em elementos mais simples, para que seja permitida a sua análise por parte da manutenção [17].

Dividiu-se o sistema em subsistemas, que por sua vez foram divididos em subconjuntos e estes, por fim, em componentes.

Na figura 3.9 pode visualizar-se o início do diagrama funcional.

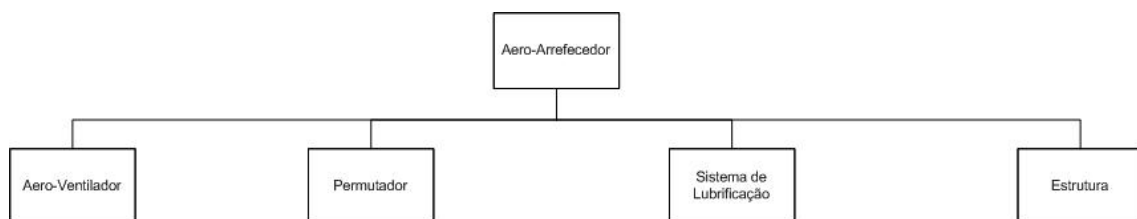


Figura 3.9. Diagrama funcional geral

Os diagramas mecânicos que dão continuidade a este podem ser visualizados no Anexo B.

3.5 Características mecânicas dos componentes considerados relevantes para o estudo

É necessário reunir informação dos componentes que compõem o sistema, para futuras análises de resultados. Também é importante perceber e identificar diferenças de projecto dos aero-arrefecedores na unidade.

As características mecânicas dos componentes podem ser visualizadas no Anexo C.

3.6 Realização da análise FMEA

Failure Modes and Effect Analysis (FMEA) é um procedimento sistemático de análise de um sistema que permite identificar potenciais modos de falha, as suas causas e os efeitos no funcionamento do sistema [19].

Pode definir-se modo de falha como um dos estados possíveis de um produto avariado para uma função requerida [3].

A metodologia FMEA é aplicada a cada sistema, subsistema e componente identificado na definição fronteira. Para cada função identificada podem existir múltiplos modos de falha.

Apesar de existirem vários modos de falha, muitas vezes os efeitos das falhas são os mesmos ou de natureza semelhante. Isto é, numa perspectiva de funcionamento do sistema, o resultado de qualquer falha num componente pode resultar na degradação de uma função do sistema. Da mesma forma, sistemas e máquina semelhantes terão, frequentemente, os mesmos modos de falha. No entanto, o uso do sistema irá determinar as consequências de falha. Por exemplo, os modos de falha de um rolamento de esferas serão os mesmos independentemente da máquina. No entanto, o modo de falha dominante, a causa de falha, e seus efeitos diferem de máquina para máquina [20].

Podem definir-se alguns conceitos específicos utilizados na implementação de uma análise FMEA [21]:

Causa da Falha: Factores como defeitos de projecto, defeitos de qualidade, problemas no processo físico ou químico, ou má aplicação de equipamento são as principais razões para ocorrência de falhas, ou que dão início ao processo físico do qual a deterioração conduz à falha.

Modo de Falha: O modo ou a forma através da qual a falha se manifesta, ou seja, quando é detectada.

Efeito da falha: A(s) consequência(s) que um modo de falha tem na função de um componente, operação ou estado do sistema.

Impacto da Falha: Consequência de um modo de falha e sua frequência de ocorrência.

Falha Desconhecida: Modo de falha em que não existe nenhum método disponível para a sua detecção e forma de alerta do operador.

Realizou-se a análise FMEA teórica aos componentes ou sistemas importantes do aero-arrefecedor e posterior adaptação à realidade. Esta adaptação foi necessária para

melhor definição dos modos de falha na análise dos registos de manutenção. Pode, assim, observar-se os quadros da FMEA teórica e adaptada nos anexos D e E, respectivamente.

A tabela da FMEA adaptada tem o seguinte formato, que pode visualizar-se na tabela 3.1 referente a um exemplo do motor eléctrico.

Tabela 3.1. Exemplo de formato da FMEA adaptada

Sistema/ Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				<i>Subconjunto</i>	<i>Subsistema</i>	<i>Sistema</i>	
Motor Eléctrico	Transformação de energia eléctrica para energia mecânica para efectuar o accionamento	Rolamentos danificados (RD)	Falta de lubrificação	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Desalinhamento dos veios	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por partículas abrasivas, corrosão e humidade	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Na tabela da FMEA adaptada estão, também, definidas siglas dos modos de falha, as quais são utilizadas em alguns gráficos por razões de espaço.

3.7 Realização da árvore de falhas (FTA)

A árvore de falhas é uma técnica gráfica que fornece uma descrição sistemática da combinação de modos de falha dos equipamentos e/ou de falhas humanas, que conduzem a um modo de falha particular de um determinado sistema [17].

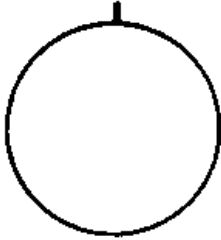
O modo de falha particular desse sistema é designado por “acontecimento principal”, porque é o acontecimento indesejável e responsável pelas consequências mais adversas no sistema. Após a selecção deste acontecimento principal, a árvore de falhas é construída relacionando sequencialmente os acontecimentos dos níveis inferiores, que individualmente ou combinados conduzem a esse acontecimento. Os acontecimentos do nível inferior são denominados acontecimentos de base, porque são acontecimentos independentes uns dos outros e têm probabilidade conhecida. Preocupa-se, assim, com a identificação e análise das condições e factores que causam ou contribuem para a ocorrência da falha do nível superior [17,22].

Para a construção da árvore de falhas utilizam-se quatro elementos: acontecimentos primários, acontecimentos intermediários, portas lógicas e elementos de transferência.

Os acontecimentos primários de uma falha são aqueles que, por qualquer razão, não foram desenvolvidos. Acontecimento intermediário é um acontecimento de falha que ocorre devido a um ou mais causas antecedentes. Todos os acontecimentos intermediários são simbolizados por rectângulos. As portas lógicas mostram a relação entre os acontecimentos que conduzem ao acontecimento do nível seguinte [23].

Na tabela 3.2, estão demonstrados os símbolos mais frequentemente utilizados na construção da árvore de falhas.

Tabela 3.2. Símbolos FTA

	Caixa de descrição dos acontecimentos intermediários e principais. A seguir a estes acontecimentos são colocadas as portas lógicas.
	Caixa de texto de um acontecimento de base.
	O acontecimento que se encontra no nível superior ocorre se todos os acontecimentos do nível inferior ocorrerem. Na presença desta porta lógica para calcular a probabilidade dos acontecimentos superior, multiplicam-se as probabilidades dos acontecimentos do nível inferior.
	O acontecimento que se encontra no nível superior ocorre se pelo menos um dos acontecimentos do nível inferior ocorrer. Na presença desta porta lógica, para calcular a probabilidade do acontecimento superior somam-se as probabilidades dos acontecimentos do nível inferior.
	Indica que a árvore de falha tem mais desenvolvimento.
	Indica que esta parte da árvore de falhas tem outra parte antecedente correspondente.

A análise das árvores de falha deve ser realizada a partir das informações dos acontecimentos de base, isto é, através das probabilidades ou taxas de avarias dos acontecimentos base. Assim, conhecendo as probabilidades ou taxas de avarias dos acontecimentos base é possível determinar as probabilidades ou taxas de avarias dos acontecimentos dos níveis superiores e, conseqüentemente, do acontecimento principal, somando-as ou multiplicando-as, de acordo com a porta lógica de cada acontecimento [17].

Realizou-se a árvore de falhas para os aero-arrefecedores e seus subsistemas. A figura 3.10 é um exemplo do diagrama de árvore de falhas para o subsistema “Permutador”.

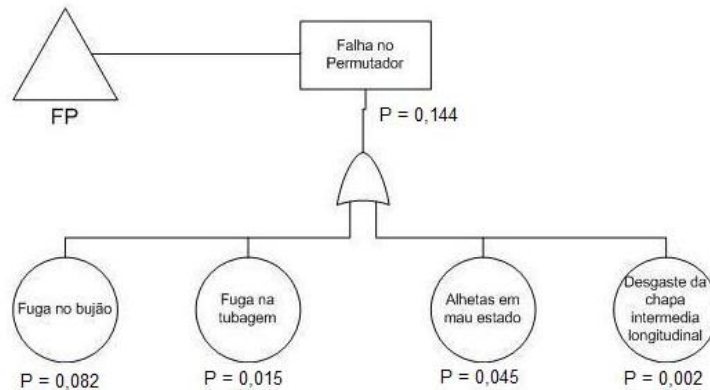


Figura 3.10. FTA para o subsistema – Permutador

Pode observar-se no anexo F os restantes diagramas de árvore de falhas. Procedendo à sua análise, verifica-se que se está na presença de portas lógicas “ou”. Logo, para calcular as probabilidades de avarias do aero-arrefecedor somam-se as probabilidades de avarias dos subsistemas que o compõem e se encontram no nível inferior. Verifica-se, também, que para que um nível falhe é apenas necessário que um nível inferior tenha uma falha.

3.8 Análise de Fiabilidade

Procedeu-se à contabilização do histórico de avarias e falhas dos aero-arrefecedores da unidade 3000. Esta unidade está inserida na fábrica dos combustíveis.

Iniciou-se com uma análise global sobre as avarias dos aero-arrefecedores ao longo dos seis anos e meio. Esta análise consistiu na divisão temporal por semestres, acompanhada pelas taxas de avarias, como se pode observar na figura 3.11.

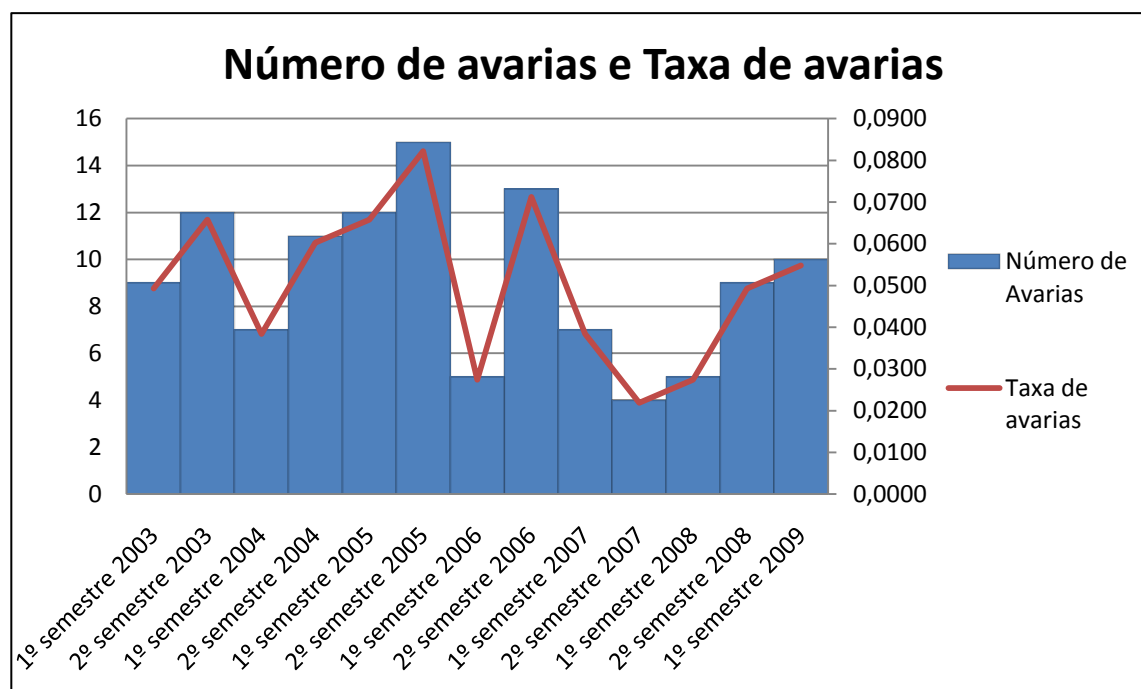


Figura 3.11. Número de avarias e taxa de avarias

Na análise da figura 3.11, constata-se que a taxa de avarias não é constante. Conclui-se, também, que há superioridade do número de avarias do segundo semestre em relação ao primeiro semestre. Isto poderá indicar a influência dos meses mais quentes do ano.

Após a contabilização de avarias, calculou-se o MTBF que tem o valor de 478 dias.

Procedeu-se à análise gráfica, em relação ao número de falhas por cada modo de falha, como se pode observar na figura 3.12.

Para analisar e contabilizar os registos de manutenção, dividiu-se a contabilização em dois tipos de intervenções de manutenção – manutenção tipo A e manutenção tipo B.

A manutenção do tipo A inclui: manutenção curativa e manutenção preventiva condicionada. Por outro lado, a manutenção tipo B consiste na manutenção preventiva sistemática que contém: paragens programadas da unidade, reparação de redes de protecção, reparação de tampas dos ventiladores, reparação de “grasseurs” e reparação de tubos de lubrificação.

Considera-se “paragem programa da unidade”, uma intervenção à unidade 3000 que foi pré-estabelecida pela Refinaria de Matosinhos, com intuito de se efectuar uma manutenção mais detalhada a todo o sistema. Durante o espaço de tempo estudado, ocorreu uma paragem programada da unidade em 2007.

Para uma melhor abordagem de análise e contabilização dos registos de manutenção, considerou-se “falha” quando houve substituição de componentes, durante qualquer manutenção, e “avaría” quando o aero-arrefecedor teve, obrigatoriamente, que parar.

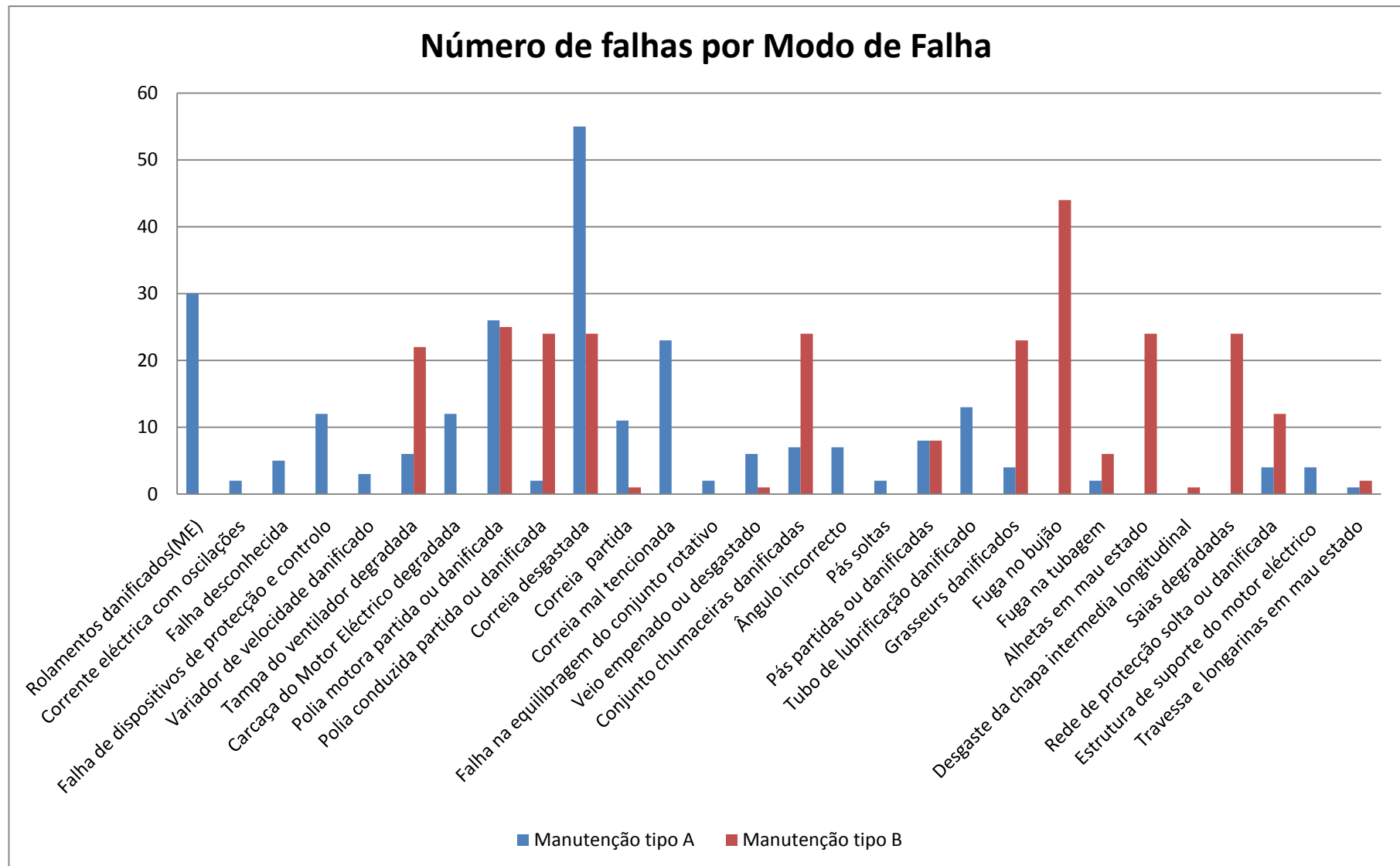


Figura 3.12. Número de falhas por modo de falha

Na parte direita da figura 3.12, estão presentes os modos de falha do subsistema “permutador”. Conclui-se que a manutenção tipo B é quase suficiente para prevenir falhas dos modos de falha pertencentes ao subsistema “permutador”.

Também com a análise da figura 3.12, pode verificar-se que os modos de falha prioritários a nível de fiabilidade são: “rolamentos danificados”, “polia motora partida ou danificada”, “correia desgastada” e “correia mal tensionada”.

Procedeu-se à contabilização do número de falhas por aero-arrefecedor. Esta contabilização teve como principal objectivo identificar os aero-arrefecedores da unidade 3000 críticos, ou seja, aqueles que apresentam maior número de falhas, no espaço de tempo de análise. Esta contabilização está descrita na figura 3.13.

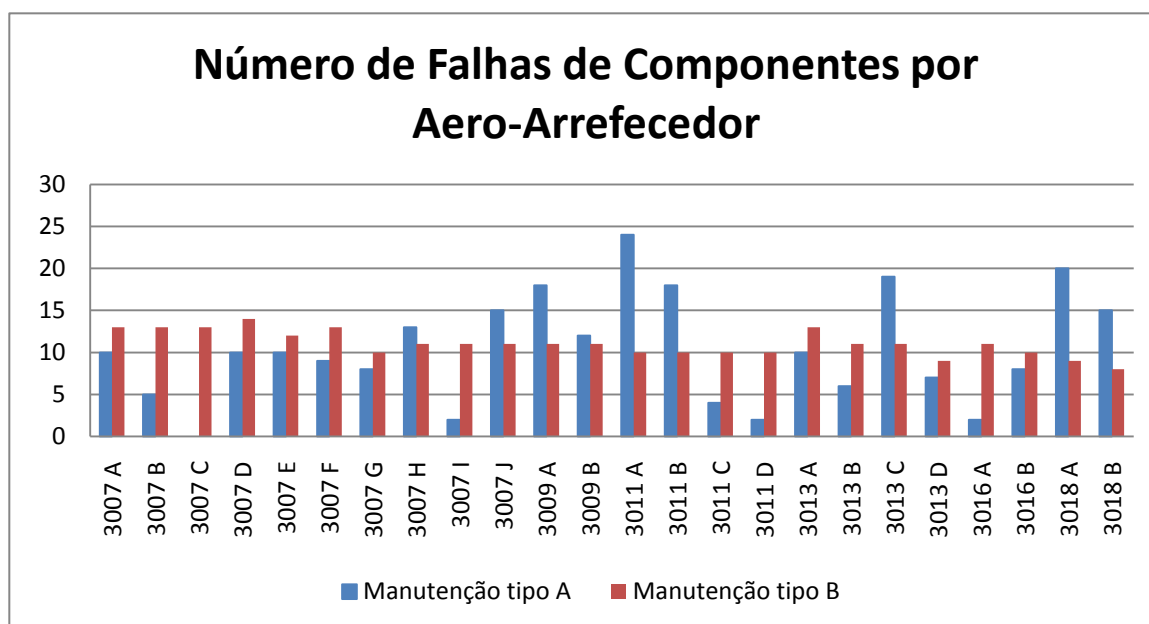


Figura 3.13. Número de falhas por componente por aero-arrefecedor

Constata-se que a manutenção do tipo B é constante por aero-arrefecedor. O mesmo não se pode afirmar em relação à manutenção tipo A, que se mostra bastante heterogénea. Por exemplo, o aero-arrefecedor 3007C não tem falhas em manutenção do tipo A, e outros (como o 3011A) apresentam um maior número de falhas em relação ao resto da unidade.

Conseguem eleger-se os aero-arrefecedores que são prioritários para análise minuciosa, com o intuito de perceber esta discrepância de resultados.

Procurou-se perceber a influência da diferença de características de alguns componentes de aero-arrefecedores, isto é, se poderá haver correlação no número de falhas com a diferença de alguns componentes.

As diferenças de características analisadas foram: a diferença de potência dos motores eléctricos, a diferença de tipo de pás e a influência da existência de variador de velocidade no motor eléctrico.

A análise descrita pode ser visualizada nas figuras 3.14, 3.15 e 3.16.

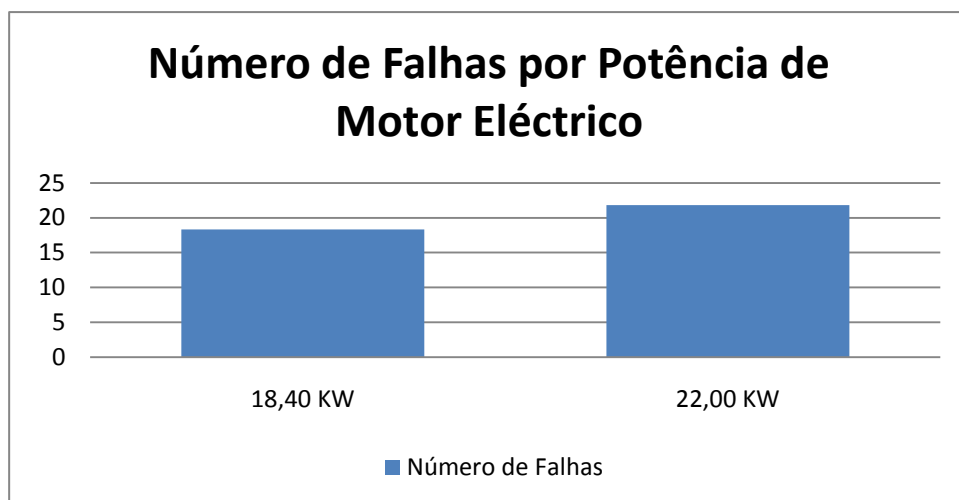


Figura 3.14. Número de falhas por potência de motor eléctrico

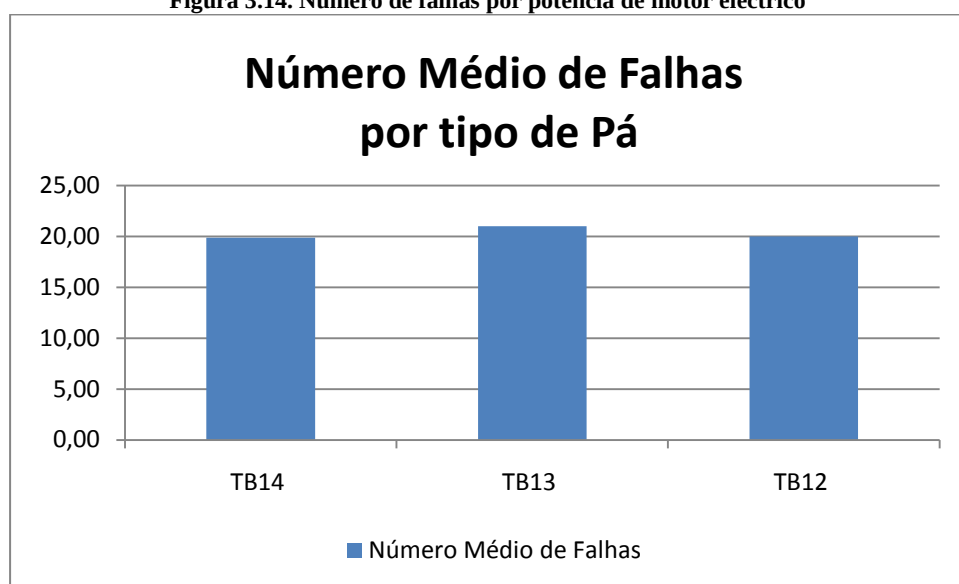


Figura 3.15. Número médio de falhas por tipo de pá

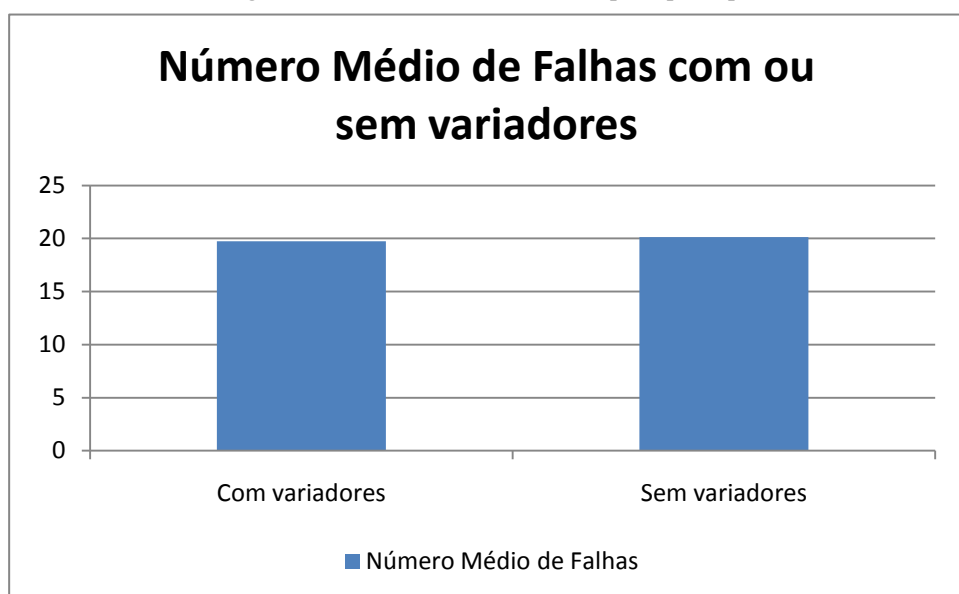


Figura 3.16. Número médio de falhas com ou sem variadores

Após a observação das figuras 3.14, 3.15 e 3.16, conclui-se que não existe influência dos componentes referidos.

Avaliaram-se os modos de falha e nível de manutibilidade, através do cálculo do MTTR. Este cálculo foi conseguido com reuniões com os supervisores de mecânica e electricidade, reuniões com os mecânicos das oficinas de mecânica e electricidade, e acompanhamento de reparações. Apenas os modos de falha mais importantes foram considerados.

Os tempos de reparação estão condicionados pelo estado de material, experiência do operador e segurança da intervenção. Assumiu-se, como valor médio, os tempos de reparação e, consequentemente, a taxa de reparações (μ) constante.

Pode analisar-se o MTTR dos modos de falha na figura 3.17.

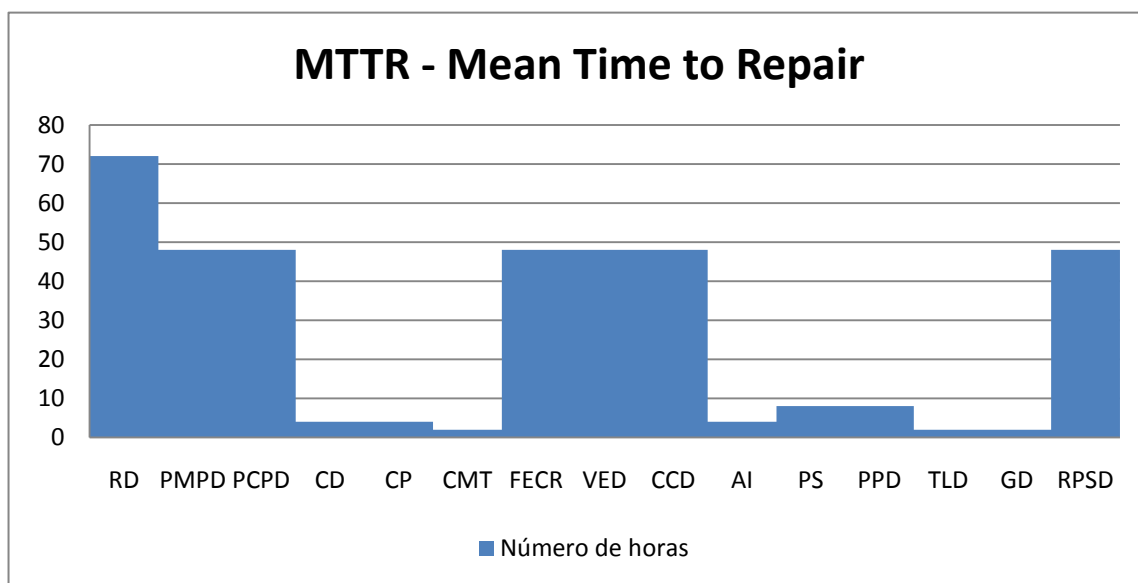


Figura 3.17. MTTR por modo de falha

O modo de falha “rolamentos danificados” apresenta-se com um número de falhas 33% superior em relação a outros. Conclui-se, então, que este modo de falha também é prioritário a nível de manutibilidade.

A avaliação da disponibilidade é conseguida pela multiplicação dos números de falhas pelos tempos de reparação. O resultado desta multiplicação significa a indisponibilidade para cada modo de falha, em horas. Com a divisão pelo tempo de análise (seis anos e meio) obtém-se a indisponibilidade anual para cada modo de falha, como se pode verificar na figura 3.18.

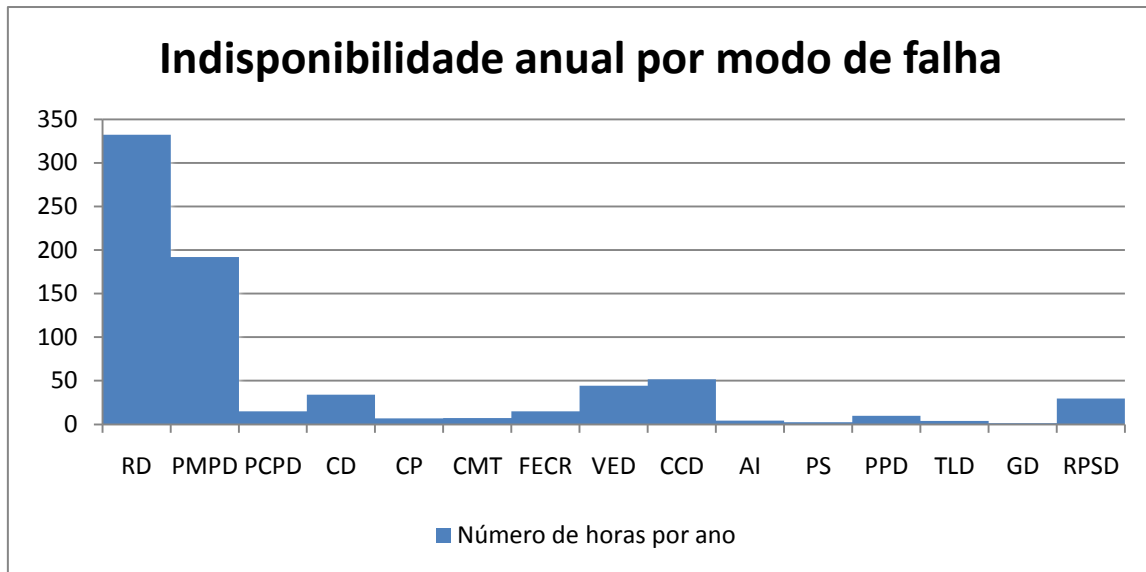


Figura 3.18. Indisponibilidade anual por modo de falha

Dividindo o número de horas total de disponibilidade anual pelo número de aero-arrefecedores e calculando em percentagem obtém-se a disponibilidade por aero-arrefecedor. A disponibilidade calculada tem o valor de 98,57%.

Depois da análise da figura 3.18, o modo de falha “rolamentos danificados” sobressai em relação aos outros modos de falha.

Resumindo, na análise que foi feita, a nível de fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade, identificaram-se os modos de falha que devem sofrer um estudo prioritário. A tabela 3.3 resume e identifica esses modos de falha.

Tabela 3.3. Identificação dos modos de falha prioritários

Indicador	Modos de Falha
Fiabilidade	Rolamentos Danificados Correia Mal Tensionada Correia Desgastada Polia Motora Danificada
Disponibilidade	Rolamentos Danificados
Manutibilidade	Rolamentos Danificados

Procurou-se analisar individualmente cada modo de falha, para avaliar a sua progressão, no tempo e distribuição na unidade.

3.9 Análise individual dos modos de falha prioritários

Com os modos de falha “prioritários” identificados, procedeu-se a uma análise individual. Esta análise consiste em identificar os aero-arrefecedores “prioritários” para cada modo de falha e a evolução destes no tempo estudado.

Nas figuras que mostram o número de falhas por aero-arrefecedor, as falhas contabilizadas foram apenas as que foram incluídas na manutenção do tipo A.

Nos gráficos de “distribuição de falhas no tempo”, os pontos azuis referem-se a falhas existentes durante a manutenção do tipo A, que foi escrito anteriormente. Por sua vez, os pontos vermelhos são relativos a falhas da paragem programada da unidade do ano 2007.

Rolamentos Danificados

O modo de falha “rolamentos danificados” apresenta-se “prioritário” nos três indicadores analisados anteriormente. Na figura 3.19 pode verificar-se a distribuição de falhas na unidade, isto é, a contabilização do número de falhas por aero-arrefecedor.

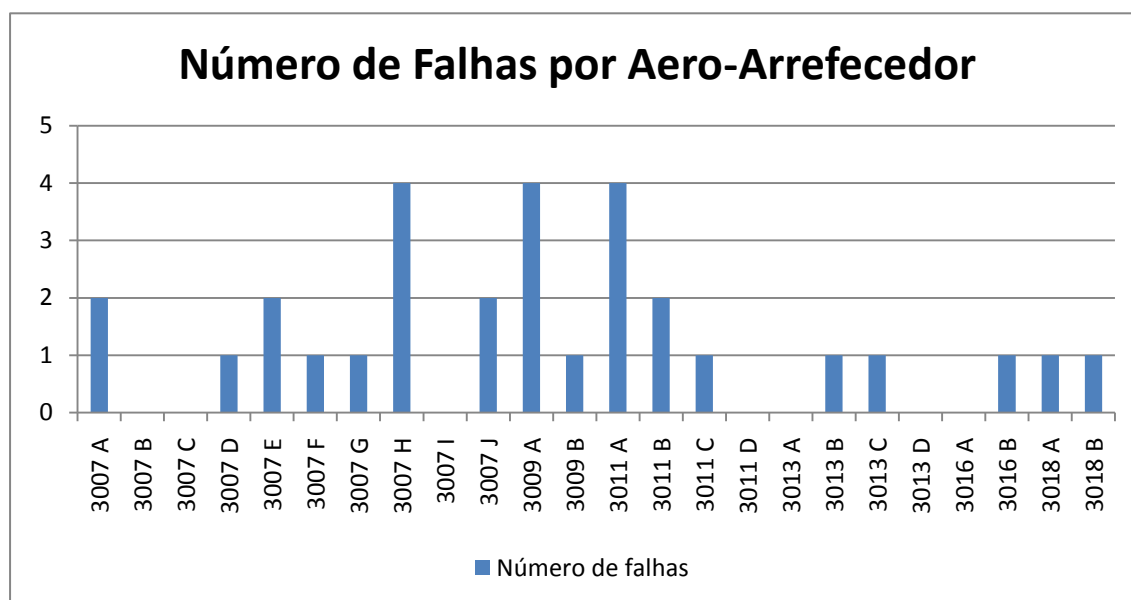


Figura 3.19. Número de falhas por aero-arrefecedor (RD)

Analisando a figura 3.19, pode ver-se que a distribuição por aero-arrefecedores não é constante. Destacam-se três aero-arrefecedores com número elevado de falhas nos rolamentos e existem aero-arrefecedores sem falhas.

Procedeu-se à análise da distribuição de falhas no tempo, como está descrito na figura 3.20. Na paragem programada não se substituíram rolamentos do motor eléctrico, assim, não existem pontos correspondentes à paragem programada.

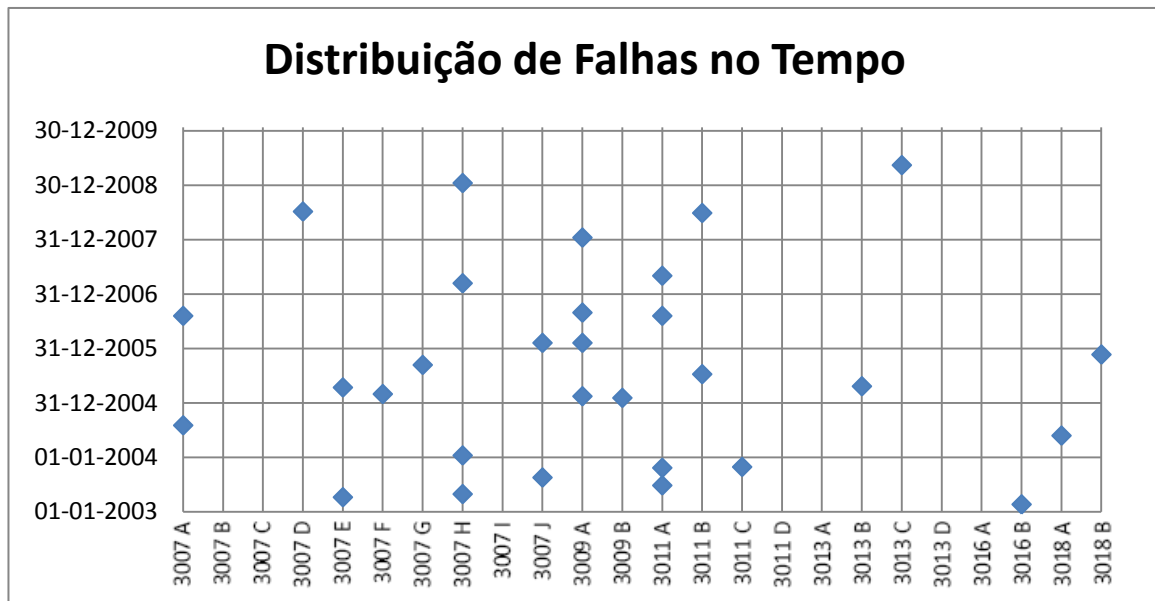


Figura 3.20. Distribuição de falhas no tempo (RD)

Após a observação da figura 3.20, conclui-se que a distribuição no tempo não é constante, havendo mesmo um número elevado de falhas com intervalos inferiores a seis meses.

Realizou-se a análise Weibull, a qual se pode ver na figura 3.21.

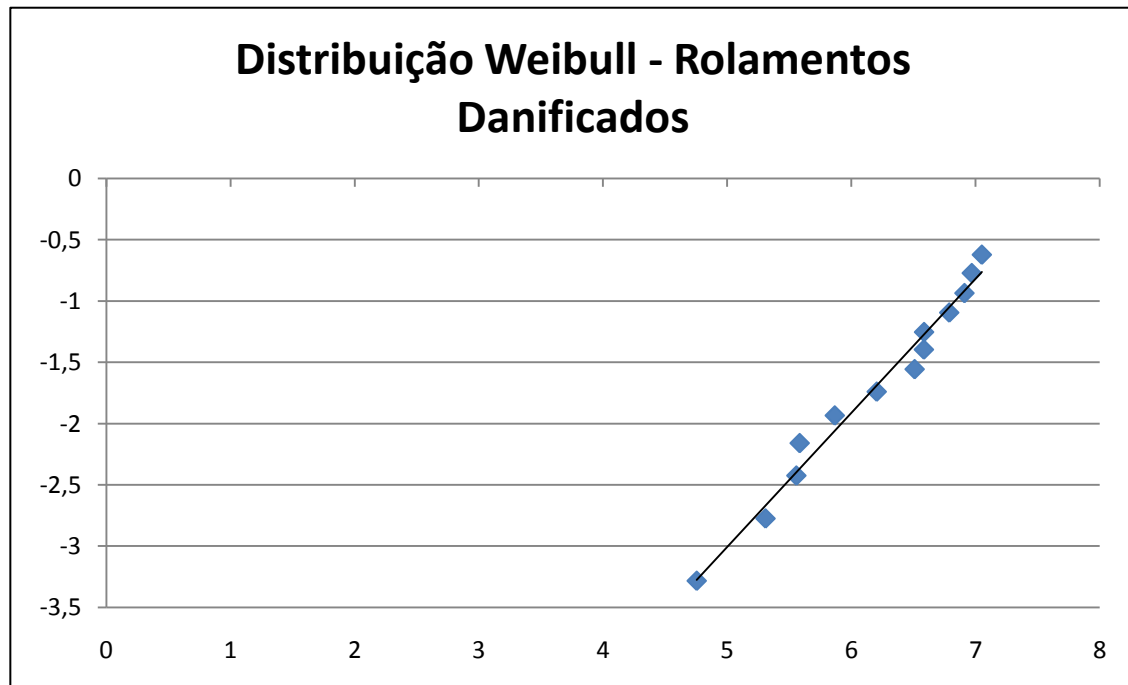


Figura 3.21. Distribuição Weibull

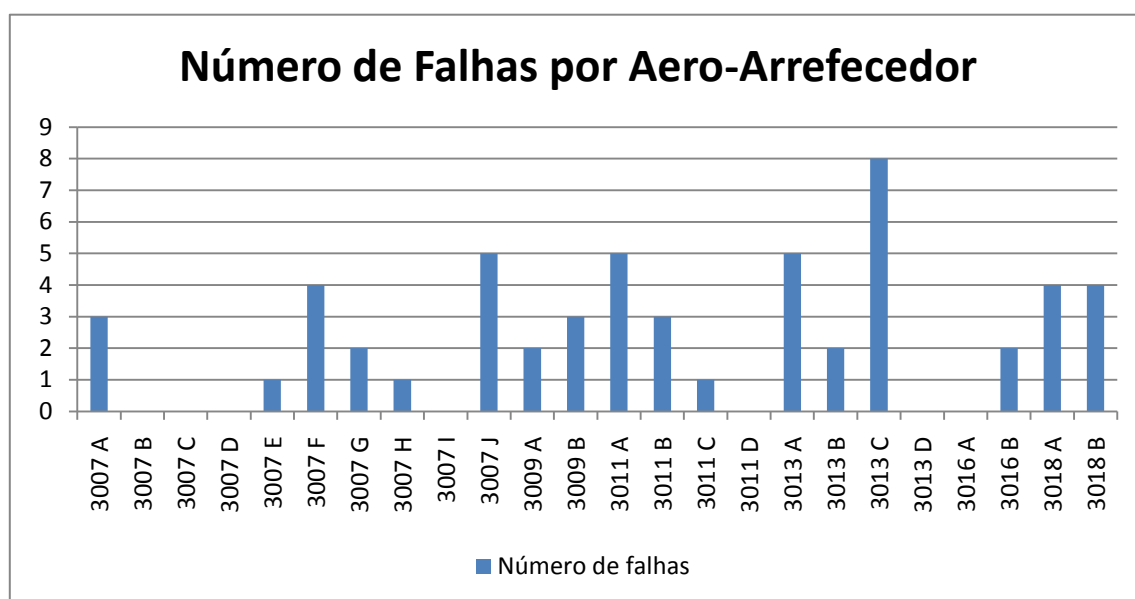
Tabela 3.4. Parâmetros Weibull

Parâmetro de forma (β)	1,09
Vida Característica (α)	2325 dias
Coefficiente de correlação (r^2)	0,9796

O parâmetro de forma indica que o modo de falha “rolamentos danificados” está na posição, referente à curva da banheira, de maturidade, ou seja, no período de vida útil. O valor de r^2 significa que 97,96% dos TTF podem ser explicados pela recta de regressão – valor muito próximo de 100% (ideal).

Correia Desgastada

O modo de falha “correia desgastada” foi identificado como prioritário a nível de fiabilidade. A figura 3.22 corresponde à distribuição de falhas nos aero-arrefecedores.

**Figura 3.22. Número de falhas por aero-arrefecedor (CD)**

O aero-arrefecedor 3013C apresenta um maior número de falhas em relação aos outros aero-arrefecedores da unidade. Existem aero-arrefecedores sem qualquer falha.

Procedeu-se à análise de distribuição de falhas no tempo, que se pode visualizar na figura 3.23.

A distribuição do número de falhas pelos aero-arrefecedores não é constante. Há aero-arrefecedores com um número bastante superior de falhas em relação a outros.

A distribuição no tempo visualiza-se na figura 3.25. No gráfico “distribuição de falhas no tempo” não se contabilizou a paragem programada.

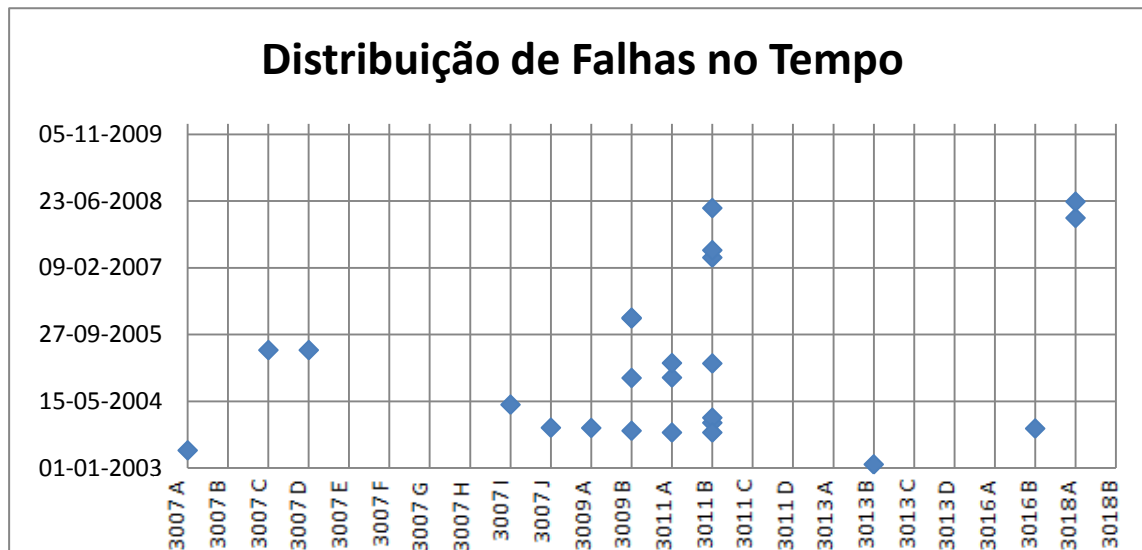


Figura 3.25. Distribuição de falhas no tempo (CMT)

Nos aero-arrefecedores que apresentam mais que uma falha, as falhas estão de uma forma aglomerada. Também, após a análise da figura 3.25, pode constatar-se que há evolução positiva de resultados ao longo do período de tempo analisado.

Polia Motora Partida ou Danificada

Procedeu-se à análise de distribuição de falhas por aero-arrefecedor, como se pode verificar na figura 3.26.

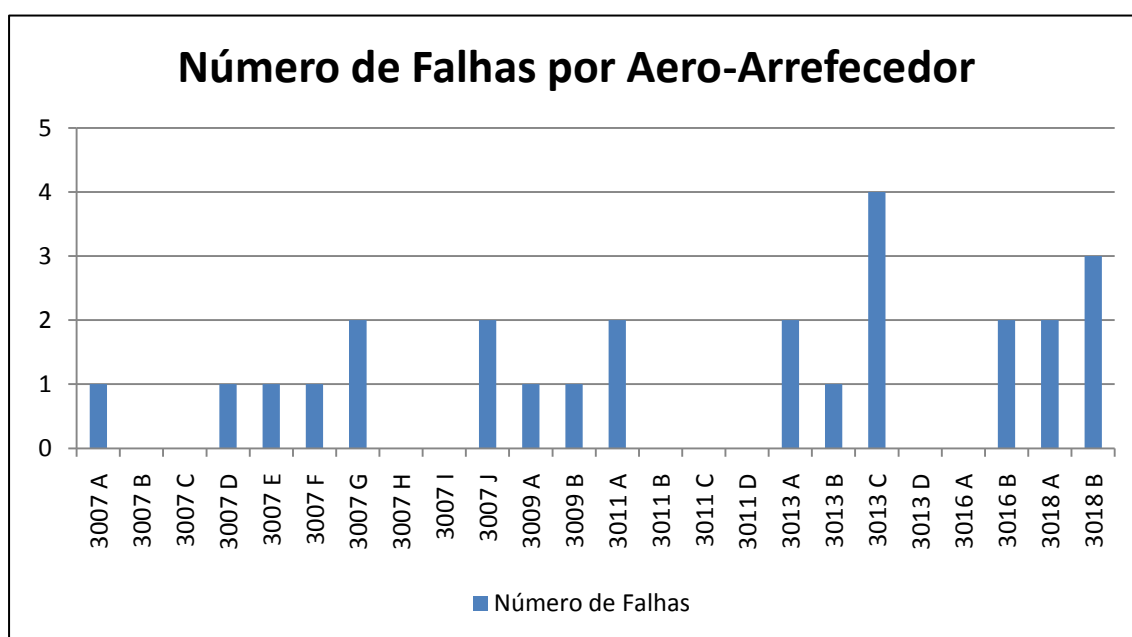


Figura 3.26. Número de falhas por aero-arrefecedor (PMPD)

Mais uma vez, a distribuição de falhas não é constante. Visualiza-se, na figura 3.26, discrepância de resultados em termos de número de falhas, pois existem aero-arrefecedores sem falhas. O aero-arrefecedor 3013C apresenta, novamente, um maior número de falhas, como já tinha acontecido no modo de falha “correia desgastada”.

Segue-se a distribuição no tempo, que pode observar-se na figura 3.27.

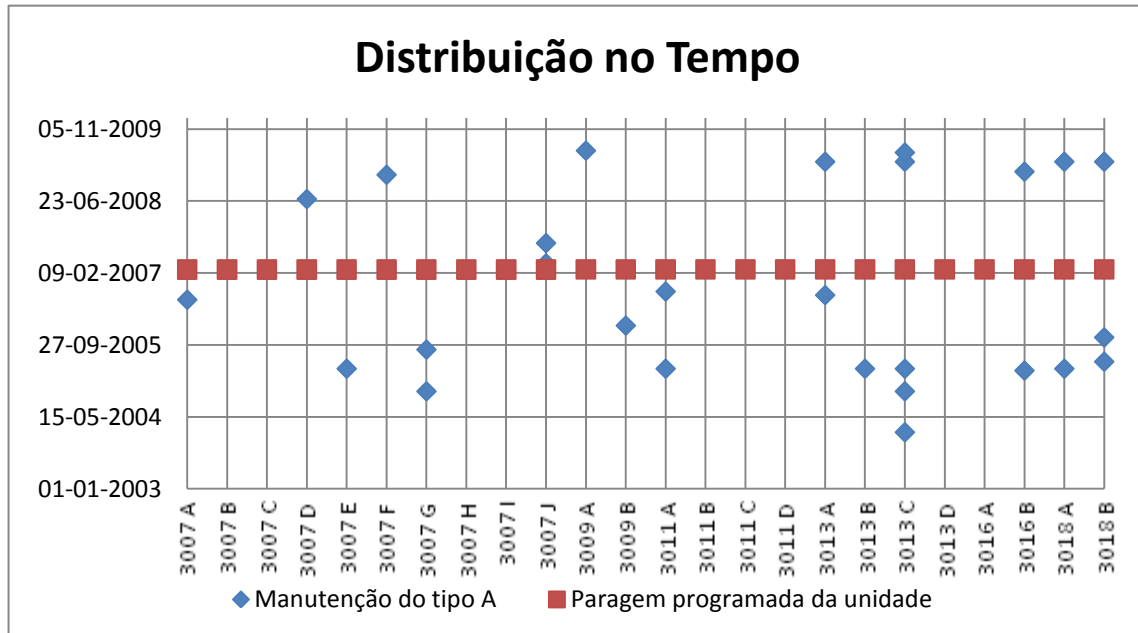


Figura 3.27. Distribuição de falhas no tempo (PMPD)

Na análise da figura 3.27, constata-se que há falhas na polia motora de forma aglomerada e logo a seguir à paragem.

Conclusões da Análise dos Modos de Falha Prioritários

No caso do modo de falha “rolamentos danificados” existem três aero-arrefecedores com quatro falhas no tempo em que foram analisados, o que significa uma média inferior de um ano e meio de intervalo por falha. Esta média é muito inferior ao tempo de vida médio esperado. Na figura 3.20 é evidente a proximidade de falhas dos rolamentos. As principais causas para falha de rolamentos prematuras são: exposição a vibrações, desalinhamento de componentes e montagem incorrecta. A análise Weibull indica que os rolamentos estão posicionados na curva da banheira na zona de maturidade e não na zona de envelhecimento, como seria de esperar.

O modo de falha “correia mal tensionada” tem evolução positiva a nível de ocorrência como se pode observar na figura 3.25. Contudo, o aero-arrefecedor 3011B tem comportamento anómalo, em comparação ao resto da unidade e mantém o nível de ocorrência ao longo do tempo de análise. Assim, seria útil efectuar um estudo ao aero-arrefecedor para perceber este comportamento.

A análise das figuras de distribuição de falhas por aero-arrefecedores, especificamente dos modos de falha “correias desgastada” e “polia motora partida ou danificada”, demonstra que existe correlação do número elevado de falhas nos aero-arrefecedores

3013C, 3007J, 3011A. Conclui-se, então, que estes modos de falha estão interligados e um estudo mais detalhado terá que ser feito em conjunto.

Concluindo, e como já foi mencionado anteriormente, há discrepância de resultados, ou seja, existe variação acentuada de número de falhas nos aero-arrefecedores. Em todos os modos de falha existem aero-arrefecedores sem falhas na contabilização da manutenção do tipo A. Um factor importante que não foi contabilizado neste estudo e que poderá ser a razão para esta discrepância, é o facto de haver diferença do tempo total de trabalho entre os aero-arrefecedores durante o tempo estudado. Assim, seria interessante estudar esta questão para possível proximidade dos resultados à realidade.

As falhas com distribuição de forma aglomerada e logo a seguir à paragem podem ser estudadas através do modelo matemático *proportional hazards modelling*, como foi descrito no capítulo dois.

3.10 Plano de Estudo

Descreve-se, de seguida, o plano de estudo que tem como principal objectivo fazer face aos comportamentos de falhas indicados anteriormente – falhas prematuras depois da paragem e falhas aglomeradas. É constituído por quatro fases sequenciais. A figura 3.28 resume e planifica o plano de estudo definido.

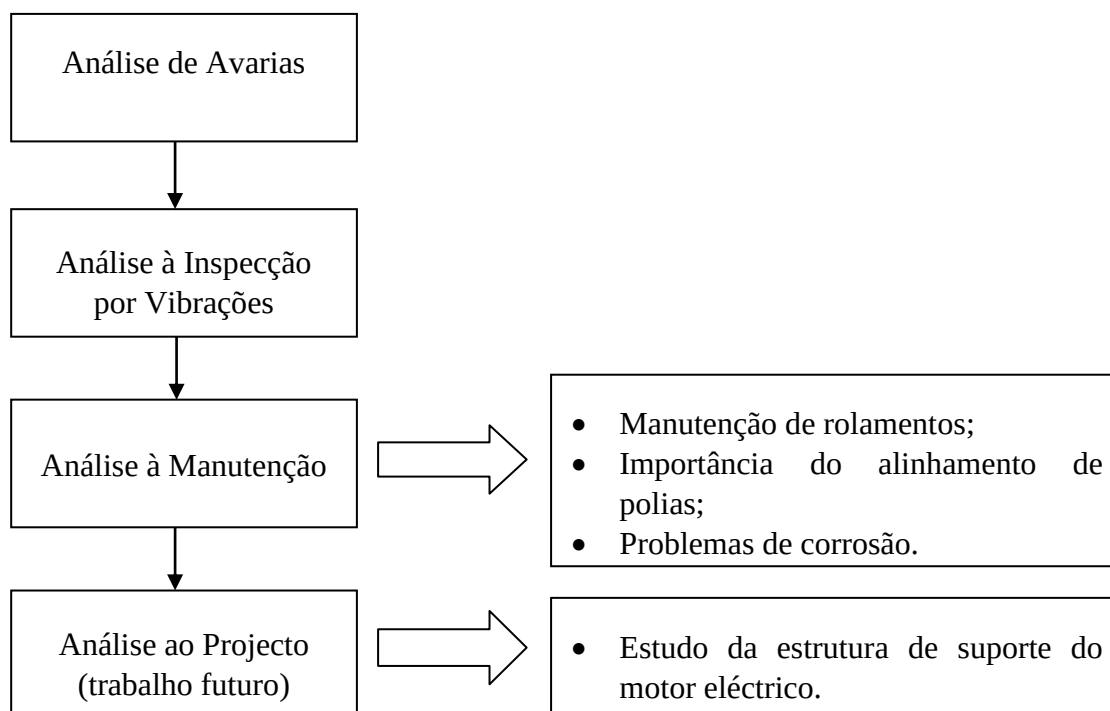


Figura 3.28. Descrição do Plano de Intervenção

3.10.1 Monitorização de vibrações

Neste subcapítulo é feito um resumo teórico sobre a monitorização de vibração nos aero-arrefecedores. Este resumo é importante para se perceber e compreender os espectros de vibração utilizados nas análises de avaria.

Um corpo encontra-se a vibrar quando este descreve um movimento de oscilação em torno de uma posição de referência. O número de ciclos durante um período de tempo é denominado de frequência, se o período for de um segundo expressa-se em hertz (hz), se for de um minuto expressa-se em ciclos por minuto (CPM) [24].

De uma forma genérica grande parte das máquinas/equipamentos vibram porque incluem equipamentos móveis, que estão sujeitos a atrito ou que rodam juntamente com componentes adjacentes, gerando vibrações devido às rugosidades entre partes que se tocam [25].

Efeito de vibração

A figura 3.29 resume o efeito de vibração num sistema mecânico.

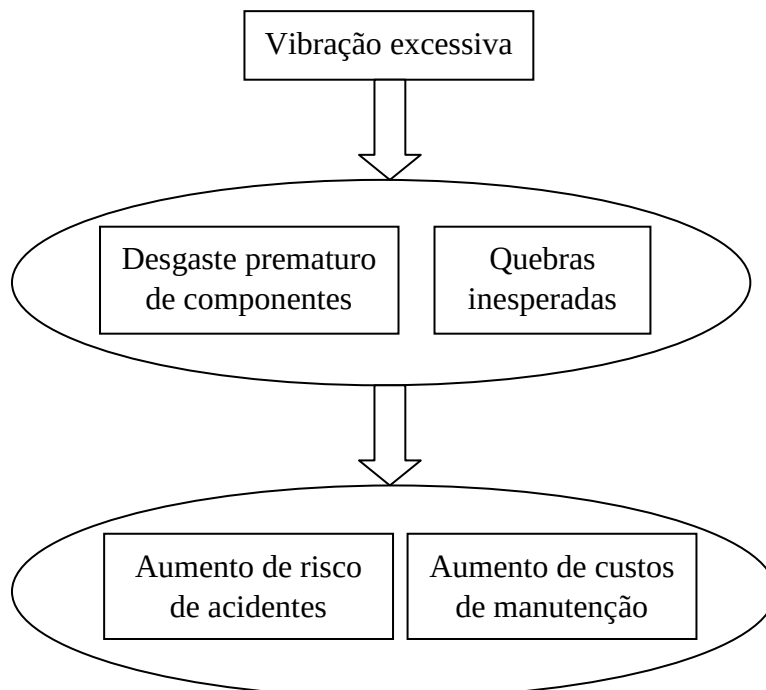


Figura 3.29. Efeito de vibração num sistema mecânico

A amplitude de vibração indica a severidade da vibração que está presente no equipamento. Quanto maior é a amplitude mais grave será o defeito.

A amplitude de vibração pode medir-se através dos seguintes parâmetros [10]:

- Deslocamento – quando o corpo se move (microns).
- Velocidade – com que rapidez o corpo se move (mm/s).
- Aceleração – com que rapidez o corpo varia de velocidade ($g's$, mm/s^2).
- *Spike Energy* – aceleração filtrada ($g'sE$).

Os parâmetros de medição da vibração são: deslocamento, velocidade e aceleração.

O parâmetro aceleração é utilizado para detecção de falhas em rolamentos. Para medir a aceleração, são instalados nos equipamentos acelerómetros em posições específicas do motor eléctrico, como se pode ver na figura 3.30. Nos aero-arrefecedores, as vibrações apenas são medidas nos motores eléctricos.

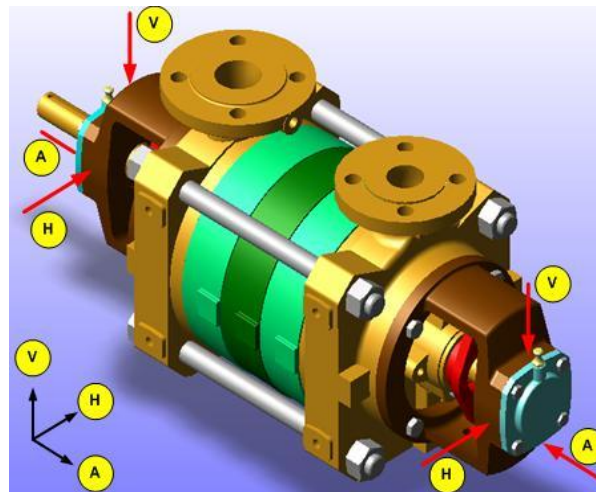


Figura 3.30. Posições de medição de vibrações nos motores eléctricos

A zona superior do motor eléctrico é considerada zona 2 e, assim, os pontos de medição têm as seguintes referências 2H, 2V e 2A. A zona oposta considera-se zona 1 com as seguintes referências 1H, 1V e 1A. Os acelerómetros, pelo efeito “piezoeléctrico”, convertem a energia proveniente de ondas elásticas, num sinal que, em seguida, é ampliado e filtrado até chegar ao aparelho de medida, como se pode ver na figura 3.31 [10].

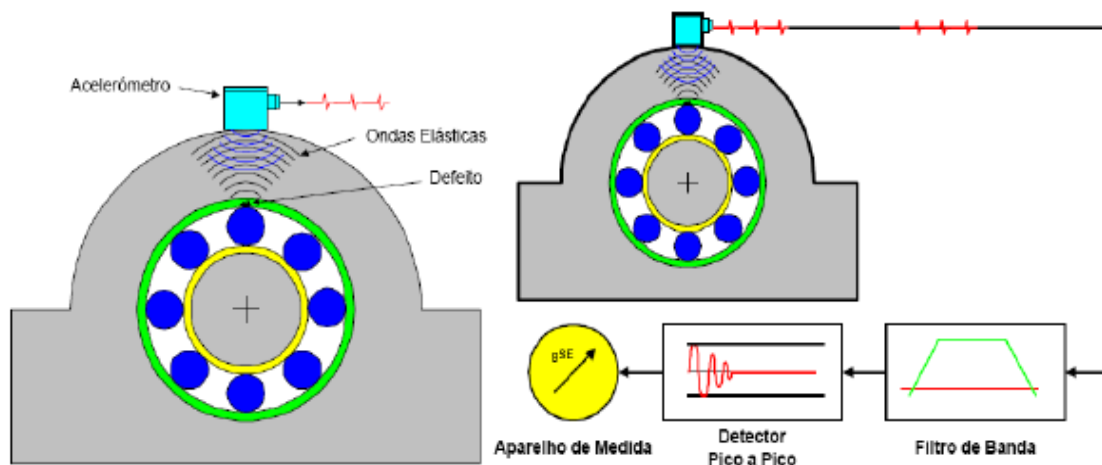


Figura 3.31. Obtenção e medição de vibração

A quantidade de energia reflectida depende da forma do sinal gerado, dos materiais constituintes das superfícies de separação dos componentes, da forma de fixação e da energia gerada pelo defeito. A intensidade de energia gera-se em função da amplitude, da frequência e da duração dos impactos [10].

A vibração tem origem nas forças dinâmicas que se encontram presentes nas máquinas que actuam variando a sua intensidade e/ou direcção. Assim, as características da vibração

produzidas são determinadas pela variação em amplitude (intensidade) e/ou direcção das referidas forças [6].

Causas de Vibração

Existem várias causas responsáveis pelo aparecimento das forças dinâmicas, isto é, causas da vibração, das quais podemos nomear [6]:

- Desequilíbrio;
- Desalinhamento;
- Veios empenados;
- Correia de transmissão em mau estado;
- Rolamentos em mau estado;
- Variações de binário;
- Forças electromagnéticas;
- Forças aerodinâmicas;
- Folgas;

Na degradação de rolamentos, as causas mais comuns são:

- Sobrecargas;
- Variações bruscas de temperatura;
- Lubrificação incorrecta;
- Montagem incorrecta;
- Partículas abrasivas ou corrosivas no lubrificante;
- Erro de projecto;
- Desgaste por fadiga.

A vibração produzida por um rolamento novo sem defeito é de baixo nível e equivalente ao ruído aleatório (“*random noise*”). Quando se desenvolve uma avaria a vibração produzida pelo rolamento altera-se. Sempre que um elemento rotativo encontra uma descontinuidade no seu caminho, resulta um impulso de vibração. Os impulsos de vibração repetem-se periodicamente com um período determinado pelo local da descontinuidade e pela geometria do rolamento. Estas frequências do rolamento ou frequências rotacionais surgem a múltiplos da velocidade de rotação do veio e, uma vez que são de estado estacionário, podem ser facilmente identificáveis através de análise [25].

Um rolamento defeituoso emite, normalmente as seguintes frequências fundamentais [26]:

- FTF – (*Fundamental Train Frequency*) – frequência emitida por um defeito da gaiola;
- BPOR – (*Ball Pass Frequency of the Outer Race*) – frequência emitida por uma esfera ou por um rolo quando passa por um defeito superficial da pista externa;

- BPIR – (*Ball Pass Frequency of the Inner Race*) – frequência emitida por uma esfera ou um rolo quando passa por um defeito superficial da pista interna;
- BSF – (*Ball Spin Frequency*) – frequência emitida por um defeito superficial na esfera ou rolo quando este entra em contacto com a pista interna ou pista externa.

A análise envolvente pode extrair os impactos periódicos do sinal de vibração, reduzindo um problema de alta frequência a um problema de baixa frequência. Isto pode ser feito mesmo quando os impactos são de baixa energia e se encontram “enterrados” por outras vibrações de máquina/equipamento. A figura 3.32 apresenta um espectro envolvente, onde se podem ver os picos (possivelmente com outros harmónicos) à frequência do rolamento, resultantes de impacto regulares no rolamento no local da avaria (pista exterior, pista interior, gaiola ou esfera) [27].

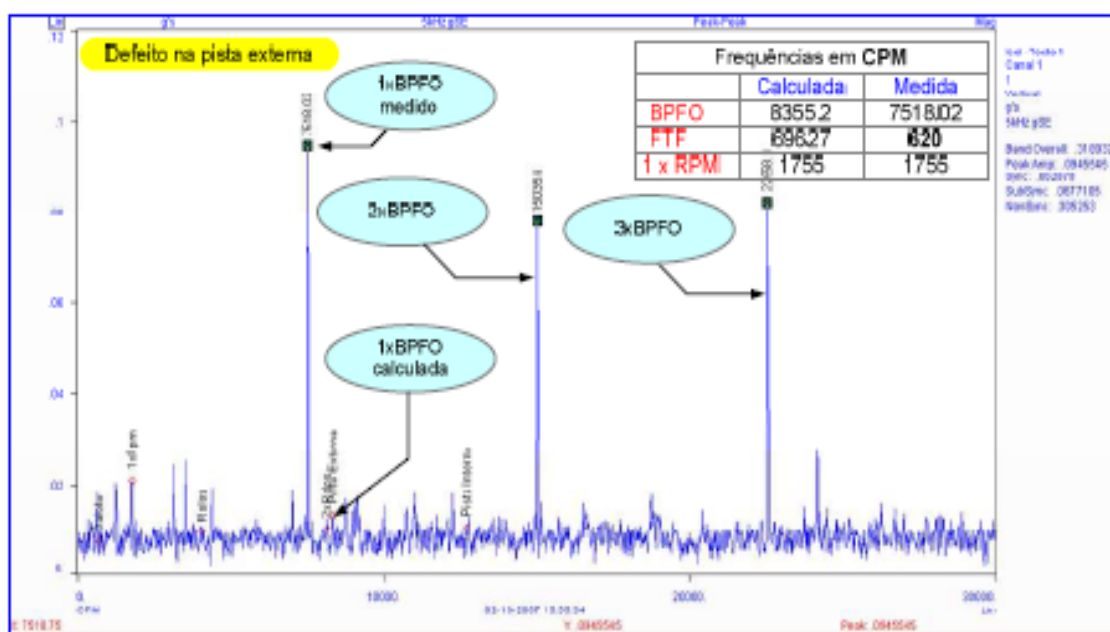


Figura 3.32. Espectro envolvente – defeito BPOR [26]

A evolução normal de um rolamento com defeito é exponencial. Passa por várias fases de evolução, sendo inclusive detectável sem instrumentação nas últimas fases (excesso de ruído). O objectivo de uma correcta análise de vibrações é, exactamente, detectar os defeitos quando estes atingem a zona de alerta.

Os princípios para uma boa análise crítica dos resultados de análise de vibrações são [10]:

- Usar sempre o mesmo método de fixação;
- Usar sempre o mesmo acelerómetro;
- Medir sempre no mesmo ponto;
- Medir sempre outros parâmetros em simultâneo (velocidade, aceleração);
- Não comparar valores obtidos em condições de leitura diferentes.

A análise e recolha de vibrações na Refinaria do Matosinhos está a cargo duma Empresa externa. O *software* utilizado para visualização e armazenamento automático é o *Emonitor Odissey Deluxe*.

3.10.2 Análise de Avarias

Na análise de avarias, o principal objectivo é identificar as potenciais causas das falhas prematuras dos componentes, para encontrar possíveis soluções tanto a nível de manutenção como a nível de projecto, com finalidade de as evitar.

Com um número suficiente de análises de avarias, para criação de base de dados, é necessário chegar a conclusões práticas, isto é, estudar as causas e efeitos prevalentes e, duma forma compensatória, encontrar soluções para resolução dos problemas. Porém, nem sempre as soluções encontradas compensam a manutenção preventiva.

A figura 3.33 descreve a metodologia utilizada na análise de avarias.

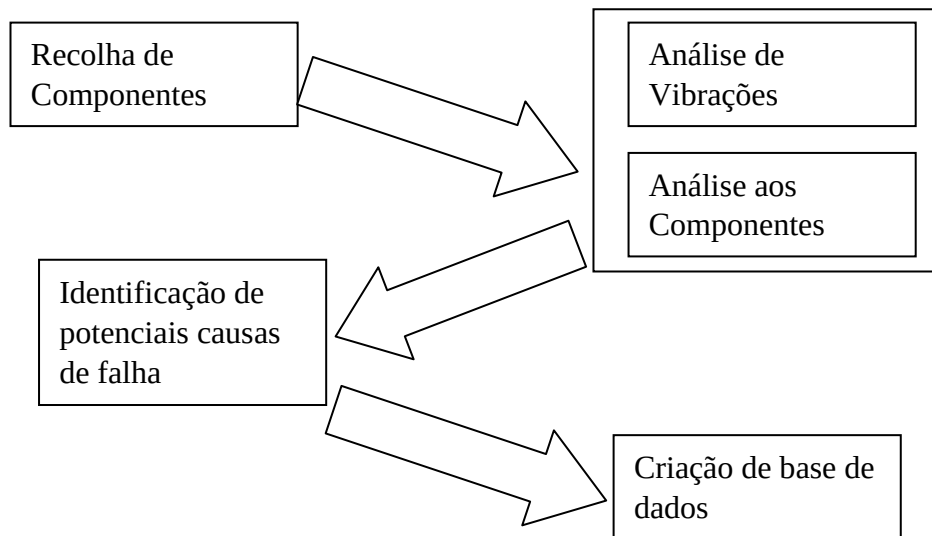


Figura 3.33. Metodologia utilizada na análise de avarias

Realizaram-se duas análises de avarias que ocorreram na unidade 3000, caso A e caso B. Estas avarias foram detectadas pela manutenção preventiva condicionada.

3.10.2.1 Análise de Avarias – Caso A

Surgiu uma avaria do aero-arrefecedor 3018 B da unidade 3000. O motor eléctrico foi transportado para a oficina de electricidade.

Antes de se iniciar a análise de avaria, é necessário saber os detalhes da última intervenção de manutenção. Esta foi realizada a 24-03-2009 com substituição de componentes: correia e polia motora.

Análise de Vibrações

A recolha de vibrações acontece mensalmente de forma *off-line*, isto significa que a monitorização é feita no local através de um equipamento portátil. Quando se considera, pela análise de vibrações, que os aero-arrefecedores estão em zona de alerta, estes são acompanhados com um espaço de análise encurtado e, assim, a evolução da falha é monitorizada.

O espectro que suscitou interesse foi o observado na posição 1 horizontal (1H), como se pode ver na figura 3.34.

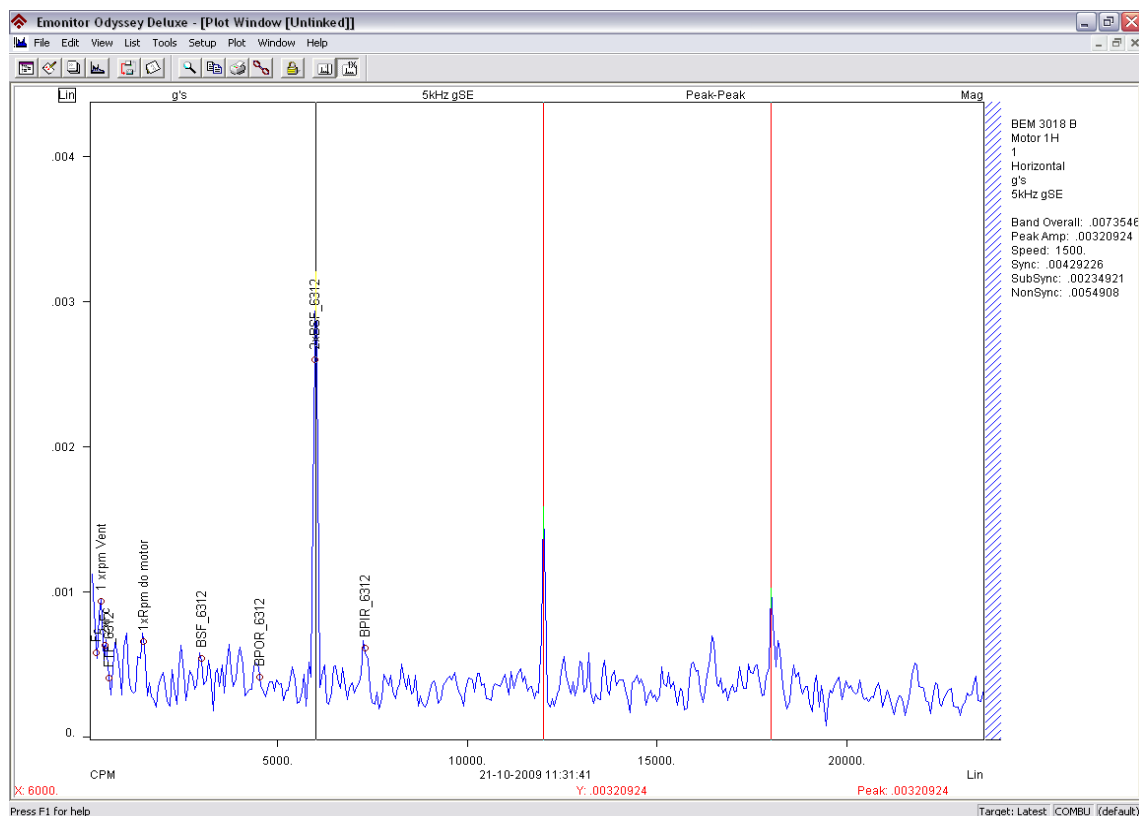


Figura 3.34. Espectro envolvente [g's] (1H)

No espectro analisado, pode identificar-se um valor de amplitude que sobressai. Este valor é referente à frequência das esferas dos rolamentos, *Ball Spin Frequency*, (BSF). As harmónicas estão identificadas com os riscos vermelhos.

A análise de vibrações apenas permite detectar problemas e não diagnosticar as causas, não sendo, assim, suficiente para fazer uma análise completa deste caso [25].

Análise aos Rolamentos

Os rolamentos foram recolhidos durante a reparação do motor eléctrico. Porém, a lavagem e o corte dos anéis demorou cerca de uma semana, influenciando então, a análise das superfícies dos anéis e esferas, visto que o material dos rolamentos corrói muito facilmente, se não forem condicionados devidamente. A análise ficou condicionada por este facto, mas os principais objectivos foram atingidos.

Com uma análise mais detalhada sobre todos os componentes dos rolamentos, pode destacar-se o principal e potencial modo de desgaste dos rolamentos – “Descamar” por Endentações;

Como se pode ver nas figuras 3.36 e 3.36, existem endentações com o espaçamento das esferas, assinaladas com as setas brancas.



Figura 3.35. Anel superior (1)

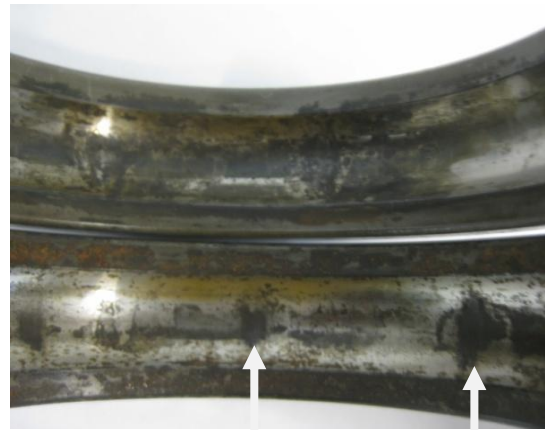


Figura 3.36. Anel superior (2)

Este tipo de modo falha tem como possíveis causas [28,29]:

- Montagem incorrecta;
- Presença de partículas abrasivas;
- Sobrecarga com o rolamento parado.

Análise à Correia

Procedeu-se à análise da correia para diagnosticar as principais causas de falha. Consegue perceber-se, pelas figuras 3.37 e 3.38, que o espaço entre as bandas das correias é o local que apresenta maior desgaste. As partes laterais não apresentam desgaste considerável. Na figura 5.7 é evidente a separação das bandas da correia.



Figura 3.38. Correia desgastada (1)



Figura 3.37. Correia desgastada (2)

Após a análise, podem considerar-se como principais causas [30]:

- Desalinhamento de polias;
- Polias desgastadas.

Análise à Polia Motora

Foi efectuada uma análise à polia motora, para avaliar o seu estado de degradação, como se pode verificar nas figuras 3.39 e 3.40.



Figura 3.39. Polia danificada (1)



Figura 3.40. Polia danificada (2)

As figuras demonstram uma corrosão uniforme evidente e desgaste das arestas das pistas da polia analisada.

Conclusões da Análise de Avarias – Caso A

O corte dos rolamentos confirmou o defeito identificado pelas vibrações.

Se houver prevalência de casos de montagem incorrecta, um melhoramento possível a ter em conta seria uma montagem mais cuidadosa [29].

A presença de partículas abrasivas pode ser evitada com a limpeza das bancas de trabalho e com o cuidado de evitar trabalhos mecânicos perto do local da montagem. Porém, outra razão possível é a contaminação da massa lubrificante [28,29].

A análise à massa lubrificante seria pertinente, visto que pela análise visual e tacto não se detectou a existência de partículas abrasivas. Com a análise à massa lubrificante seria possível detectar: existência de partículas abrasivas, presença de água na massa lubrificante e possibilidade de contaminação da massa lubrificante [25].

O estado de corrosão e desgaste da polia motora poderá ter sido a principal causa para o desgaste da correia. Porém, a polia conduzida não foi analisada, não se sabendo qual a importância que poderá ter tido no desgaste da correia. Teria sido interessante analisá-la para perceber até que ponto a corrosão nas polias tem influência no seu desgaste e posterior desgaste da correia.

3.10.2.2 Análise de Avarias – Caso B

O “Caso B” refere-se a uma avaria também da unidade de estudo (unidade 3000). O aero-arrefecedor é o 3007 A.

Antes de se iniciar a análise de avaria, é necessário saber os detalhes da última intervenção de manutenção. Esta foi realizada a 05-05-2007 com componentes substituídos: correia, polia motora, polia conduzida, as quatro pás, chumaceira superior e chumaceira inferior.

Na análise de avarias do “caso B”, não foi possível estudar os modos de falha da correia, visto que não foi possível distingui-la na zona de recolha de correias.

Análise de Vibrações

Realizou-se a análise de vibrações aos espectros que revelavam interesse. O primeiro espectro analisado foi o espectro da posição 1 vertical (1V), como pode observar-se na figura 3.41.

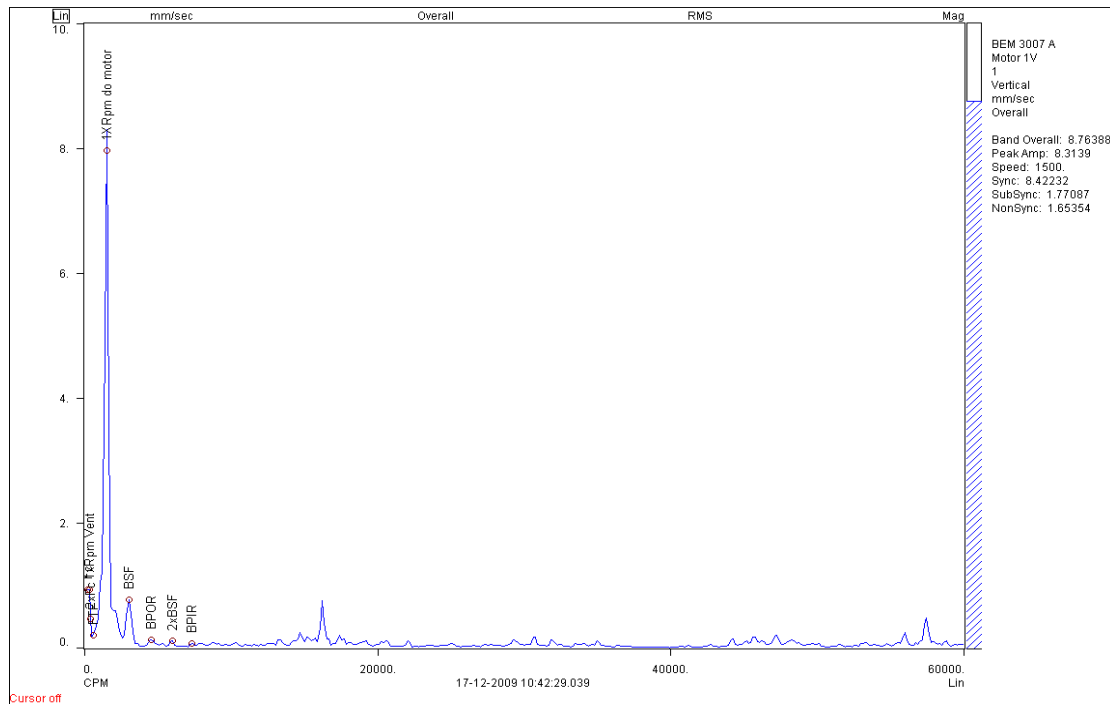


Figura 3.41. Espectro velocidade [mm's] (1V)

Após a análise do espectro, verifica-se que existe uma amplitude de valor elevado na frequência de rotação do motor eléctrico (1 x rpm). Existem vários problemas que se podem manifestar na frequência do motor eléctrico [25]:

- Desequilíbrio, do veio do motor eléctrico ou polias;
- Desalinhamento, do veio do motor eléctrico ou polias;
- Veio empenado;
- Chassis do motor eléctrico em estado avançado de degradação.

A prevalência de casos de “veio empenado”, em motores eléctricos, é ínfima, pelo que este modo de falha pode ser desprezado como causa de avaria.

Observou-se outro espectro do mesmo tipo mas na posição 2 axial (2A), ou seja, referente à posição axial, como pode verificar-se na figura 3.42.

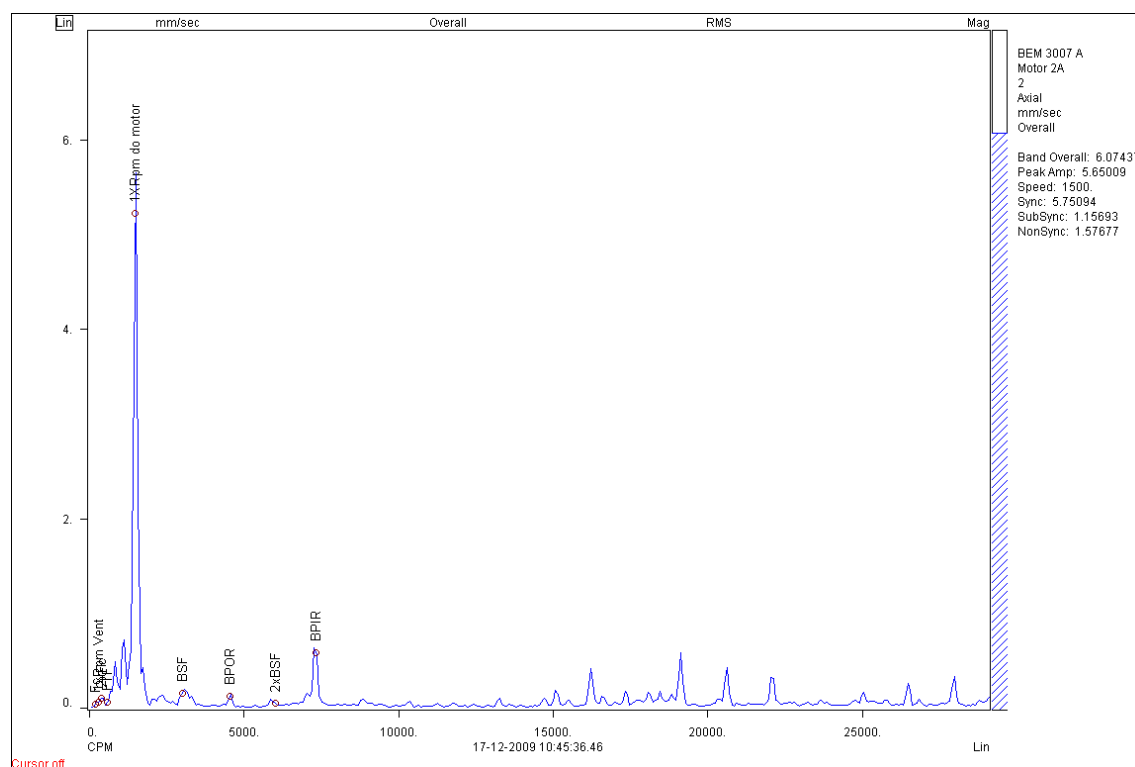


Figura 3.42. Espectro velocidade [mm's] (2A)

Da análise deste espectro, pode desprezar-se a causa “desequilíbrio”, uma vez que o desequilíbrio não se manifesta axialmente com uma amplitude tão elevada.

Analizou-se outro espectro que foi considerado importante para esta análise de avaria, o qual se pode visualizar na figura 3.43.

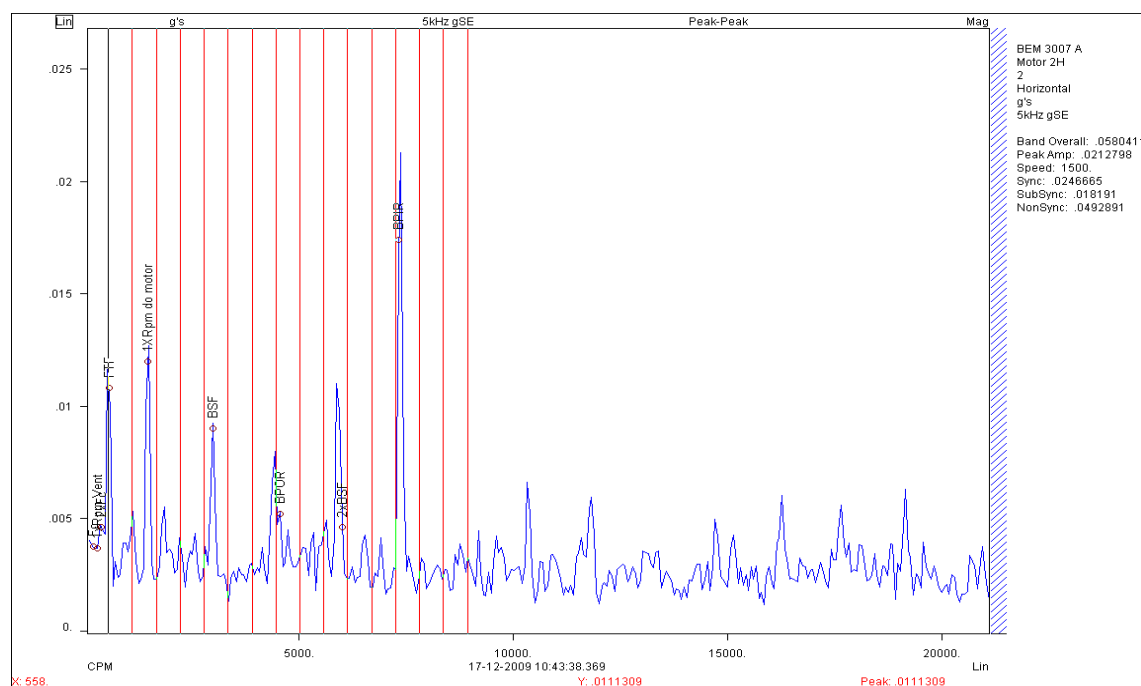


Figura 3.43. Espectro envolvente [g's] (2H)

Pela análise do espectro identificam-se problemas de folgas, que se podem observar no espectro como harmónicas consecutivas. São, também, identificados problemas de rolamentos:

- FTF – (*Fundamental Train Frequency*) – frequência emitida por um defeito da gaiola;
- BPIR – (*Ball Pass Frequency of the Inner Race*) – frequência emitida por uma esfera ou um rolo quando passa por um defeito superficial da pista interna;

Análise de Rolamentos

Os rolamentos foram recolhidos durante a reparação do motor eléctrico. Durante a análise dos rolamentos não se encontraram defeitos na gaiola, como se supôs pela análise de vibrações, o que significa que a gaiola se apresentava apenas em esforço.

As figuras 3.44 e 3.45 mostram o estado de degradação dos rolamentos.



Figura 3.44. Anel inferior do rolamento

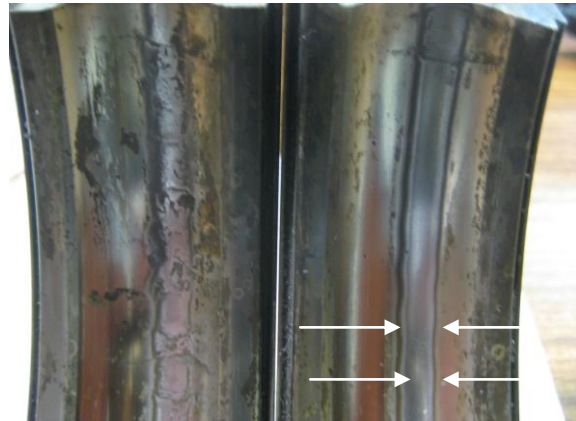


Figura 3.45. Anel superior do rolamento

Nas figuras 3.44 e 3.45, é evidente a marca de folgas indicada pela seta vermelha, e também a marca de desalinhamento, indicadas pelas setas brancas.

As principais causas para o aparecimento de folgas e desalinhamento são [25,28]:

- Montagem incorrecta de componentes – rolamentos, polias;
- Crescimento térmico de componentes;
- Arranque do equipamento com carga excessiva.

Análise à Polia Motora

As seguintes 3.46, 3.47 mostram o estado de desgaste da polia motora.



Figura 3.46. Polia danificada (1)



Figura 3.47. Polia danificada (2)

Na observação das figuras 3.46 e 3.47, verifica-se uma corrosão uniforme evidente, e um nível de desgaste das arestas das pistas da polia.

Conclusões da Análise de Avaria – Caso B

O corte, e posterior análise dos rolamentos, mais uma vez completou a análise de vibrações. A causa mais provável identificada é o desalinhamento de polias axial. Deste modo, pode dizer-se que o desalinhamento das polias poderá ser um factor que diminui o tempo de vida dos rolamentos.

A polia motora apresenta-se, tal como no “Caso A”, num estado de corrosão. Como em ambos os casos a polia motora se encontra num estado de corrosão, um estudo para possível mudança de material ou manutenção das polias motoras poderá ser útil. No entanto, o caso actual não é tão severo, o que poderá indicar que a diferença de posições dos aero-arrefecedores na unidade pode ter influência.

Este estudo de análise de avarias tem limitações relativamente ao número de casos analisados, não se podendo, assim, definir soluções viáveis para os problemas encontrados.

Para o acompanhamento da evolução e desenvolvimento de soluções destes problemas, seria proveitoso a continuação das análises de avarias, criando uma base de dados com número suficiente. Só assim, haverá fundamentos para decisões futuras que visem a solução do aumento do MTBF dos aero-arrefecedores. Porém, as análises de avaria para além de dispendiosas requerem bastante tempo. Seria necessário perceber a prioridade dos aero-arrefecedores em relação a outros equipamentos da refinaria e, também, avaliar se o investimento das análises de avarias versus o aumento de disponibilidade dos aero-arrefecedores é compensatório, visto que a disponibilidade dos aero-arrefecedores é elevada.

3.10.3 Análise à Inspeção por Vibrações para Aero-Arrefecedores

A análise de vibrações feita pela empresa externa consiste apenas na recolha de vibrações no motor eléctrico. Porém, esta análise pode ser melhorada. Deveriam, também, ser consideradas as vibrações nas chumaceiras do veio principal. Com as medições de vibrações nas chumaceiras conseguiriam prever-se problemas, tais como [24,31]:

- Desequilíbrios de componentes;
 - Veio empenado;
 - Efeito vórtice¹;
 - Desequilíbrio de pás;
 - Deferentes ângulos de pás;
 - Desgaste de componentes;
 - Corrosão de componentes;
 - Dilatações térmicas de componentes;
- Folgas nas chumaceiras;
- Falta de lubrificação nas chumaceiras;
- Desgaste de estrutura ou componentes;

A presença deste tipo de problemas vai manifestar-se externamente, como vibração mecânica, a qual vai ser transmitida para os apoios da chumaceira e, assim, transmitida para a estrutura global da unidade. Se este perigo de vibração de desequilíbrio não for identificado, terá severas consequências em toda a unidade, tais como: destruição de rolamentos, danificações nos apoios e fissuras na estrutura [31].

Para a solução deste problema, estudou-se a colocação de acelerómetros nas direcções vertical e horizontal, como se visualiza com as setas na figura 3.48.

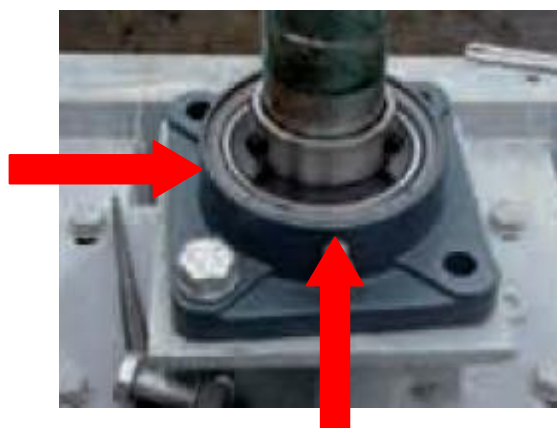


Figura 3.48. Localização de acelerómetros (horizontal, vertical)

¹ Efeito vórtice é um escoamento giratório onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular ou espiral.

Os acelerómetros seriam colocados nas chumaceiras de forma permanente, como as setas da figura 3.49 indicam.

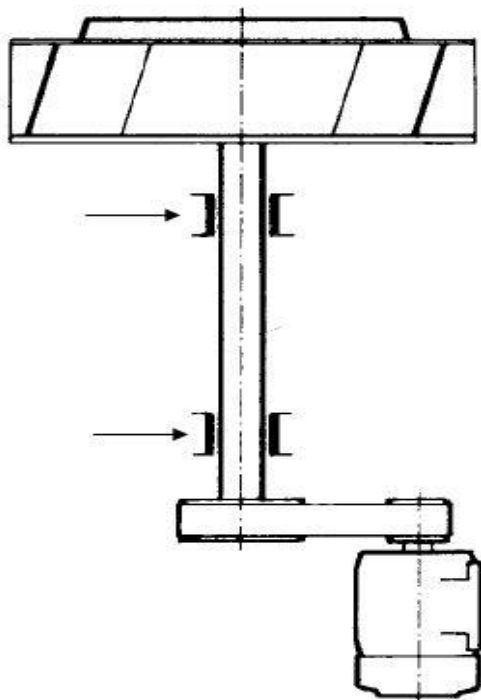


Figura 3.49. Localização de acelerómetros nas chumaceiras

Os acelerómetros teriam ligação a uma caixa receptora para recolha das medições, visto que a rede de protecção não permite aos operadores acederem às chumaceiras.

Como em qualquer investimento, é necessário fazer um estudo económico para perceber a viabilidade deste tipo de controlo de condição de componentes.

3.10.4 Análise às intervenções de manutenção

Procedeu-se à avaliação da manutibilidade dos rolamentos, à importância do alinhamento preciso na transmissão e importância da manutenção contra a corrosão.

3.10.4.1 Manutenção de rolamentos do motor eléctrico

Durante o desenvolvimento deste trabalho, surgiu a oportunidade de acompanhar a montagem de rolamentos num motor eléctrico.

O período crítico para o rolamento compreende a armazenagem, transporte para a oficina, montagem e posterior colocação em trabalho.

Na Refinaria do Matosinhos utiliza-se, para a montagem de rolamentos, o método de introdução a quente. Esta aplicação de calor expande os seus anéis, possibilitando a colocação do rolamento no veio. É usado um aquecedor por indução, como se pode observar na figura 3.50, com o intuito de desmagnetizar automaticamente o rolamento no fim do ciclo de aquecimento. De outro modo, um rolamento magnetizado actuará como uma autêntico íman de partículas ferríticas, conduzindo à provável falha prematura do rolamento [32].



Figura 3.50. Aquecedor por indução

Depois do aquecimento, o rolamento é colocado de imediato no veio, como se observa na figura 3.51.



Figura 3.51. Montagem de rolamento (1)

Seguidamente, procede-se ao acabamento de limpeza e utilização de lixa na tampa do motor eléctrico. Este acabamento foi efectuado na mesma banca de trabalho, como se pode verificar na figura 3.52.

Depois da colocação do rolamento no veio, os mecânicos procedem à inserção de lubrificante no rolamento, como se visualiza na figura 3.53.



Figura 3.52. Montagem de rolamento (2)



Figura 3.53. Montagem de rolamento (3)

O rolamento ficou a arrefecer sobre a banca de trabalho durante quinze minutos.

Conclusões/Recomendações à montagem de rolamentos

Todo o procedimento utilizado na montagem de rolamentos é correcto. Porém, existem alguns pontos que podem ser melhorados:

- Deve ter-se em atenção a direcção de impulso axial e a orientação dos pontos de excentricidade máxima quer no veio quer no rolamento (isto é, tem que haver um desfasamento), quando este último é colocado [31,32].
- O processo de utilização de lixa na proximidade do local onde ocorre o arrefecimento do rolamento não é o procedimento mais indicado, visto que algumas partículas abrasivas podem inserir-se no rolamento, o que põe em risco a vida útil deste [31,32].

Um projecto de criação de uma *hotte* transportável que cubra o conjunto já montado com os rolamentos, de forma a protegê-los de qualquer tipo de partículas, seria uma solução a ponderar. Com esta *hotte*, os mecânicos teriam mais liberdade de trabalho, pois a protecção do rolamento a partículas indesejáveis estaria assegurada.

Esta análise fica condicionada pelo número de reparações assistidas.

3.10.4.2 Importância do alinhamento preciso de polias

Existem dois tipos de desalinhamento – desalinhamento paralelo ou *offset* e desalinhamento angular. Na prática, normalmente, a posição relativa das polias corresponde à combinação dos dois tipos referidos, como se pode verificar na figura 3.54.

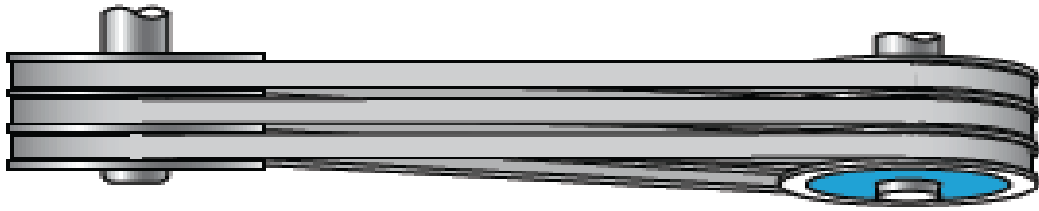


Figura 3.54. Desalinhamento típico.

Esta combinação introduz dificuldades acrescidas durante as operações de alinhamento.

A sequência normal dos procedimentos para corrigir um desalinhamento consiste em iniciar as operações, principiando-se pela redução do desalinhamento angular no plano vertical, e depois o desalinhamento paralelo ou *offset* no mesmo plano [33]. Seguidamente, o alinhamento pode ser confirmado, por exemplo por um sistema laser em que é montado um transmissor de laser numa das polias e o detector na outra polia. O transmissor produz um laser plano, paralelo à polia de referência. O detector lê a posição em relação ao laser plano e fornece a um *display* digital on-line, tanto o desvio, como o valor angular.

As causas do desalinhamento para os aero-arrefecedores podem ser [25]:

- Crescimento térmico;
- Veios empenados;
- Apoios pouco rígidos ou corroídos;
- Rolamentos montados deficientemente;
- Tolerâncias de alinhamento pouco precisas;
- Arranque do equipamento com carga excessiva;
- Paragem abrupta do equipamento;
- Montagem de componentes incorrecta.

Verifica-se que algumas das causas acima referidas, podem ocorrer sem que os responsáveis pela intervenção de manutenção se apercebam, causando um efeito nefasto sobre o alinhamento dos veios e das polias do sistema.

A análise de vibrações é uma das ferramentas mais utilizadas no diagnóstico do desalinhamento das polias. No entanto, a análise de vibrações, apenas no motor eléctrico, não consegue distinguir entre desalinhamento e desequilíbrio de componentes, como foi visto na análise de avarias “Caso B”. Ocorrem situações, na prática, em que o sistema mecânico apresenta um desalinhamento acentuado e o nível global de vibrações, bem como o correspondente espectro de frequências não reflectem essa realidade. A figura 3.55 é outro exemplo de espectro em que não se consegue distinguir a causa principal.

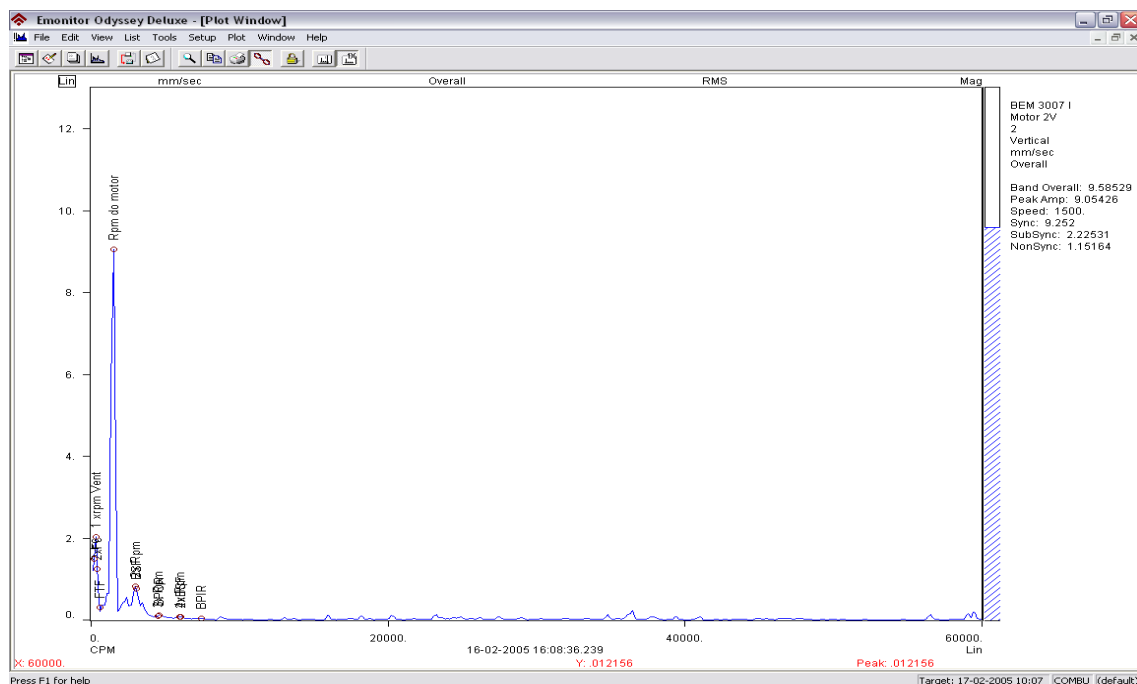


Figura 3.55. Espectro velocidade [mm's] (2V)

Os aero-arrefecedores da unidade 3000 não têm um projecto adequado para uma inspecção bem conseguida, pelo que só é possível uma inspecção visual condicionada às polias e correia, como se pode visualizar na figura 3.56.



Figura 3.56. Vista inferior do aero-arrefecedor

Como se pode observar na figura 3.56, a rede de protecção impossibilita um diagnóstico correcto de desalinhamento das polias. Com este tipo de projecto de aero-

arrefecedor, o desalinhamento torna-se um problema sério e difícil de resolver. O único ponto que se pode melhorar é a montagem.

Se a montagem incorrecta existir terá consequências indesejáveis em todo o sistema, visto que as vibrações e esforços não desejados criados pelo desalinhamento vão diminuir o tempo de vida de todos os componentes do sistema e diminuir o rendimento. Com isto, um ponto de melhoria é ter em conta um alinhamento cuidadoso, através de uso de um método de confirmação de alinhamento, e um tratamento cuidadoso com as correias e polias. A montagem correcta e a utilização de polias e correia em boas condições aumentarão o MTBF dos aero-arrefecedores.

3.10.4.3 Manutenção contra a Corrosão

Os aero-arrefecedores apresentam graves problemas de corrosão devido à proximidade da refinaria ao mar. A corrosão é um grande desafio a nível de fiabilidade e manutenção, principalmente com este tipo de ambiente corrosivo.

A corrosão tem consequências negativas em vários campos – na estrutura, efeito de vibrações, aumento do MTTR. Assim, há a necessidade de considerar a corrosão como um problema sério, sendo que o combate ao seu manifesto terá consequências positivas nas três frentes já mencionadas [34].

A remoção de material devido à corrosão provoca uma diminuição de espessura na estrutura que, por consequência, diminui as propriedades mecânicas, bem como o aumento da propagação de vibrações [34].

A corrosão dos parafusos do chassis do motor eléctrico condiciona de uma forma negativa o MTTR. As figuras 3.57 e 3.58 mostram a corrosão existente nos parafusos, esticadores e no chassis do motor eléctrico.



Figura 3.57. Corrosão uniforme no chassis



Figura 3.58. Corrosão no chassis

Após a análise da figura 3.57, constata-se que o tipo de corrosão presente é corrosão uniforme.

A corrosão uniforme é o tipo de corrosão mais comum, aparecendo como um ataque químico uniforme em toda a superfície, como se visualiza na figura 3.57. Aparentemente, a oxidação não deveria avançar com a oxidação da película protectora do zinco. No entanto,

associando o facto de o zinco e a película oxidada terem coeficientes de dilatação térmica diferentes, a diferença da temperatura ambiente conduz ao aparecimento de fissuras na película, através das quais se dá a progressão da oxidação. Deste modo, ocorre a oxidação do aço da estrutura, pelo mesmo processo anteriormente descrito. Isto tem como consequência uma perda de peso considerável [34], atrasando assim, qualquer tipo de intervenção e danificando componentes nos aero-arrefecedores.

Na Refinaria de Matosinhos são utilizados esquemas de pintura nova e de reparação.

Seria interessante estudar a influência da diminuição do período de reparação preventiva com os resultados da diminuição do tempo de intervenção dos aero-arrefecedores. Contudo, este estudo tem que ter em atenção a variável económica.

Substituição da Estrutura

Um investimento possível a longo prazo seria a substituição da estrutura do chassis do motor eléctrico, parafusos e esticadores para aço inoxidável. Para uma melhor resistência à corrosão imposta pelo ambiente a que está sujeito a Refinaria do Matosinhos, deveriam utilizar-se aços inoxidáveis mais nobres, como por exemplo aços com 18% Cr, 13% Ni 2,5% Mo (AISI316) ou com 18% Cr, 25% Ni e 5% Mo. Contudo, estes aços inoxidáveis nobres, têm um custo bastante superior em relação tipo de aço actualmente utilizado.

Seria interessante ter-se em conta o seguimento desta análise, podendo ser alvo de estudo em trabalhos futuros.

3.10.5 Análise ao Projecto

3.10.5.1 Rigidez da Estrutura ao Suporte do Motor Eléctrico

A análise da rigidez do suporte do motor eléctrico tem especial relevo, uma vez que existem diferentes tipos de suportes do motor eléctrico na refinaria. É importante saber qual deles tem o melhor contributo para minimização de número de falhas nos aero-arrefecedores.

A análise que foi realizada engloba dois tipos de suportes que podem ser visualizados nas figuras 3.59 e 3.60.



Figura 3.59. Suporte do motor eléctrico da unidade 3000.



Figura 3.60. Suporte do motor eléctrico da unidade 1200.

Os suportes e motores eléctricos estão em posição simétrica em relação ao eixo horizontal.

Procurou-se saber qual a influência da barra transversal no número de falhas dos aero-arrefecedores. Assim, fez-se a contabilização, no mesmo intervalo de tempo, para a unidade 1200. Como na unidade 1200, o aero-arrefecedor é do tipo de aspiração do ar por indução, contabilizou-se apenas o número de falhas dos modos de falha dos componentes em que o suporte pode ter influência – polia motora, polia conduzida, correia e rolamentos do motor eléctrico. Agruparam-se os modos de falha do componente correia.

A figura 3.61 mostra a relação entre as unidades. Foi contabilizado o número médio de falhas, pois as unidades têm um número diferente de aero-arrefecedores.

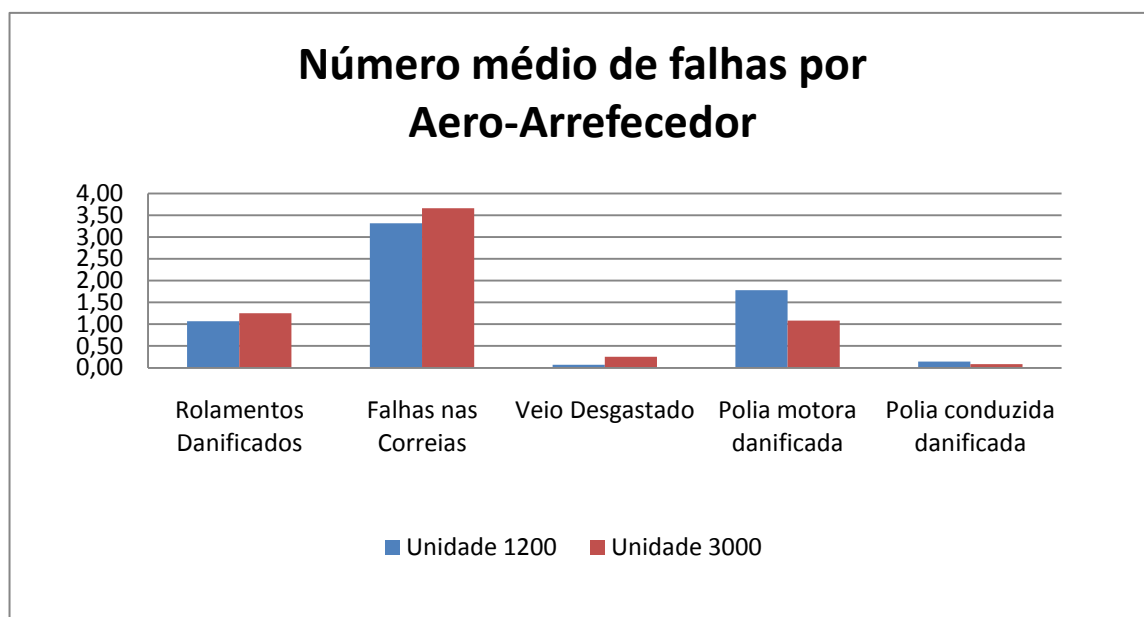


Figura 3.61. Comparação de unidades 1200 e 3000

O gráfico demonstra que não existe diferença significativa sobre o número de falhas. Porém, é preciso salientar que na unidade 1200 não há análise de vibrações, apenas inspeção visual. Assim, os resultados não são tão lineares como seria necessário para se tirar qualquer conclusão.

Deve ter-se em conta o seguimento desta análise, podendo ser alvo de estudo em trabalhos futuros.

4. Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros

4.1 Conclusões

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram incluídas observações e conclusões parciais que, por motivos de espaço não serão repetidas aqui.

A metodologia desenvolvida no capítulo três revelou-se indicada para a análise deste sistema mecânico (aero-arrefecedor). Assim, conseguiu conhecer-se o funcionamento do sistema e principais modos de falha para posterior intervenção.

O plano de estudo definido no capítulo três foi pertinente para se conseguir atingir o objectivo principal deste trabalho. “O conhecimento, na medida do possível, das causas potenciais das falhas é fundamental para as prevenir” [14].

Dado o período de desenvolvimento deste trabalho, os resultados obtidos dizem respeito a um tratamento simplificado do problema real. A simplificação decorre na análise de apenas dois casos de avaria (“Caso A” e “Caso B”), na não análise de manutenção de todos os componentes e do número insatisfatório de acompanhamentos de reparações. Assim, a continuidade da metodologia definida no plano de estudo terá mais consequências positivas a longo prazo.

O tempo definido para a realização deste trabalho não foi suficiente para uma possível comprovação de algumas conclusões/hipóteses.

O trabalho possibilitou a minha evolução profissional e adquirir conhecimentos sobre manutenção e fiabilidade. O facto de o trabalho ter sido realizado na Refinaria de Matosinhos permitiu-me desenvolver aptidões de integração no mundo de trabalho e obter conhecimentos sobre a indústria petroquímica.

4.2 Sugestões de trabalhos futuros

Será interessante perceber que resultados e conclusões se podem obter com a continuação da análise de avarias e a obtenção da base de dados.

Um estudo para perceber a razão da diferença do número de falhas por aero-arrefecedor, seria interessante para compreender melhor os resultados obtidos.

A análise económica versus velocidade de corrosão é um trabalho futuro interessante, para se poder comparar os aços inoxidáveis sugeridos no capítulo três com o aço actualmente utilizado.

Será interessante a continuação do estudo “Análise ao projecto”, visto que é importante perceber qual a influência de cada tipo de suporte de motor eléctrico no número de falhas.

5. Bibliografia

- [1] – Norma Portuguesa. Sistemas de gestão da manutenção. NP 4483.
- [2] – AFNOR, NF EN 13460, Maintenance – Documentation for maintenance. (2009).
- [3] – Aplicações ferroviárias – Especificação e demonstração de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança (RAMS) (2000). Designação NP EN 50126. Instituto Português da Qualidade.
- [4] – Ferreira, Luís Andrade. Uma Introdução à Manutenção, 1ª Edição, 1998.
- [5] – Pinto, Carlos Varela. Organização e Gestão da Manutenção, 2ª Edição, 2002.
- [6] – Moubray, John. Reliability – centred Maintenance, Second Edition, 1997.
- [7] – Assis, Rui. Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção, 1ª Edição, 2004.
- [8] – Cabral, José P. S.. Organização e Gestão da Manutenção, 4ª Edição, 2004.
- [9] – Monchy, F., “La Function Maintenance”; ed. Durban, 1989.
- [10] – Roque, António Afonso. Controlo de Condição em Rolamentos, Apontamentos de formação de vibrações, 2009.
- [11] – Pagès, Alain; Gondran, Michel, System Reliability, First Edition, 1986
- [12] – Leitch, Roger D.. Reliability Analysis for Engineers, First Edition, 1995.
- [13] – Wang, Hongzhou; Pham, Hoang. Reliability and Optimal Maintenance, First Edition, 2006.
- [14] – O’Connor, Patrick D. T.. Practical Reliability Engineering, Fourth Edition, 2002.
- [15] – Blischke, W. R.; Murthy, D. N.. Cases Studies in Reliability and Maintenance. 2003. New Jersey: Wiley-Interscience.
- [16] – Caracterização de algumas distribuições contínuas univariadas. Apontamentos FEUP.
- [17] – Morais, L., Mota, V. e Ferreira, L. (2004) Metodologias de análise de equipamentos. SITEM/FEUP 011/SP/05, Projecto SITEM.
- [18] – GEA Heat Exchangers [website]. Nantes. [actualizado em:2009; citado em: Janeiro de 2010]. Disponível em: www.btt-nantes.com.
- [19] – International Standard, Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), 60812 IEC:2006.
- [20] – NASA, Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, February 2000.
- [21] – Dhillon, B.S.. Design Reliability – Fundamentals and applications, Department of Mechanical Engineering, 1999.
- [22] – International Standard. Fault tree analysis (FTA), 61025 IEC:2006.
- [23] – Vesely, W.E.,Goldberg, F.F.. Fault Tree Handbook, U.S. Nuclear Regulatory 1981.

- [24] – Broch, Jens Trampe. Mechanical vibration and shock measurements, 2nd edition, 1984.
- [25] – Bloch, P.,H.; Geitner, K. Fred. Machinery failure analysis and troubleshooting, 2nd Edition.
- [26] – V. Wowk. Machinery Vibration – Measurement and Analysis, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [27] – Courrech, Joelle; Gaudet, Mark, Envelop Analysis – the Key to Rolling Element Bearing Diagnosis, Application Notes da Bruel & Kjoer.
- [28] – FAG. Rolling Bearing Damage.
- [29] – SKF. Bearing failures and their causes.
- [30] – Industrial Belt and drive preventive maintenance – Troubleshooting guide. Optibelt.
- [31] – Bloch, P.,H.; Geitner, K.. Fred. Machinery Component Maintenance and Repair, Third edition.
- [32] – FAG. Montagem de Rolamentos.
- [33] – Roque, Antonio. Alinhamento de veios com precisão – uma necessidade urgente (Desalinhamento – O inimigo Oculto). 2º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Mantenimiento Mecánico. Abril 2006.
- [34] – Soares Pinto. Aços, características e tratamentos, 5ª edição, 1992.
- [35] – Galp Energia [website]. Portugal; [actualizado em: 2010; citado em: Janeiro de 2010]. Disponível em: www.galpenenergia.com.

Anexo A

Apresentação da Galp Energia

Com a reestruturação do sector energético em Portugal, é constituída em 22 de Abril de 1999, a Galp Energia. A Galp Energia agrupou a Petrogal – a empresa refinadora e principal distribuidora de produtos petrolíferos – e a GDP - sociedade responsável pela importação, transporte e distribuição de gás natural em Portugal. Actualmente, a Galp Energia é a principal empresa integrada de produtos petrolíferos e gás natural do país, com uma presença crescente em Espanha e uma actividade em desenvolvimento no sector da produção e de fornecimento de energia eléctrica e térmica.

O conjunto refinador da Galp Energia é constituído por dois pólos, as refinarias do Matosinhos e de Sines. Estas refinarias garantem uma capacidade de destilação total de 15,2 milhões de toneladas por ano, o que representa 21 por cento da capacidade de refinação na Península Ibérica. Sob a marca Galp, é comercializado em Portugal e em Espanha um volume correspondente a 70 por cento da actual produção das refinarias do Grupo [36].



Figura 5.1. Refinaria do Porto



Figura 5.2. Logótipo da Galp Energia

Fábrica de Combustíveis

A Fábrica de Combustíveis é constituída por um conjunto de unidades processuais que, utilizando como carga principal o petróleo bruto, permitem obter uma vasta gama de produtos combustíveis, nos quais se inclui, também, a matéria-prima da Fábrica de Aromáticos e Solventes.

Dada a flexibilidade e interligação das suas instalações, é possível tratar uma grande variedade de petróleos brutos, permitindo adequar a qualidade da matéria-prima a processar às necessidades do mercado.

Os produtos combustíveis são obtidos através de operações de separação física, tratamento químico, ou ainda por processos de conversão da estrutura molecular de algumas famílias de hidrocarbonetos.

A matéria-prima principal é o petróleo bruto, que é transportado por via marítima e, posteriormente, descarregado no Terminal do porto de Leixões, sendo conduzido até à armazenagem da Refinaria do Matosinhos pelo respectivo *pipeline*.

O processo industrial da Fábrica de Combustíveis é constituído por 14 unidades principais divididas por duas linhas de fabrico, como se pode ver na tabela 5.1

Tabela 5.1. Unidades da Fábrica de Combustíveis

Linha 1	Linha 2
Unidade 1200	Unidade 3000
Unidade 1300	Unidade 3100
Unidade 1400	Unidade 3300
Unidade 1500	Unidade 3400
Unidade 1600	Unidade 3500
Unidade 1700	Unidade 3600
Unidade 3700	
Unidade 3800	

Na Unidade 3000 dá-se a destilação de petróleo bruto, separando-se em fracções mais simples, que poderão ser tratadas em unidades processuais a jusante, passando a constituir componentes de produtos comerciais.

A alimentação da unidade é, normalmente, constituída por uma mistura de diversos petróleos brutos com diferentes características, de modo a optimizar e ajustar as produções obtidas às necessidades do mercado. A alimentação à unidade é feita directamente a partir da armazenagem de petróleo bruto.

As capacidades de produção previstas da unidade 3000 estão descritas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 Capacidades de Produção da Unidade 3000

Carga	Petróleo Bruto	9600 Toneladas/dia
Produção	LPG	236 Toneladas/dia
	Gasolina Leve	425 Toneladas/dia
	Gasolina Pesada	1404 Toneladas/dia
	Petróleo	806 Toneladas/dia
	Gasóleo	2015 Toneladas/dia
	Resíduo	4716 Toneladas/dia

Anexo B

Diagrama Mecânico Geral.

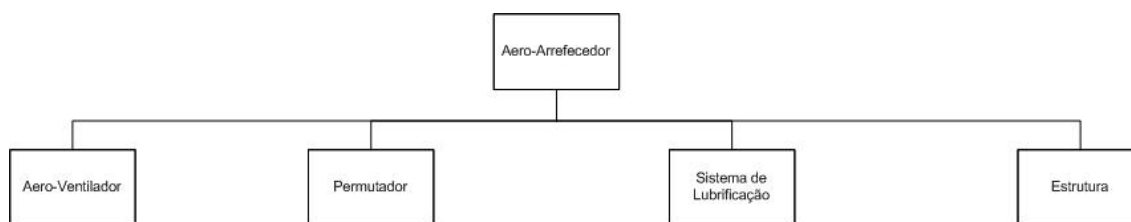


Figura 5.3. Diagrama Mecânico geral

Diagrama Mecânico do subsistema “Sistema de Lubrificação”.

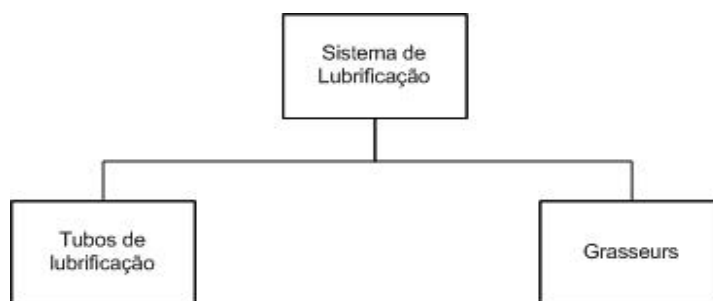


Figura 5.4. Diagrama Mecânico do subsistema – Sistema de Lubrificação

Diagrama Mecânico do subsistema “Permutador”.

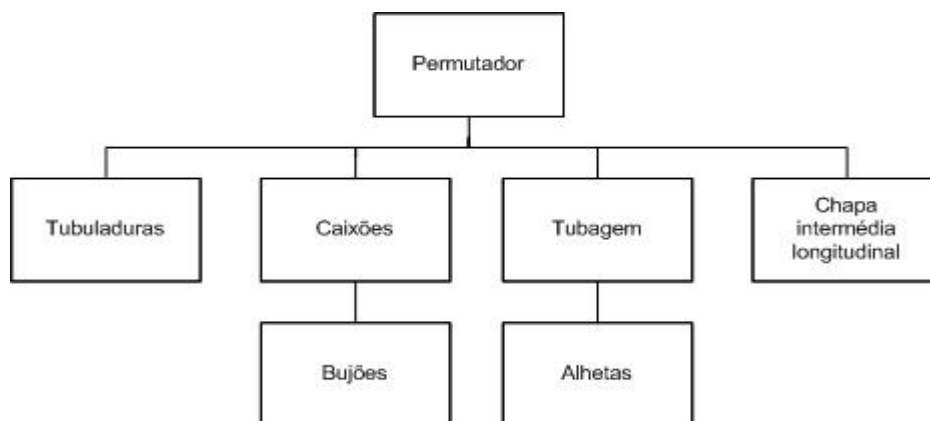


Figura 5.5. Diagrama Mecânico do subsistema – Permutador

Diagrama Mecânico do subsistema “Estrutura”.

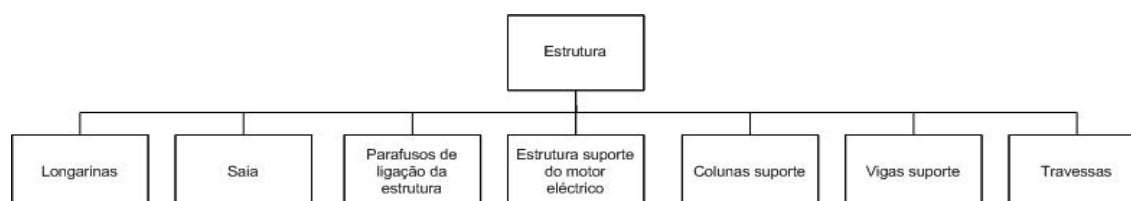


Figura 5.6. Diagrama Mecânico do subsistema – Estrutura

Diagrama Mecânico do subsistema “Aero-Ventilador”.

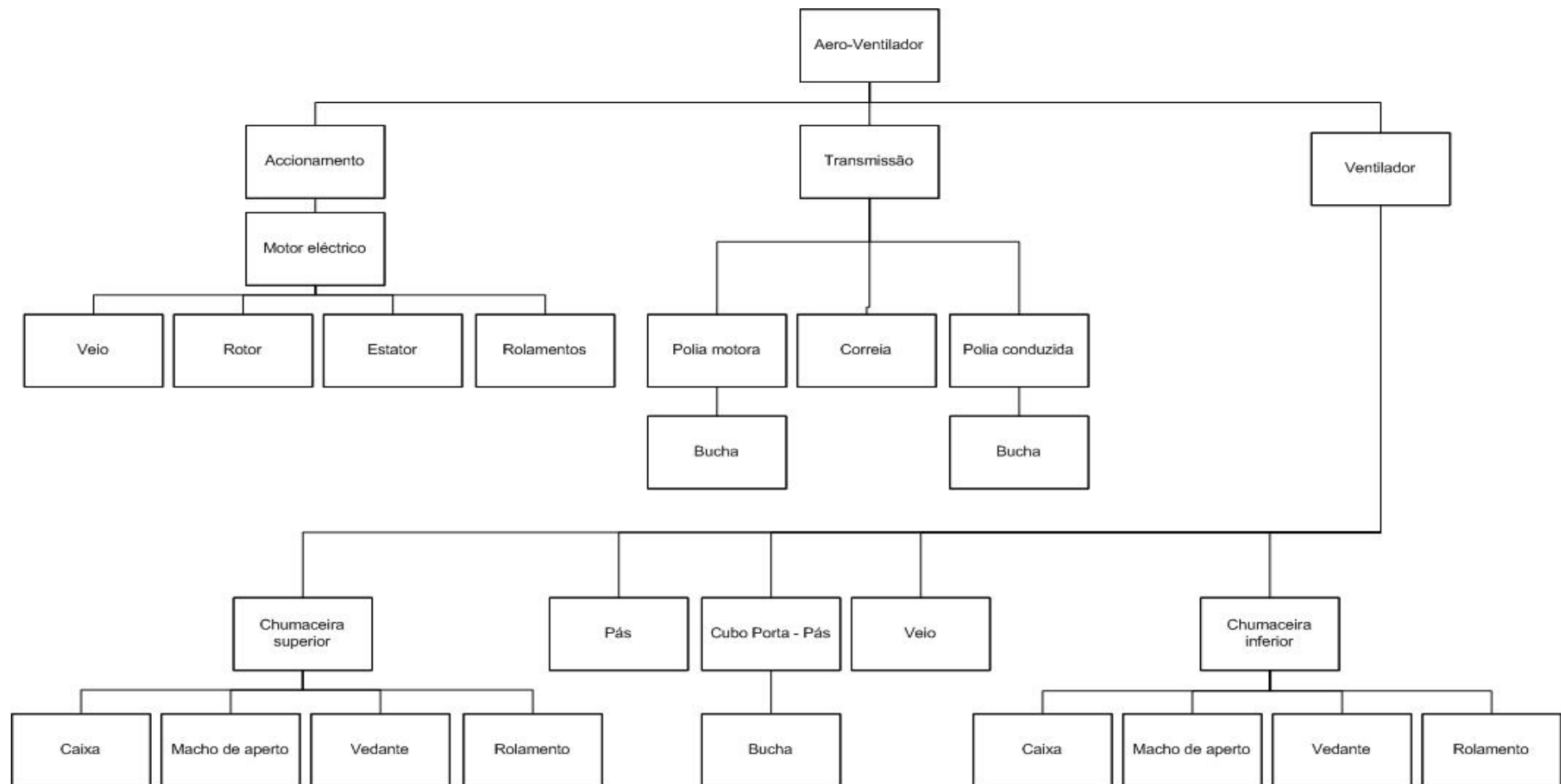


Figura 5.7. Diagrama Mecânico do subsistema – Aero-Ventilador

Anexo C

Características mecânicas dos componentes considerados relevantes para o estudo.

Motor Eléctrico:

O Motor Eléctrico é uma máquina destinada a transformar energia eléctrica em mecânica, utilizando normalmente, o princípio da reacção entre dois campos magnéticos. É o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da energia eléctrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando – com a sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos de rendimentos.

Os motores utilizados na Refinaria do Matosinhos, são os motores de indução trifásicos. Estes motores são basicamente constituídos por duas partes: Estator e Rotor. O estator constitui a parte estática de um motor e o rotor a sua parte móvel. O estator é composto por chapas finas de aço magnético tratadas termicamente, com a finalidade de reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm um formato de um anel com ranhuras internas (vista frontal) de tal maneira que possam ser alojados enrolamentos, que deverão criar um campo magnético no estator. O rotor, composto por chapas finas de aço magnético tratadas termicamente, tal como o estator, tem também o formato de um anel (vista frontal) com os enrolamentos alojados longitudinalmente.

Tabela 5.3. Características dos Motores Eléctricos

AERO	Intensidade Nominal (A)	Potencia (KW)	Tensão (V)	Velocidade de Rotação (RPM)	Rolamentos	
					Lado Ventilador	Lado Acoplado
3007A-3007J	33,00	18,40	380	1500	6312	6312
3009.10A, 3009.10B, 3011A-3011D, 3013A-3013D	40,00	22,00	380	1500	6312	6312
3016.20A, 3016.20B	33,00	18,40	380	1500	6312	6312
3018A-3018B	40,00	22,00	380	1500	6312	6312

Correia

A Correia é uma cinta de material flexível, normalmente feita de camadas de lonas e borracha vulcanizada, que tem como principal objectivo a transmissão de movimento. Isto

é conseguido pela transmissão da força tangencial por meio do atrito da correia com a polia. A potência de transmissão é função da tensão da correia. Contudo, com o aumento da tensão, aumenta também a carga aplicada nas correias e rolamentos. A correia ideal é aquela que com a menor tensão não desliza em cargas exigentes. A tensão das correias deve ser ajustada nos seguintes parâmetros: tipo de correia, tamanho da correia, velocidade de trabalho e o diâmetro das polias. A tensão da correia é determinada através do cálculo da força necessária para provocar uma deflexão na correia por milímetro da polia.

As correias utilizadas na Refinaria do Matosinhos, são as correias com forma trapezoidal, ou seja, têm forma em V. Estas correias transmitem a força tangencial pelo atrito que se gera pela pressão que as laterais da correia exercem contra as paredes do rasgo da polia.

A figura 5.8 representa a correia em forma em V utilizada na Refinaria do Matosinhos e a tabela 5.4 descreve as suas características.

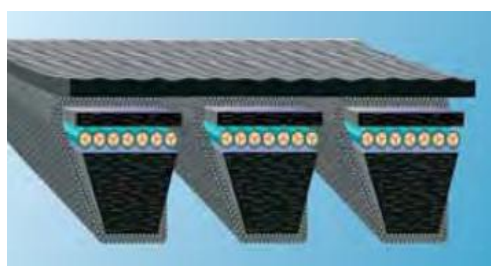


Figura 5.8. Forma da correia em forma em V

Tabela 5.4. Características das correias

Aero-Arrefecedor	Designação
3007-30013	RED POWER KB 4R5V1500 15J 3810MM
3013/3018	RED POWER 3R5V1900 15J 4826MM

Polias

Uma Polia é uma peça mecânica muito comum a diversas máquinas, utilizada para transferir força e movimento. Uma polia é constituída por uma roda de material rígido. Accionada por uma correia, a polia gira entorno de um eixo, transferindo movimento e energia a outro objecto.

Tabela 5.5. Características das polias

Polia	Aero-Arrefecedor	Designação	Material
Motora	3007-3013	4-15J-160	Ferro Fundido
	3016-3018	3-15J-180	Ferro Fundido
Conduzida	3007-3013	4-15J-800	Ferro Fundido
	3016-3018	3-15J-800	Ferro Fundido

Chumaceiras

As chumaceiras utilizadas neste tipo de aero-arrefecedores são “chumaceiras de rolamentos”. Esta expressão serve para descrever uma classe de chumaceiras, nas quais a carga principal é transferida entre os elementos através de contacto por rolamento, em vez de um contacto por escorregamento. Os rolamentos são fabricados para suportarem cargas radiais puras, cargas axiais puras ou uma combinação de ambas.

A chumaceira superior é constituída por um rolamento de esferas, enquanto a chumaceira inferior contém um rolamento de rolos cónicos com disposição em “X”.

Pás:

As Pás da ventoinha agem como asas e produzem força, obedecendo ao princípio de Bernoulli e à 3ª lei de Newton, criando uma diferença de pressões entre ambas superfícies das Pás.

A figura 5.9 mostra a forma das Pás, bem como as medidas principais para a sua caracterização.

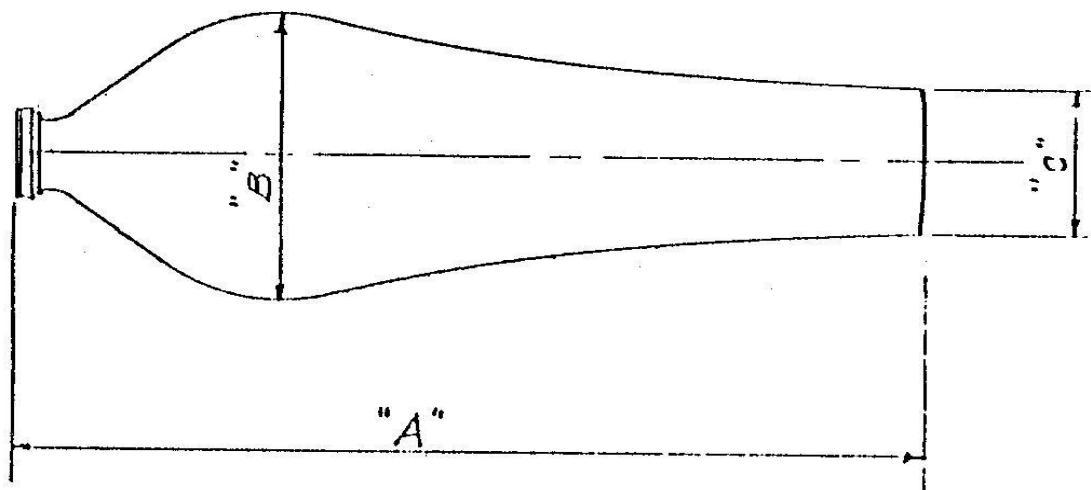


Figura 5.9. Forma das pás

Tabela 5.6. Características das pás

AERO	Designação	Material	A(mm)	B(mm)	C(mm)	Peso(KG)
3007-3011	TB14 FAN HUDSON/NEU	Fibra de vidro	1930	717	346	26
3013	TB13 FAN HUDSON/NEU	Fibra de vidro	1778	717	376	24,5
3016/3018	TB12 FAN HUDSON/NEU	Fibra de vidro	1675	610	295	19

Permutador

Os Permutadores destinam-se a efectuar a troca de calor entre dois fluidos. Tipicamente, o permutador para aero-arrefecedores consiste em feixes de tubos finos com caixotes rectangulares nos dois lados. O ar frio é produzido pelo movimento das pás. Usualmente, o

ar soprado pelas pás movimenta-se em direcção do Permutador que está em posição horizontal. Assim, com este ar frio que entra em contacto com o permutador, existe a transferência de calor desejável arrefecendo o fluido que passa dentro do Permutador.

Na figura 5.10, pode observar-se o aspecto interno de um permutador e perceber o seu funcionamento e posicionamento dos tubos.



Figura 5.10. Forma da estrutura do permutador

Anexo D

Tabela 5.7. Análise FMEA teórica

Sistema/ Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Motor Eléctrico	Transformação de energia eléctrica para energia mecânica para efectuar o accionamento	Inexistência de alimentação	Cabo de alimentação partido	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Protecção do motor actuada	Protecção desafinada	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Protecção do motor não liga	Falha no circuito de comando	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Tensão ou frequência muito fora do valor nominal	Condições instáveis de alimentação, secção dos cabos de alimentação incorrecta	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Rotor roça no Estator	Desalinhamento do veio	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Fusíveis queimados	Curto-circuito nos condutores	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Curto-circuito no motor	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Terminais ligados incorrectamente	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Falha de terra no motor	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Disjuntores desligam imediatamente	Sobrecarga	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Queda de tensão	Secção dos cabos mal dimensionada	Accionamento deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Arrefecimento inadequado	Ventilação obstruída	Diminuição do tempo de vida do motor	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto

Sistema/ Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Motor Eléctrico	Transformação de energia eléctrica para energia mecânica para se efectuar o accionamento	Perda de uma fase	Mau contacto	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Rolamentos gripados	Falta de lubrificação	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desalinhamento de veio	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste por partículas abrasivas, corrosão e humidade	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste por lubrificante inadequado	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste por vibração	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Montagem incorrecta ou sobrecarga	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia com tensionamento elevado	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Rotura dos rolamentos por Fadiga	Cargas irregulares concentradas	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desalinhamento do veio	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia com tensionamento elevado	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Binário irregular	Regulação incorrecta do conversor de frequência	Accionamento deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Carcaça degradada	Condições atmosféricas e ambiente corrosivo	Diminuição do tempo de vida do motor	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Arrefecimento do produto efectuado correctamente

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Polias/Correia	Transmissão de movimento	Bandas da correia fora das ranhuras da polia	Desalinhamento das polias	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Secção dos canais das polias mal escolhidos	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste dos canais das polias	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			“Excessive belt flap”	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia sem tensão	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia desgastada	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Entrada de um corpo não identificado	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Excessivo desgaste nos flancos da correia	Ângulo dos canais das polias incorrecto	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Secção dos canais das polias incorrecto	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desgaste dos canais das polias	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desalinhamento das polias	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Diâmetro da polia motora inferior ao recomendado pelo fabricante	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Dilatação ou contracção da correia	Contaminação por óleo ou outro produto químico	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Cortes e fissuras na base da correia	Diâmetro da polia motora inferior ao recomendado pelo fabricante	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Polias/Correia	Transmissão de movimento	Cortes e fissuras na base da correia	Temperatura de trabalho superior ou inferior aconselhada pelo fabricante.	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desalinhamento da correia	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Contaminação por óleo ou outro produto químico	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Correia partida	Dimensionamento da transmissão mal efectuada	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia presa na polia	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Entrada de um corpo não identificado	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Excessiva carga de arranque	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Deslizamento da correia	Dimensionamento da transmissão mal efectuada	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Elementos de tracção da correia danificados	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desgaste dos canais das polias	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Alteração do entre-eixo das polias	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Correia em lâminas	Diâmetro das polias muito pequeno	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Excessiva vibração na transmissão	Correia incorrecta	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Distancia entre-eixo maior que o recomendado	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz

Sistema/ Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Polias/Correia	Transmissão de movimento	Excessiva vibração na transmissão	Componentes da transmissão soltos	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Excessiva carga de arranque	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Baixa tensão na correia	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Separação das bandas da correia	Polia desgastada	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Secção dos canais das polias mal escolhidos	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Ruído na transmissão	Desalinhamento da correia	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Contaminação por óleo ou outro produto químico	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Componentes da transmissão soltos	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desalinhamento das polias	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Correia mal escolhida	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Polia desgastada	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Polia partida ou danificada	Instalação da polia incorrecta	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Entrada de um corpo não identificado	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Excessiva velocidade de rotação	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto

Análise de Manutenção dos Aero-Arrefecedores

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Polias/Correia	Transmissão de movimento	Polia partida ou danificada	Instalação da correia incorrecta	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Rápido e severo desgaste dos canais da polia	Correia com tensionamento elevado	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Presença de detritos, areia ou contaminação na transmissão	Transmissão deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
Veio	Transmissão de binário para o ventilador	Veio partido por fadiga mecânica	Cargas cíclicas elevadas	Não há transmissão de binário	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Desgaste acentuado	Cargas elevadas	Transmissão de binário deficiente e produção de vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
Chumaceira	Realizam o apoio dos componentes rotativos	Desgaste acentuado	Contacto entre o veio e a chumaceira	Produção de caudal de ar insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Rolamentos gripados	Falta de lubrificação	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desalinhamento do veio	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste por partículas abrasivas, corrosão e humidade	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste por lubrificante inadequado	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desgaste por vibração	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Montagem incorrecta ou sobrecarga	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia com tensionamento elevado	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Sobreaquecimento	Lubrificação incorrecta	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto

Sistema/ Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Chumaceira	Realizam o apoio dos componentes rotativos	Cavitação	Lubrificação insuficiente	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Rotura dos rolamentos por Fadiga	Cargas irregulares concentradas	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desalinhamento do veio	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Correia com tensionamento elevado	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Corrosão	Lubrificante degradado	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Tubo de lubrificação danificado	Corrosão	Ventilador parado	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto
Pás	Produção de caudal de ar	Pás partidas	Velocidade de rotação excessiva	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Agregação das pás ao cubo mal efectuado	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Distancia inadequada entre a ponta das pás e a saia	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Desequilíbrio das Pás	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Ângulo das Pás incorrecto	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Pás não complanares	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
			Pás muito perto da saia	Não existe produção de caudal de ar	Aero-Ventilador não funciona	Não efectuado o arrefecimento do produto
		Vibração das pás	Velocidade de rotação excessiva	Produção de caudal de ar insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Pás	Produção de caudal de ar	Vibração das pás	Agregação das pás ao cubo mal efectuado	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Distancia inadequada entre a ponta das pás e a saia	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desequilíbrio das Pás	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Ângulo das Pás incorrecto	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Pás não complanares	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Vibração transmitida pela estrutura	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Pás muito perto da saia	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Desalinhamento do veio	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Chumaceira que suportam o veio desgastadas	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Pá com superfície desgastada	Material de má qualidade	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Condições atmosféricas	Produção de caudal insuficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
Permutador	Efectuar a transferência de calor entre o caudal de ar e o produto	Fuga no bujão	Corrosão	Paragem do permutador	Não é efectuado o arrefecimento do produto	Não é efectuado o arrefecimento do produto
			Bujões mal apertados	Paragem do permutador		
		Fuga na tubagem	Corrosão	Paragem do permutador		
		Alhetas em mau estado	Corrosão	Arrefecimento do produto não eficaz	Arrefecimento do produto não eficaz	Arrefecimento do produto não eficaz
			Sujidade			
			Desgaste			
		Desgaste da chapa intermédia longitudinal	Condições atmosféricas	Segurança comprometida	Aero-Arrefecedor com funcionamento normal	Arrefecimento do produto eficaz

Sistema/ Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		
				Subconjunto	Subsistema	Sistema
Estrutura	Suporte de todos componentes do aero-arrefecedor	Saías degradadas	Corrosão	Aproveitamento do caudal de ar gerado pelas pás deficiente	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Condições atmosféricas	Aproveitamento do caudal de ar gerado pelas pás deficiente	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Rede de protecção solta	Montagem incorrecta	Segurança comprometida	Aero-Arrefecedor com funcionamento normal	Arrefecimento do produto normal
		Estrutura de suporte do motor eléctrico	Corrosão	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Condições atmosféricas	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Vibração do motor	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Montagem incorrecta	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
		Travessa e longarinas em mau estado	Corrosão	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Condições atmosféricas	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Vibração	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz
			Montagem incorrecta	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz

Anexo E

Tabela 5.8 Análise FMEA Real

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Motor Eléctrico	Transformação de energia eléctrica para energia mecânica para efectuar o accionamento	Rolamentos danificados (RD)	Falta de lubrificação	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Desalinhamento dos veios	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por partículas abrasivas, corrosão e humidade	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por lubrificante inadequado	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por vibração	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Montagem incorrecta ou sobrecarga	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Correia com tensionamento elevado	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Cargas irregulares concentradas	Produções de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desalinhamento do veio	Produções de vibrações e ruído		Arrefecimento do produto não eficaz	
		Corrente com oscilações (AO)	Correia mal tensionada	Diminuição do tempo de vida do motor	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	Degradação
		Falha desconhecida com paragem do Motor Eléctrico (FD)	Causa desconhecidas provocando a paragem do motor eléctrico	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	Critica
		Falha de dispositivos de protecção e controlo (FDPC)	Cabo de alimentação partido	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Protecção desafinada	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Motor Eléctrico	Transformação de energia eléctrica para energia mecânica para efectuar o accionamento	Falha de dispositivos de protecção e controlo (FDPC)	Falha no circuito de comando	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	Critica
			Condições instáveis de alimentação, secção dos cabos de alimentação incorrecta	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Desalinhamento do veio	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Curto-circuito nos condutores	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Curto-circuito no motor	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Terminais ligados incorrectamente	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Falha de terra no motor	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Sobrecarga	Não há accionamento	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
		Variador de velocidade danificado (VVD)	Regulação incorrecta do conversor de frequência	Accionamento deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
		Tampa do ventilador degradada (TVD)	Corrosão	Diminuição do tempo de vida do motor	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	Incipiente
		Carcaça degradada (CMD)	Condições atmosféricas	Diminuição do tempo de vida do motor	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	
			Corrosão	Diminuição do tempo de vida do motor	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Polias/correias	Transmissão de movimento	Polia motora partida ou danificada (PMPD)	Instalação da polia incorrecta	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Critica
			Entrada de um corpo não identificado	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Excessiva velocidade de rotação	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Instalação da correia incorrecta	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Correia com tensionamento elevado	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Presença de detritos, areia ou contaminação na transmissão	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
		Polia conduzida partida ou danificada (PPCD)	Instalação da polia incorrecta	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Critica
			Entrada de um corpo não identificado	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Excessiva velocidade de rotação	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Instalação da correia incorrecta	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Correia com tensionamento elevado	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Presença de detritos, areia ou contaminação na transmissão	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
		Correia desgastada (CD)	Desalinhamento das polias	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Secção dos canais das polias mal escolhidos	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Polias/correias	Transmissão de movimento	Correia desgastada (CD)	Desgaste dos canais das polias	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Entrada de um corpo não identificado	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Ângulo dos canais das polias mal escolhido	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Diâmetro da polia motora inferior ao recomendado pelo fabricante	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Contaminação por óleo ou outro produto químico	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Temperatura de trabalho superior ou inferior aconselhada pelo fabricante.	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Baixa tensão na correia	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
		Correia partida (CP)	Dimensionamento da transmissão mal efectuada	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	Critica
			Correia presa na polia	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Entrada de um corpo não identificado	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
			Excessiva carga de arranque	Não há transmissão	Aero-Ventilador parado	Não efectuado o arrefecimento do produto	
		Correia mal tensionada (CMT)	Dimensionamento da transmissão mal efectuada	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Elementos de tracção da correia danificados	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste dos canais das polias	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Polias/correias	Transmissão de movimento	Correia mal tensionada (CMT)	Alteração do entre-eixo das polias	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
		Falha na equilibragem do conjunto rotativo (FECR)	Desalinhamento das polias	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desequilíbrio das Pás	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Folgas nas chumaceiras	Transmissão deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
Veio	Transmissão do binário para o ventilador	Veio empenado ou desgastado (VED)	Cargas elevadas	Transmissão de binário deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Cargas cíclicas elevadas	Transmissão de binário deficiente com produção de ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
Conjunto chumaceiras	Realizam o apoio dos componentes rotativos	Conjunto Chumaceiras danificadas (CCD)	Contacto entre o veio e a chumaceira	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Falta de lubrificação	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desalinhamento do veio	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por partículas abrasivas, corrosão e humidade	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por lubrificante inadequado	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste por vibração	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Conjunto chumaceiras	Realizam o apoio dos componentes rotativos	Conjunto Chumaceiras danificadas (CCD)	Montagem incorrecta ou sobrecarga	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Correia com tensionamento elevado	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Cargas irregulares concentradas	Alteração da posição do veio, cubo e pás com produção de vibrações e ruído	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
Pás	Produção de caudal de ar	Ângulo incorrecto (AI)	Agregação das pás ao cubo mal efectuado	Produção do caudal de ar deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Degradação
			Desalinhamento do veio	Produção do caudal de ar deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Chumaceira que suportam o veio desgastadas	Produção do caudal de ar deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Velocidade de rotação excessiva	Produção do caudal de ar deficiente	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
		Pás soltas (PS)	Agregação das pás ao cubo mal efectuado	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Crítica
		Pás partidas ou danificadas (PPD)	Velocidade de rotação excessiva	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Agregação das pás ao cubo mal efectuado	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Distancia inadequada entre a ponta das pás e a saia	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desequilíbrio das Pás	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Ângulo das Pás incorrecto	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Pás	Produção de caudal de ar	Pás partidas ou danificadas (PPD)	Pás não complanares	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Critica
			Pás entram em contacto com a estrutura da saia	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Material de má qualidade	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Condições atmosféricas	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desalinhamento do veio	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Chumaceira que suportam o veio desgastadas	Produção do caudal de ar deficiente, ruído e vibrações	Aero-Ventilador com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
Sistema de Lubrificação	Assegurar a lubrificação aos rolamentos do motor eléctrico e às chumaceiras	Tubo de lubrificação danificado	Montagem incorrecta	Diminuição do tempo de vida da chumaceira e do motor eléctrico	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	Incipiente
			Corrosão	Diminuição do tempo de vida da chumaceira e do motor eléctrico	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	
			Condições atmosféricas	Diminuição do tempo de vida da chumaceira e do motor eléctrico	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	
		Grasseurs danificados (GD)	Montagem incorrecta	Compromete a lubrificação das chumaceiras e dos rolamentos do motor eléctrico	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	
			Utilização incorrecta por parte do operador	Compromete a lubrificação das chumaceiras e dos rolamentos do motor eléctrico	Aero-Ventilador com funcionamento normal	Efectuado o arrefecimento do produto	

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Permutador	Efectuar a transferência de calor entre o caudal de ar e o produto	Fuga no bujão (FB)	Corrosão	Paragem do permutador	Não é efectuado o arrefecimento do produto	Não é efectuado o arrefecimento do produto	Critica
			Bujões mal apertados	Paragem do permutador			
		Fuga na tubagem (FT)	Corrosão	Paragem do permutador	Não é efectuado o arrefecimento do produto	Não é efectuado o arrefecimento do produto	Incipiente
		Alhetas em mau estado (AME)	Corrosão	Arrefecimento do produto não eficaz	Arrefecimento do produto não eficaz	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Sujidade	Arrefecimento do produto eficaz		Arrefecimento do produto não eficaz	
			Desgaste	Arrefecimento do produto eficaz		Arrefecimento do produto não eficaz	
		Desgaste da chapa intermédia longitudinal (DCIL)	Condições atmosféricas	Segurança comprometida	Aero-Arrefecedor com funcionamento normal	Aero-Arrefecedor com funcionamento normal	
		Estrutura	Suporte de todos componentes do aero-arrefecedor	Saías degradadas (SD)	Corrosão	Aproveitamento do caudal de ar gerado pelas pás deficiente	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência
Condições atmosféricas	Aproveitamento do caudal de ar gerado pelas pás deficiente						
Rede de protecção solta (RPS)	Montagem incorrecta			Segurança comprometida	Aero-Arrefecedor com funcionamento normal	Arrefecimento do produto normal	
Estrutura de suporte do motor eléctrico (ESME)	Corrosão			Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
	Condições atmosféricas			Segurança comprometida e produção de vibrações			
	Montagem incorrecta			Segurança comprometida e produção de vibrações			
	Corrosão			Segurança comprometida e produção de vibrações			
Travessa e longarinas em mau estado (TLME)	Condições atmosféricas			Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Análise de Manutenção dos Aero-Arrefecedores

Sistema/Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Impacto da Falha
				Subconjunto	Subsistema	Sistema	
Estrutura	Suporte de todos componentes do aero-arrefecedor	Travessa e longarinas em mau estado (TLME)	Vibração	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	Incipiente
			Montagem incorrecta	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	
			Corrosão	Segurança comprometida e produção de vibrações	Aero-Arrefecedor com baixa eficiência	Arrefecimento do produto não eficaz	

Anexo F

Árvore de Falhas Inicial.

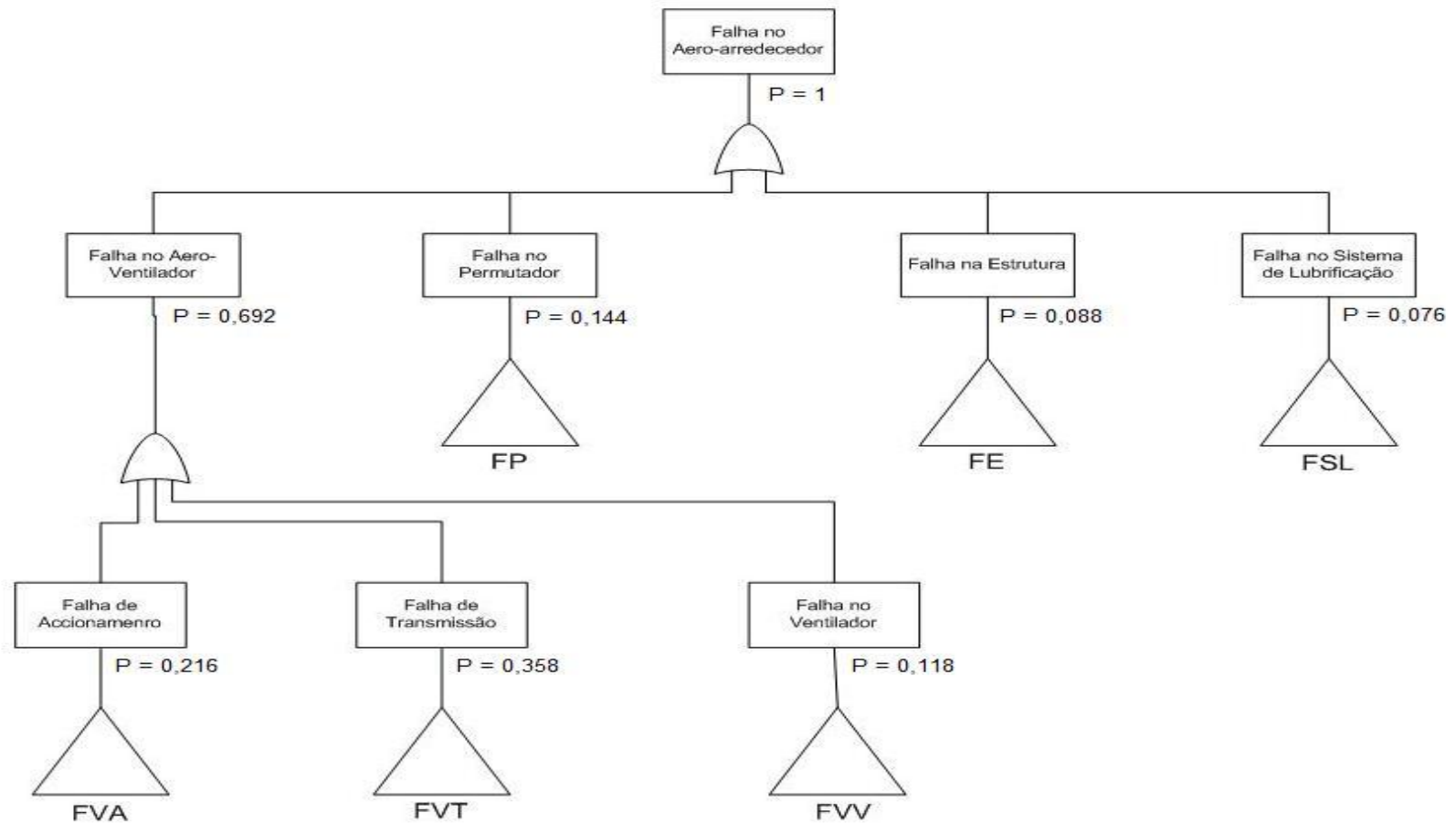


Figura 5.11. FTA inicial

Árvores de Falhas do subsistema Transmissão.

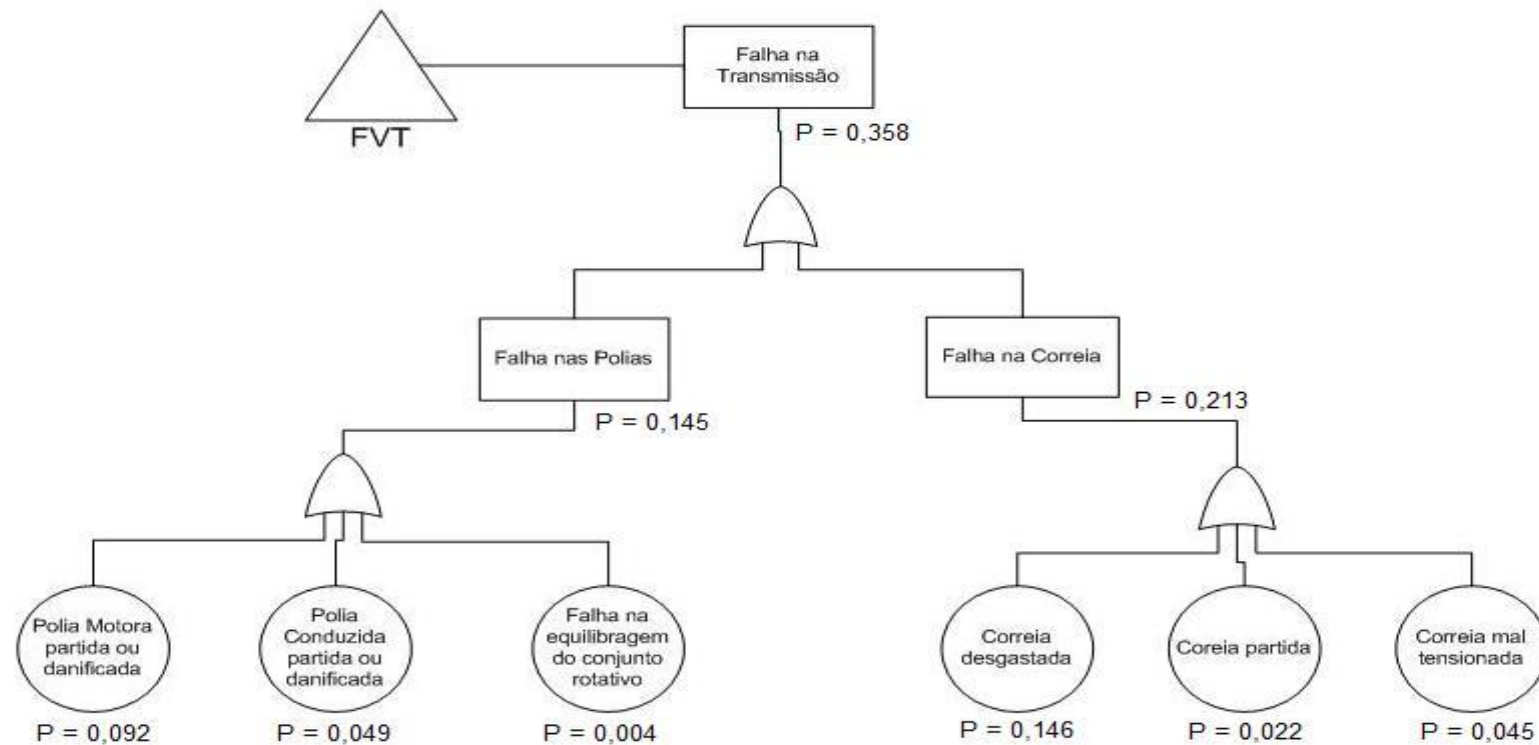


Figura 5.12. FTA do subsistema transmissão

Árvore de Falhas do subsistema Ventilador.

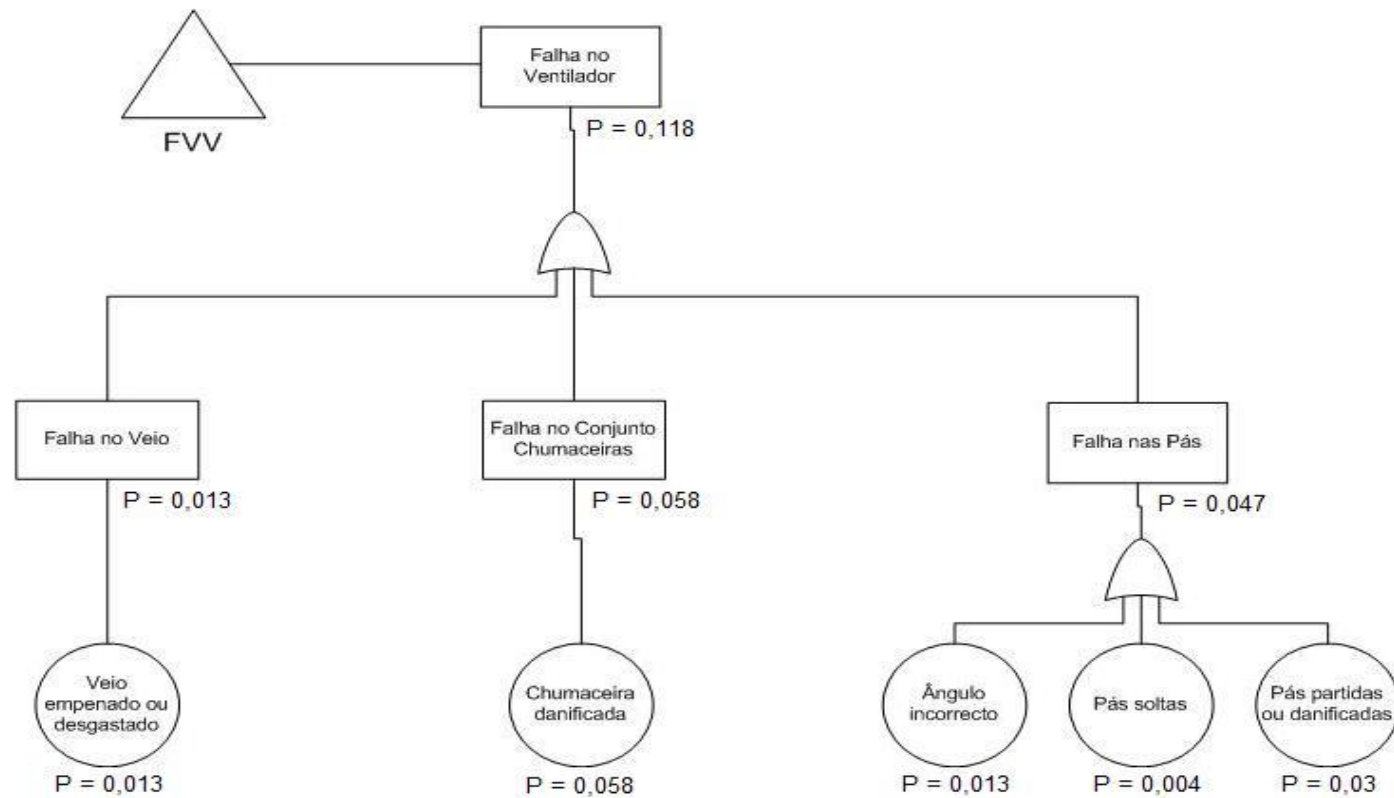


Figura 5.13. FTA do subsistema Ventilador

Árvore de Falhas do subsistema Accionamento.

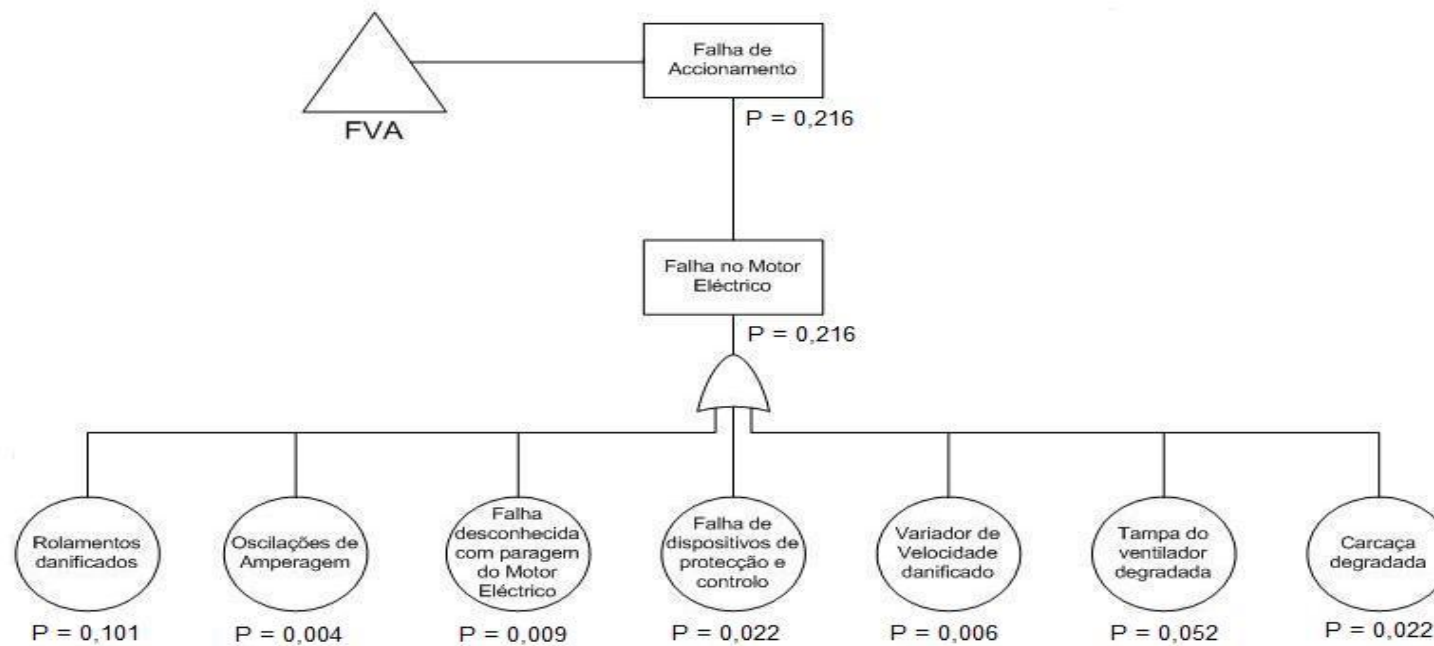


Figura 5.14. FTA do subsistema Accionamento

Árvore de Falhas do subsistema Permutador.

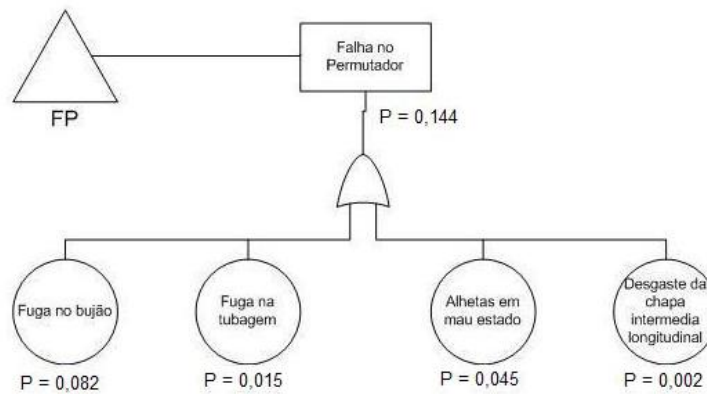


Figura 5.15. FTA do subsistema Permutador

Árvore de Falhas do subsistema Estrutura.

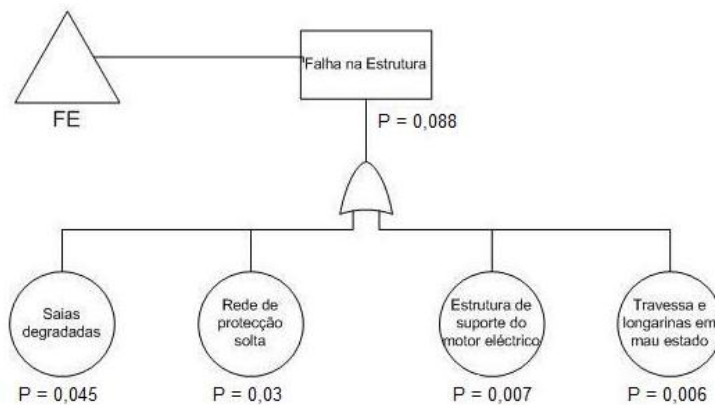


Figura 5.16. FTA do subsistema Estrutura

Árvore de Falhas do subsistema Sistema de Lubrificação.

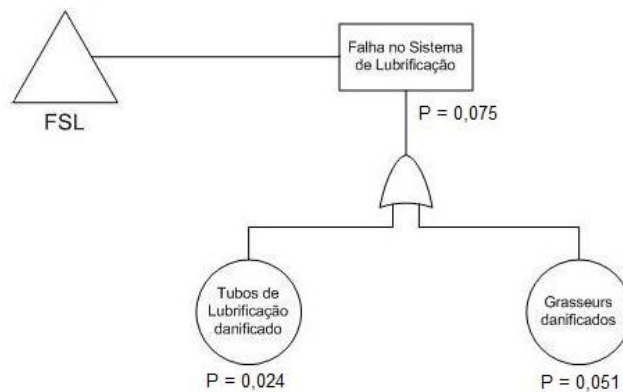


Figura 5.17. FTA do subsistema do Sistema de Lubrificação