

**Implementação de RCM-*Reliability Centred*
Maintenance em equipamento novo:
Caso de estudo**

Tiago Filipe Gonçalves do Cabo

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Luís Andrade Ferreira

Orientador Bosch BrgP: Eng^a. Bruna Neto



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho, 2017

A ti
pela loucura
de estares comigo.

Resumo

O presente trabalho foi realizado em ambiente empresarial e tem como principal objetivo o estudo da implementação da metodologia *Reliability Centred Maintenance* (RCM) num equipamento sem histórico de funcionamento. Pretende-se, também, aumentar a eficiência da manutenção em consequência do crescimento da empresa.

Esta dissertação inicia-se pelo estudo do estado atual da manutenção, com a análise de alguns *Key Performance Indicators* (KPIs), como por exemplo a relação entre os tipos de manutenção preventiva. Na sequência deste trabalho foram realizadas entrevistas a diversos elementos da equipa, de modo a avaliar a sua sensibilidade para a problemática da manutenção de *software*.

Posteriormente, aplicou-se a metodologia RCM começando-se por um *breakdown* do equipamento nos seus constituintes. De seguida, efetuou-se um *Failure Modes, Effects and Critically Analysis* (FMECA) com o objetivo de obter as funções principais, as causas e os efeitos das falhas no equipamento. Por fim, às falhas mais críticas, escolheram-se os tipos de manutenções mais adequados com base numa árvore de decisão.

Com a execução do trabalho concluiu-se que a metodologia revela-se eficaz no tratamento de equipamentos novos, uma vez que permite a deteção de problemas e a deteção de possíveis *spare parts* de forma mais atempada.

Constatou-se ainda que a empresa possui excelentes requisitos para a implementação desta metodologia, entre os quais a receptividade da chefia para a problemática da seleção de tarefas de manutenção e a familiaridade da empresa com a ferramenta FMECA. A empresa possui ainda disponibilidade de meios para a aplicação de todo o tipo de manutenções que se revelem vantajosas.

Abstract

All work was conducted in business environment and its goal is the study of the implementation of a maintenance policy called Reliability Centred Maintenance (RCM) on new equipment as main goal. Due to the company growth the need to control the maintenance costs is getting more relevant.

To be able to understand this problem, some Key Performance Indicators (KPIs) of the department were calculated and interviews were conducted with software maintenance technicians in order to evaluate their awareness about software maintenance.

The next topic is about RCM itself, it is described the complete methodology and the results regarding the application of RCM on Press Fit machine are presented. All the process starts with the breakdown of the machine in its parts and subassemblies.

In conclusion, RCM has shown great potential dealing with new equipment once has enable maintenance team to discover and deal with some problems before the machine start producing. RCM also provides a deep knowledge about the machine. It was also seen that Bosch has excellent conditions to apply this philosophy because the managers are aware of the importance of maintenance and the company itself has been using FMECA regarding the process definition of a product.

Agradecimentos

Quero começar por agradecer à *Bosch Car Multimedia*, na pessoa da Engenheira Bruna Neto, por desde o primeiro momento se mostrar entusiasmada com o projeto e por estar sempre disponível para esclarecer dúvidas e ajudar no que fosse preciso.

Quero também agradecer ao Miguel Sousa pela partilha de conhecimento sobre o tema, mas também a todos os restantes colegas, que permitiram uma excelente integração na equipa.

Quero agradecer ao meu orientador, o Professor Luís Andrade Ferreira, que sempre se mostrou pronto a ajudar e a partilhar toda a sua experiência profissional, apoio esse que se revelou essencial para a execução do trabalho.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos, família e à minha namorada por todo o apoio prestado ao longo do meu percurso académico.

A todos, um bem-haja.

Índice

Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas.....	xv
Lista de abreviaturas.....	xvii
Parte A.....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2. Objetivo.....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	1
2. O Grupo Bosch.....	2
2.1. O Grupo Empresarial	2
2.2. A Bosch Car multimédia em Portugal.....	2
3. Overview da Manutenção da Bosch BrgP	4
3.1. Descrição geral.....	4
3.2. Manutenção de software.....	8
4. TPM.....	11
4.1. Introdução.....	11
4.2. Evolução do TPM.....	14
4.3. TPM na Bosch.....	15
5. Diferença entre teoria e prática.....	19
5.1. Introdução.....	19
5.2. Dificuldades na aplicação da teoria da manutenção.....	19
Parte B	20
1. RCM, o que é?	20
2. Preparação do estudo	23
2.1. Realidade encontrada	23
3. Seleção do equipamento e sua caracterização	24
3.1. Introdução.....	24
3.2. O caso em estudo.....	24
4. Análise das Falhas Funcionais (FFA).....	29
4.1. Introdução.....	29
4.2. Análise do caso em estudo	30

5.	Recolha de dados	32
5.1.	Introdução.....	32
5.2.	No caso em estudo.....	32
6.	FMECA, análise dos modos de falha, efeitos e criticidade	33
6.1.	Tipos de modos de falha.....	33
6.2.	Perdas de capacidade.....	33
6.3.	Excesso de exigência.....	34
6.4.	Qual o detalhe a efetuar na análise.....	35
6.5.	Efeitos dos modos de falha.....	35
6.6.	Realidade encontrada	35
6.7.	Determinação dos intervalos de manutenção	40
6.8.	Determinação das ações de manutenção	41
7.	Organização e planeamento das manutenções preventivas	44
7.1.	Modelo AHP	47
8.	Implementação e atualização dos dados	49
8.1.	Introdução.....	49
8.2.	Aceitação pelos responsáveis	49
8.3.	Descrições das tarefas	50
8.4.	Alterações de design.....	51
8.5.	Instruções de trabalho.....	51
8.6.	Atualização dos dados	51
9.	Conclusões.....	52
10.	Trabalho Futuro	53
11.	Referências.....	54
12.	Anexos	56

Índice de figuras

Figura 1 - Caracterização da equipa da manutenção	2
Figura 2 - Evolução do número de intervenções	5
Figura 3 - Evolução dos MWT e do MTTR por semana.....	6
Figura 4 - Evolução do MTBF por semana	6
Figura 5 - Evolução da relação preventivas/ corretivas ao longo dos últimos 3 anos bem como o objetivo para 2017/2018	7
Figura 6 - Fração das manutenções causadas por motivos de software	8
Figura 7 - Kanban de produção usado na Bosch BrgP	12
Figura 8 - Mudança de paradigma na gestão da manutenção (adaptado de Kennedy 2009) ...	14
Figura 9 - Diagrama de Ishikawa usado nas FRPs	15
Figura 10 - Ciclo PDCA	16
Figura 11 - Tipo de perdas avaliadas pelo OEE (adaptado de Pinto 2009).....	17
Figura 12 - Padrão internacional para o OEE e para as suas parcelas (adaptado de Vorne 2016)	17
Figura 13 - Descrição da evolução dos estudos sobre RCM na indústria aeronáutica Americana acerca de RCM (adaptado de Kennedy 2009)	20
Figura 14 - Evolução da "curva da banheira ao longo do tempo (adaptado de Kennedy, 2009)	21
Figura 15 - Consequência da execução da manutenção preventiva sistemática de forma desajustada (adaptado de Kennedy, 2009)	21
Figura 16 - Divisão da máquina em Módulos	25
Figura 17A - Principais postos da máquina.....	25
Figura 18 – Sub-módulos do posto de picking up	26
Figura 19 - Componentes presentes no módulo de prensagem	26
Figura 20 - Componentes presentes no posto de medição da altura dos pinos	27
Figura 21 - Componentes presentes no posto de inspeção da concentricidade dos pinos.....	27
Figura 22 - Digrama funcional do equipamento.....	28
Figura 23 - Subdivisão do módulo de pick and place	36
Figura 24 - Visualização dos níveis de RPN obtidos	38
Figura 25 - Resultados FMECA	39
Figura 26 - Curva P-F (adaptado de Rausand 1998)	41
Figura 27 - Árvore de decisão (adaptado de Moubray 1997).....	43
Figura 28 - Framework do novo método de gestão e planeamento das preventivas	44
Figura 29 - Distribuição dos pesos usando percentis	45
Figura 30 - Esquema hierárquico para o AHP	47

Índice de tabelas

Tabela 1 - Resumo das respostas ao inquérito realizado sobre manutenção de software	9
Tabela 2 - Principais características dos modos de melhorias (adaptado de Pinto 2009)	11
Tabela 3 - Extrato de uma folha SMED (adaptado de Pinto 2009)	12
Tabela 4 - Os cinco princípios do 5S (adaptado de Pinto 2009)	13
Tabela 5 - OEE na fábrica	18
Tabela 6 - Análise das principais funções do equipamento.....	31
Tabela 7 - Caracterização dos níveis de severidade	37
Tabela 8 - Caracterização dos níveis de ocorrência	37
Tabela 9 - Caracterização dos níveis de detetabilidade	38
Tabela 10 - Atribuição de níveis de importância ao valor de RPN	38
Tabela 11 - Definição dos pesos para o atraso de planeamento das ações preventivas	45
Tabela 12 - Níveis de classificação dos critérios de importância de cada manutenção preventiva	46
Tabela 13 - Pesos para cada manutenção com base na sua aplicação	47
Tabela 14 - Determinação do BIR com base no numero de turnos e na existência de equipamentos duplicados.....	47
Tabela 15 - Gama de classificação utilização na comparação dos critérios.....	48
Tabela 16 - Resultados da comparação dos critérios BIR, Delay, Criticidade.....	48
Tabela 17 - Hierarquização dos três critérios	48

Lista de abreviaturas

CM – *Corrective Maintenance*

FMECA – *Failure Modes, Effects and Critically Analysis*

IoT - *internet of things*

KPI – *Key Performance Indicator*

MTTR - *Mean Time to Repair*

MWT - *Mean Waiting Time*

PM – *Preventive Maintenance*

RCM - *Reliability Centred Maintenance*

RFID - *Radio Frequency Identification*

SMED - *Single Minute Exchange of Die*

TPM - *Total Productive Maintenance*

TPS - *Toyota Production System*

TQS - *conceitos do total quality system*

PM - *Manutenção Preventiva*

FFA - *Function Failure Analysis*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

Parte A

1. Introdução

1.1. Enquadramento do projeto e motivação

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto de final de mestrado do curso de Engenharia Mecânica da FEUP. Foi realizado em ambiente empresarial, na empresa *Bosch Car Multimedia Portugal*, situada na Rua Max Grundig, em Braga. O estágio foi desenvolvido entre fevereiro e junho no departamento de manutenção da área de montagem final (TEF8).

Com o crescimento da empresa ao longo destes últimos anos e com o que vai acontecer num futuro próximo, a Bosch depara-se com a necessidade de ajustar as suas políticas de manutenção a esta nova realidade. Estas mudanças estão a alterar o tipo de produtos concebidos e montados na fábrica, o que está a levar a que estejam a ser inseridas máquinas novas na empresa, sendo estas muitas vezes únicas no mundo.

1.2. Objetivo

O desafio proposto foi o de avaliar a introdução da metodologia RCM aplicada a novos equipamentos, com o fim de ter uma abordagem mais correta ao equipamento desde o primeiro dia. Pretende-se saber, também, quais as etapas que serão necessárias para introduzir esta metodologia no trabalho da equipa.

1.3. Estrutura da dissertação

Na sequência do objetivo proposto, este documento está desenvolvido em duas grandes partes.

Numa primeira parte, designada por Parte A, começa-se por apresentar as motivações para o estágio e quais os objetivos que se pretendem atingir. É apresentada ainda a empresa onde foi elaborado o estágio, fazendo-se uma apresentação do grupo onde se insere, a história do fundador, bem como as principais etapas de crescimento do grupo. Seguidamente, é apresentada a evolução do grupo em Braga, bem como uma breve apresentação do seu crescimento em Portugal. Serão ainda apresentados, de forma breve, alguns indicadores do departamento de manutenção. Na sequência desta apresentação, será discutida a temática da manutenção de *software*.

No final desta parte será abordada a forma de aplicação do *Total Productive Maintenance* (TPM) na empresa. Uma vez que será abordada a interpretação que a empresa faz dos pilares originais do TPM provenientes do *Toyota Production System* (TPS), serão também explicadas as ferramentas utilizadas pela equipa de manutenção na resolução de problemas.

Na Parte B será explicado o conceito de RCM, bem como a sua evolução. De seguida será apresentada a metodologia RCM passo a passo.

É de realçar que se optou por fazer, em cada etapa, uma breve revisão bibliográfica sobre o tema e de seguida a forma como esse passo foi executado no estágio.

2. O Grupo Bosch

2.1. O Grupo Empresarial

O Grupo Bosch iniciou a sua atividade a 15 de novembro de 1886 pelas mãos do Engenheiro Robert Bosch. A empresa era designada por “Oficina para mecânica de precisão e engenharia elétrica”. Alguns anos mais tarde, em 1897, Robert Bosch e o seu sócio, o Engenheiro Arnold Zähringer desenvolveram um dos primeiros motores de arranque elétricos (Bosch 2017).

Estes produtos foram evoluindo e, em conjunto com outros que se seguiram, tornaram a Bosch numa referência no desenvolvimento e fabricação de componentes para a indústria automóvel. Um exemplo disto mesmo são as bombas de combustíveis desenvolvidas (Bosch 2017).

Com a evolução da empresa, a Bosch foi entrando em segmentos de mercado diferentes, sendo que hoje o grupo está a trabalhar em quatro grandes segmentos: Soluções de Mobilidade, Tecnologia Industrial, Bens de Consumo e Tecnologia de Energia e Edifícios. Atualmente a Bosch é umas das empresas líder no fornecimento de ferramentas de *internet of things* (IoT), bem como do *hardware* necessário. Está ainda a ser feita uma grande aposta na Indústria 4.0, cujo objetivo é a conectividade entre as próprias pessoas ou entre pessoa/máquina (Bosch 2017).

Atualmente o grupo está presente em 60 países e emprega mais de 390 000 colaboradores, sendo que cerca de 59000 são investigadores de R&D (Bosch 2017).

2.2. A Bosch Car multimédia em Portugal

A Bosch está presente em Portugal desde 1911 com a sua divisão de prestação de serviços para os automóveis. Atualmente a Bosch possui três unidades fabris resultantes da aquisição de empresas lá existentes: em Ovar, com a Bosch *Security Systems* são desenvolvidos, principalmente, sistemas de segurança, em Aveiro, com a Bosch Termotecnologia, são desenvolvidas soluções de aquecimento e em Braga desenvolvem-se soluções para multimédia automóvel.

A unidade de Braga (BrgP) pertence à divisão de *Car Multimedia*, juntamente com as fábricas da Malásia e da China. A unidade em Braga possui um centro de competências para multimédia automóvel, no qual são desenvolvidos sistemas inovadores de interface entre o condutor e o automóvel. Emprega neste momento cerca de 2500 colaboradores, sendo que ao longo dos próximos dois anos é expectável um incremento de 1000 colaboradores.

No departamento TEF8, atualmente, existem 120 colaboradores. A Figura 1 mostra a caracterização do pessoal deste departamento.

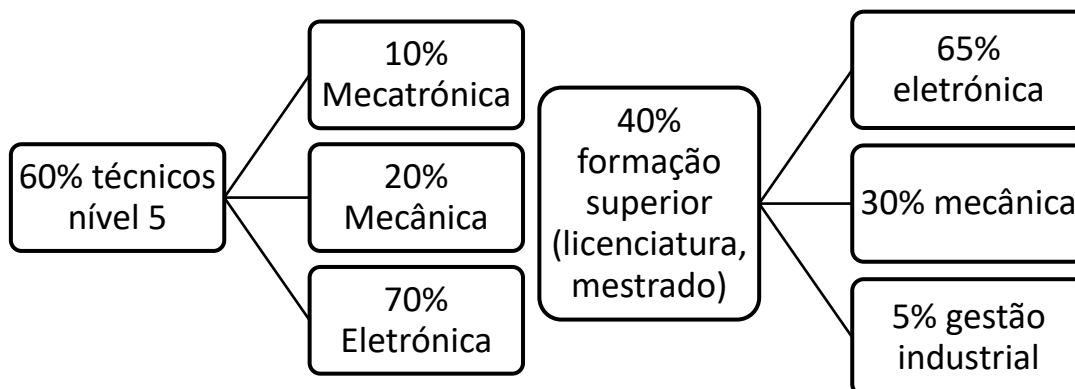


Figura 1 - Caracterização da equipa da manutenção

Segundo a Bosch (2017) a gama de produtos da divisão CM é a seguinte:

Sistemas de informação ao condutor

- Navegação
- Informação e entretenimento

Soluções de *displays*

- *Head-up displays*
- Painéis de instrumentos livremente programáveis
- *Visor® DualView*

Soluções para veículos comerciais

- Entretenimento em autocarros
- Entretenimento em camiões
- Telemática para camiões

3. Overview da Manutenção da Bosch BrgP

3.1. Descrição geral

A *performance* e a competitividade das empresas de produção dependem da sua fiabilidade, disponibilidade e produtividade (Weber and Thomas 2005). Para tal ser possível, é necessário ter um bom controlo dos processos de manutenção e dos seus resultados. A estratégia para a obtenção destes resultados passa pela definição de parâmetros robustos de controlo da manutenção (Muchiri et al. 2011)

A manutenção é vista como a combinação de todos os fatores técnicos e administrativos que são necessários para manter equipamentos, instalações e outros bens físicos de modo a permite o restauro ou manutenção do seu normal comportamento (Muchiri et al. 2011, Weber and Thomas 2005)

Os responsáveis de manutenção necessitam de saber a relação entre o processo de manutenção e os resultados, em termos de contribuição para a produção e para o desempenho de negócio (Muchiri et al. 2011)

Com a utilização dos equipamentos, estes começam a sofrer desgaste devido sobretudo à má utilização por parte dos operadores ou o uso dos mesmos fora dos limites para a qual foram dimensionados (Muchiri et al. 2011). Estas perdas têm um impacto no custo de produção, rentabilidade do negócio e na satisfação dos clientes.

A chefia de manutenção deve ter em mente o estado atual e definir qual o estado que quer atingir, de modo a ser possível definir estratégias que levem até esse objetivo (Muchiri et al. 2011)

Para Muchiri et al. (2011), os objetivos de manutenção estão relacionados com o aumento de produção através do aumento da disponibilidade, mantendo os níveis de qualidade e de segurança constantes (Muchiri et al. 2011)

Os objetivos da manutenção podem ser resumidos em cinco categorias: funcionalidade das instalações industriais através da disponibilidade, fiabilidade e qualidade de produto; segurança; garantir uma boa gestão dos recursos económicos, dos recursos de energia ou de material (Muchiri et al. 2011).

Os conceitos de manutenção são tão diversos como os seguintes (Muchiri et al. 2011):

- RCM
- TPM
- LCC (*Life cycle centered*)
- BCM (*Business centred maintenance*)

As implementações dos indicadores de manutenção são vitais para que seja possível detetarem-se desvios entre a realidade e o que era desejado. Com estes indicadores, é possível gerir a equipa de manutenção de terreno, de modo a investir mais recursos onde se irá ter mais impactos (Weber and Thomas 2005)

As dificuldades surgem quando é necessário quantificar e medir a influência e os resultados das intervenções de manutenção. Pode até surgir um contrassenso aos olhos dos gerentes de topo das empresas, uma vez que, caso a manutenção esteja a ter bons resultados para o negócio, esta deixa de ter protagonismo (De Groote 1995).

A norma europeia EN 15341:2007 organiza os indicadores em 3 tipos: ordem económica, ordem técnica e organizacional. Os primeiros referem-se a indicadores relacionados com os

custos, os segundos a questões de execução técnica e, por fim, surgem os relacionados com a equipa de trabalho.

Bons indicadores devem suportar a monitorização e o controlo da eficácia da manutenção, suportar a aprendizagem e a melhoria continua e dar suporte nas manutenções com maior impacto na produção (Weber and Thomas 2005).

Tendo em mente esta informação, estudou-se a evolução da taxa de intervenções ao longo do tempo. Como pode ver-se na Figura 2, o número de intervenções tem vindo a aumentar ao longo deste último ano. Este facto reflete o aumento do número de máquinas que se tem verificado na empresa. Isto ilustra de forma clara que a importância da manutenção, pois os picos refletem paragens na produção.

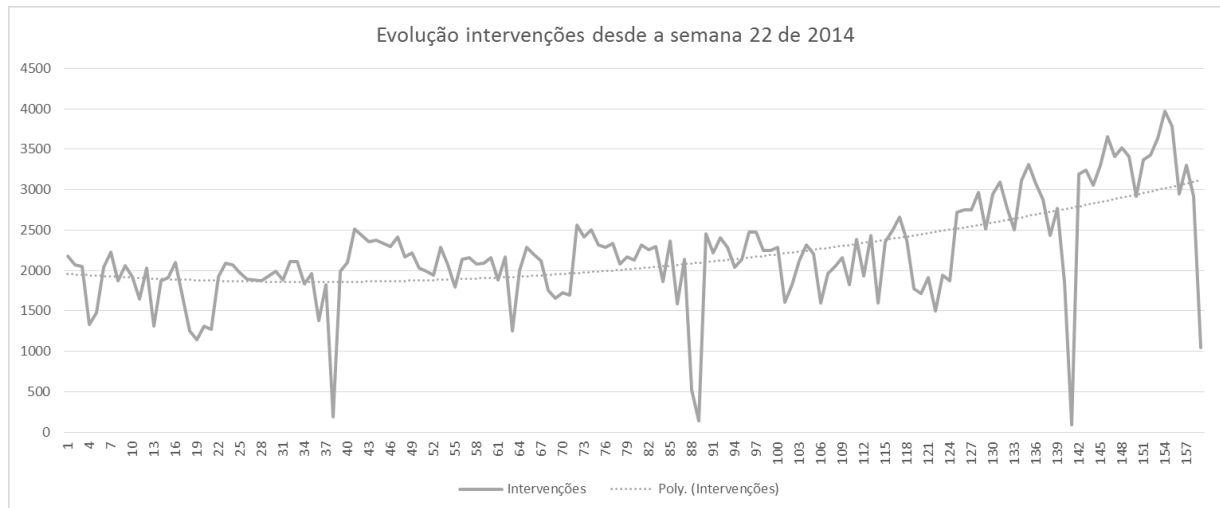


Figura 2 - Evolução do número de intervenções

Estudou-se também o *Mean Waiting Time* (MWT) e o *Mean Time to Repair* (MTTR) sendo estes definidos pelas equações (1) e (2), respetivamente.

$$MWT = \frac{\sum \text{tempo de resposta}}{n^{\circ} \text{semanas}} \quad (1)$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{duração da reparação}}{n^{\circ} \text{semanas}} \quad (2)$$

Como pode ver-se na Figura 3, o MWT e o MTTR têm vindo a aumentar à medida que o número de manutenções tem aumentado - registou-se um aumento de 50% para o MWT. Assim, para reduzir o MWT a solução pode passar por um aumento de recursos humanos, pois com mais técnicos a resposta será mais rápida. No entanto, este fator está diretamente ligado com o MTTR, uma vez que o tempo passado em outra avaria reduz o tempo disponível do técnico. Ou seja, o aumento da experiência dos técnicos reduz também o tempo de espera das avarias. Este facto demonstra a relevância da manutenção.

O MTTR registou um aumento de 40% o que permite retirar conclusões acerca do nível de formação e experiência dos técnicos, uma vez que um técnico júnior vai, naturalmente, demorar mais tempo na resolução de um problema do que um mais experiente. Paralelamente, a equipa tem apostado em técnicos com mais qualificação académica, de modo a corresponder ao aumento de complexidade dos equipamentos.

Implementação de RCM em equipamento novo

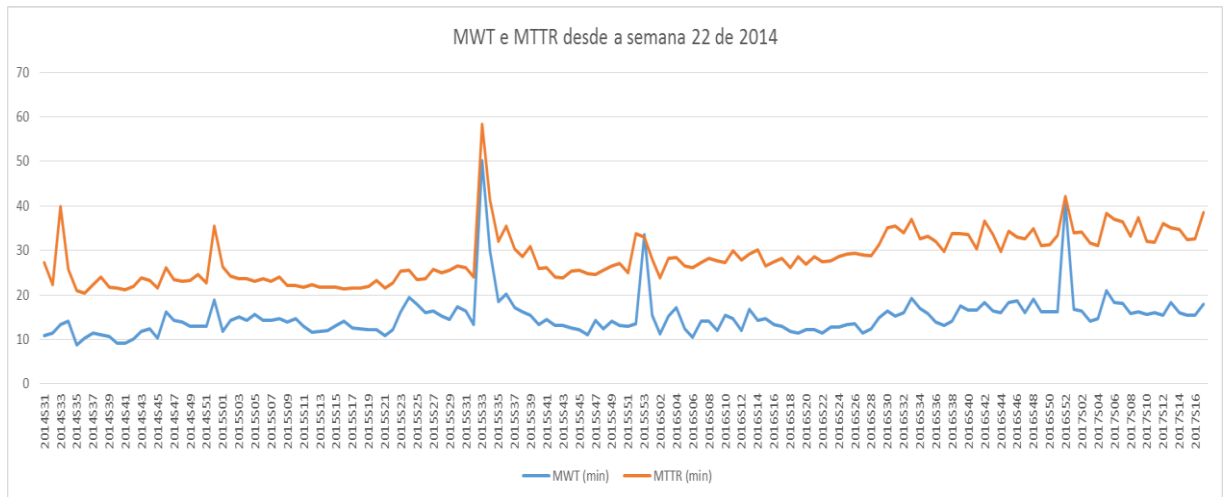


Figura 3 - Evolução dos MWT e do MTTR por semana

De seguida estudou-se o MTBF do departamento, que é definido pela equação (3):

$$MTBF = \frac{\sum \text{numero de falhas}}{\sum \text{tempo de trabalho das linhas}} \quad (3)$$

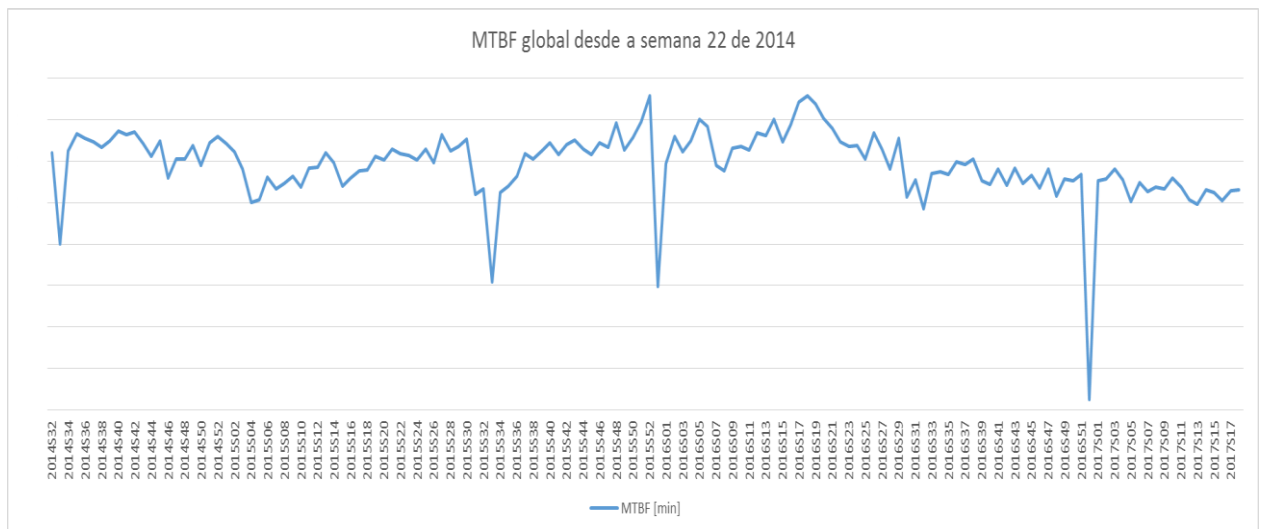


Figura 4 - Evolução do MTBF por semana

Como seria previsível, com a análise da Figura 4 constata-se uma redução de 20% no MTBF, mostrando mais uma vez que a eficiência da manutenção tem vindo a diminuir com o crescimento da fábrica.

De modo a inverter esta diminuição do MTBF, a equipa tem apostado cada vez mais na Manutenção Preventiva (PM). Na Figura 5 pode ver-se que a taxa de PM tem vindo a diminuir ao longo dos últimos anos. Isto deve-se ao enorme aumento de manutenção corretiva (CM) que tem existido na fábrica, devido ao crescente numero de equipamentos. Apesar de se ter vindo a aumentar a PM em quantidade, esta não está a ter reflexo nos objetivos da fábrica. Para o objetivo de 30% de PM se realizar (Figura 5), deve-se apostar na aplicação de RCM e na melhor otimização do planeamento. Ambos os tópicos são desenvolvidos no âmbito deste relatório.

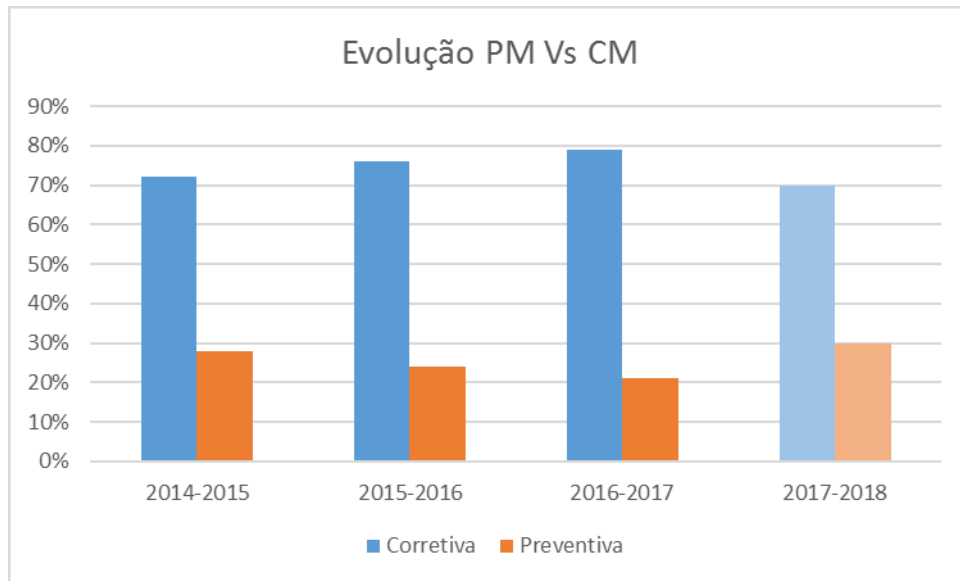


Figura 5 - Evolução da relação preventivas/ corretivas ao longo dos últimos 3 anos bem como o objetivo para 2017/2018

Como pode verificar-se através da análise das Figura 3,4,5 com o crescimento da fábrica a eficiência das manutenções tem diminuído. Com o aumento das PM tenta-se colmatar este problema, no entanto a quantidade das manutenções preventivas já está a tornar-se ingerível, o que torna a necessidade da sua otimização cada vez mais importante.

Ao mesmo tempo contata-se que o aumento de recursos humanos é inevitável. No entanto para este aumento ter realmente efeito é de extrema relevância uma gestão cuidada da sua formação de máquina e um trabalho em torno da sua motivação para evitar a sua saída devida à exigência do trabalho da manutenção.

3.2. Manutenção de *software*

Na sequência da análise feita no Capítulo 3, pode ver-se na Figura 6 que uma grande porção das manutenções corretivas feitas na fábrica é despoletada por problemas de *software*, sendo que a maioria das reparações consistem em *restarts* (27%).

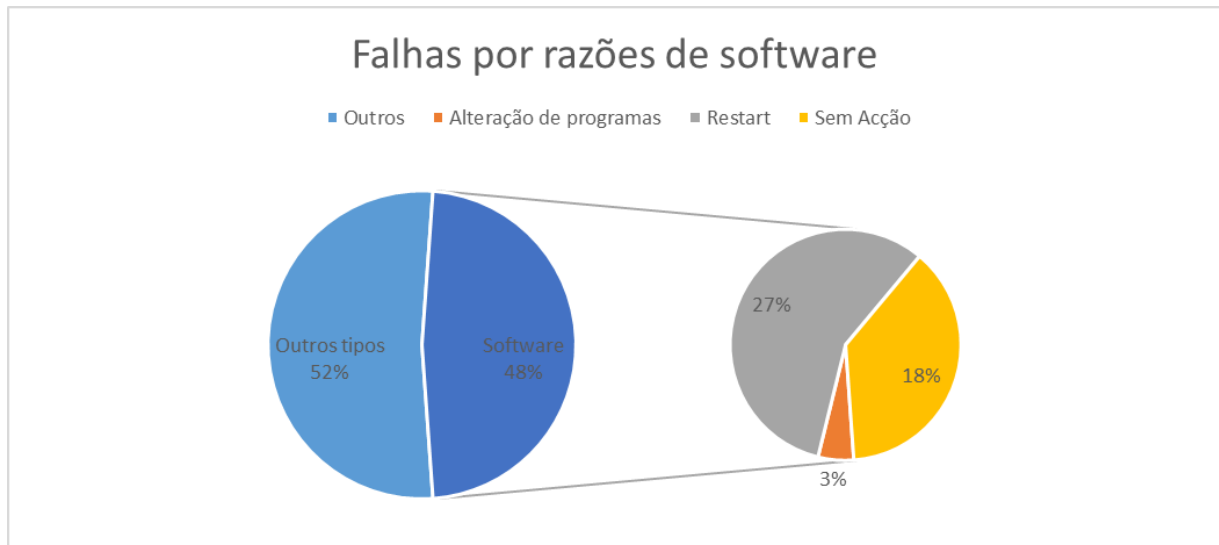


Figura 6 - Fração das manutenções causadas por motivos de *software*

Assim, verifica-se que há um grande desperdício de técnicos em ações que não resultam numa melhoria de fiabilidade no equipamento, uma vez que não se encontra a causa-raíz e o problema perpetua-se no tempo. Este facto é muito importante, uma vez que, no caso Bosch, um *software* pode ser desenvolvido ao longo de 1 ano e ser utilizado durante mais de 10 anos.

O conceito de manutenção de *software* surgiu em 1969, por Mir Lheman que no seguimento da sua investigação na área teve as suas conclusões denominadas de *Lheman Laws*. As leis desenvolvidas foram as seguintes (Lehman 1979):

1. 1974 - Continua mudança – Os sistemas têm de ser continuamente melhorados, ou serão no futuro, insatisfatórios para o utilizador uma vez que as suas necessidades vão mudando ao longo do tempo.
2. Complexidade crescente – Um *software* tem sempre tendência a aumentar a complexidade ao longo do tempo, a menos que seja feito um esforço para reduzir a sua complexidade
3. 1980 - "*Self Regulation*" - Num sistema empresarial os programas tem a distribuir-se e a ajustar-se aos produtos com uma distribuição normal.
4. 1978 - Taxa de funcionamento invariável- A taxa de eficiência do *software* num ambiente evolutivo mantem-se constante ao longo do tempo
5. 1978 - Conservação da familiaridade- À medida que um sistema evolui todos os seus responsáveis (programadores, vendedores, utilizadores) devem manter-se atualizados. Excessivo crescimento diminui a eficácia da utilização.
6. 1991 – Crescimento contínuo - O conteúdo do sistema informático deve aumentar para manter o utilizador interessando, isto tentando não aumentar de forma excessiva a complexidade
7. 1996 - Diminuição da qualidade - A qualidade do *software* tem tendência a reduzir ao longo do tempo a menos que seja feita a sua adaptação à realidade produtiva.

8. 1996 - Recolha de feedback - Um *software* de natureza empresarial tem de ser tratados tendo em conta a sua diversa complexidade que se estende a diversos níveis. A influência dos seus utilizadores bem como o seu feedback são fatores essenciais.

Segundo a norma ISO/IEC 14764:2006 existem 4 tipos de manutenções aplicáveis ao *software*
 Manutenção adaptativa: Alterações efetuadas ao programa de modo a este ficar operacional devido a alterações no ambiente em que este se encontra;

- Manutenção de melhoria: Alterações no *software* de melhoria de modo a melhorar a sua performance e manutibilidade;
- Manutenção corretiva: Alterações despoletadas por problemas decorrentes da implementação;
- Manutenção preventiva: Alterações de *software* depois da implementação de modo a detetar falhas e preveni-las antes, que estas surjam;

A Tabela 1 resume o inquérito que foi feito a todos os técnicos que produzem *software* para o departamento, com o objetivo de saber os procedimentos que são feitos aquando da produção de um *software*.

Tabela 1 - Resumo das respostas ao inquérito realizado sobre manutenção de software

Manutenção adaptativa	1. Adaptação ao tipo de SO 2. Tradução da aplicação 3. Procura junto dos utilizadores de novas funcionalidades que possam fazer a <i>app</i> atual
Manutenção de melhoria	1. Melhorias a nível de interface e UX 2. <i>Refactoring</i> de <i>queries</i> 3. Otimização das tabelas nas bases de dados anualmente 4. Documentação do código
Manutenção corretiva	1. Correção de Bugs logo após a instalação ou através do feedback dos utilizadores
Manutenção preventiva	1. Criação de ferramentas de log de eventos nas aplicações 2. Uso de testes antes de lançar a aplicação

A manutenção de *software* é sem dúvida uma área onde a Bosch pode evoluir. Tendo em conta os cinco entrevistados, pode concluir-se que a maioria está familiarizada com o termo “manutenção de *software*” no entanto não conhecia os 4 tipos de manutenções.

Assim, considerou-se este inquérito positivo, pois motivou a discussão nas equipas onde foi realizado, o que fez com que se aumentasse a sensibilidade da equipa para o tema. Este era um dos principais objetivos do inquérito. As respostas aos inquéritos encontram-se no Anexo B

4. TPM

4.1. Introdução

O TPM teve a sua génese nos anos 70, na indústria automóvel Japonesa, no seguimento da revolução iniciada pela Toyota com o TPS (Kennedy 2009). O principal objetivo do TPM é reduzir e/ou evitar a manutenção corretiva envolvendo de forma significativa os colaboradores (Nakajima 1988).

Através do TPS, a Toyota, depois dos efeitos nefastos da 2ª guerra mundial na economia nipónica e também devido à própria natureza do mercado interno, conseguiu ultrapassar a crise atuando sobretudo sobre os desperdícios que a companhia tinha. Para tal, foram desenvolvidas ferramentas como (Pinto 2009):

- **Kaizen (melhoria continua)**

Aquando da necessidade de melhorar qualquer processo, genericamente existem duas abordagens:

1. Inovação – Esta metodologia é caracterizada por introdução de melhorias com alterações significativas ao *status* atual;
2. *Kaizen* – É caracterizada pela introdução das melhorias com alterações menos significativas aos sistemas, mas com um ritmo superior ao da “inovação”.

A tabela 2 resume as diferenças/semelhanças entre os dois métodos.

Tabela 2 - Principais características dos modos de melhorias (adaptado de Pinto 2009)

	Kaizen	Inovação
<i>Efeitos</i>	A longo prazo e duráveis, mas não espetaculares	A curto prazo, mas espetaculares
1. <i>Ritmo</i>	Pequenos passos	Grandes passos
2. <i>Efeitos ao longo do tempo</i>	Contínuos e crescentes	Intermitentes e descontínuos
3. <i>Mudança</i>	Gradual e contante	Abrupta e volátil
4. <i>Implicação</i>	Todos os colaboradores	Dedicada a especialistas
5. <i>Aproximação</i>	Coletiva, esforço em grupo, aproximação sistemática	Individual, ideias personificadas e esforços individuais
6. <i>Modo</i>	Manutenção e melhoramentos	Quebra-se e reconstrói-se
7. <i>Conhecimento</i>	Conhecimento convencional e do domínio de todos	Novas invenções e novas teorias
8. <i>Exigências práticas</i>	Exige pouco investimento, mas grandes esforços de manutenção	Exige grandes investimentos, mas custos baixo de manutenção
9. <i>Critérios de avaliação</i>	Processos e esforços para melhores resultados	Resultados em termos de lucro
10. <i>Vantagens</i>	Funciona melhor numa economia de crescimento lento	Funciona melhor numa economia de crescimento rápido

- **Sistema puxado (*pull system*)**

O sistema *pull* foi criado com o objetivo de reduzir os *stocks* intermédios e finais. Consiste no planeamento de produção a partir das ordens efetivas dos clientes e menos em previsões de produção (Pinto 2009).

Uma das ferramentas mais usadas e conhecidas no sistema puxado é o uso de *kanban*. Os *kanbans* não são mais do que um meio de informação desde a ordem do cliente até ao fabrico da peça mais insignificante do produto. Estes podem ter o aspeto de um cartão físico (*kanban* clássico como pode ver-se na Figura 7) ou eletrónico.

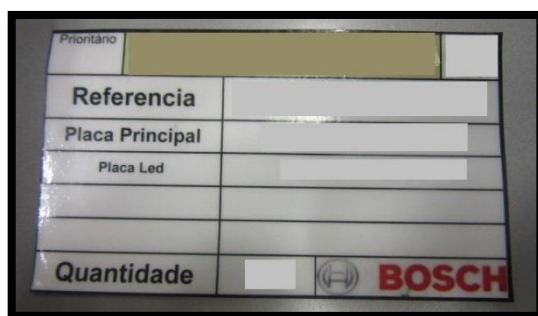


Figura 7 - Kanban de produção usado na Bosch BrgP

- **SMED**

Outra das ferramentas mais utilizadas é o *Single Minute Exchange of Die* (SMED). Esta metodologia consiste em analisar o processo de mudança de ferramenta, produção ou peças de uma máquina e determinar quais as tarefas que podem ser executadas durante o funcionamento da máquina (atividades externas) e aquelas que implicam a paragem da máquina (atividades internas) (Pinto 2009). Engloba ainda a redução de tempos e a aplicação de melhorias ao processo de mudança. Na Tabela 3 é possível visualizar um exemplo de aplicação do primeiro passo da metodologia.

Tabela 3 - Extrato de uma folha SMED (adaptado de Pinto 2009)

Folha de aplicação SMED		Tempo	Operações	
Nº	Descrição das atividades	Segundos	Internas	Externas
1	Desligar todos os circuitos da máquina	29	x	
2	Pegar e abrir caixa de ferramentas	15		x
3	Retirar mangueira de gás, água e fichas elétricas	550	x	
5	Desapertar o molde	590	x	
6	Evacuar o molde	190		x
7	Efetuar limpeza do bico de injeção	100		x
8	Mudar a ponte de 1 molde para outro	135		x
9	Aprovisionar novo molde	185		x
11	Desapertar e subir/descer ponto de fixação	55	x	
Total		1849		

- 5S

A Tabela 4 enumera os 5 princípios dos 5S desenvolvidos por Kaoru Ishikawa (Pinto 2009):

Tabela 4 - Os cinco princípios do 5S (adaptado de Pinto 2009)

Japonês	Português
<i>Seiri</i>	Separar
<i>Seiton</i>	Organizar
<i>Seiso</i>	Limpar
<i>Seiketsu</i>	Padronizar
<i>Shitsuke</i>	Disciplina

As principais vantagens da aplicação desta ferramenta são (Pinto 2009):

Ao nível do ambiente de trabalho:

- Maior limpeza nas organizações
- Melhoria na qualidade de trabalho dos operadores
- Maior garantia de segurança
- Modificação da atitude dos operadores

Ao nível da produção:

- Aumento da produtividade
- Diminuição dos problemas com qualidade
- Redução de custos
- Redução de *stocks*
- Aumento da reatividade por parte dos operadores

O TPS

O TPS tinha como pilar principal o relacionamento com os colaboradores e isto implicava (Pinto 2009):

- Trabalho de equipa na realização das tarefas
- Tomada de decisão mais descentralizada
- Hierarquias menos verticais
- Colaboração estreita entre os trabalhadores de produção e os engenheiros
- Transferência de responsabilidade da manutenção para a produção
- Interação do gabinete de departamento de projeto e as unidades produtivas.

Em adição à crescente confiança nos operadores, a Toyota estreitou a comunicação com os fornecedores externos, com o objetivo de reduzir os desperdícios no transporte e diminuir as perdas por falta de qualidade (conceitos do total quality system - TQS) (Pinto 2009). Desta forma, com a parceria estabelecida com um fornecedor externo, foi iniciado o desenvolvimento do TPM (Kennedy 2009).

Com as crescentes tentativas de implementação do TPM, ficou claro que a melhoria da manutenção era o elo que faltava para a obtenção de produtos mais estáveis e para a execução da filosofia *Just In Time* (JIT) de forma eficaz (Kennedy 2009).

4.2. Evolução do TPM

Com a transição que a Toyota efetuou na sua produção de modo a reduzir o *lead time* (tempo de entrega do produto), tornou-se obrigatório uma redução de *stocks* entre postos. Este facto fez com que a importância de um equipamento fiável se tornasse evidente, uma vez que no modelo antigo os *stocks* eram responsáveis por amortecer as perdas provocadas pela falha das máquinas (Kennedy 2009). A existência de *stocks* intermédios criava a sensação de que os postos eram independentes uns dos outros e que, por isso, para a obtenção de uma eficiência de 90% na produção, cada equipamento devia ter uma eficiência de 90% (Kennedy 2009).

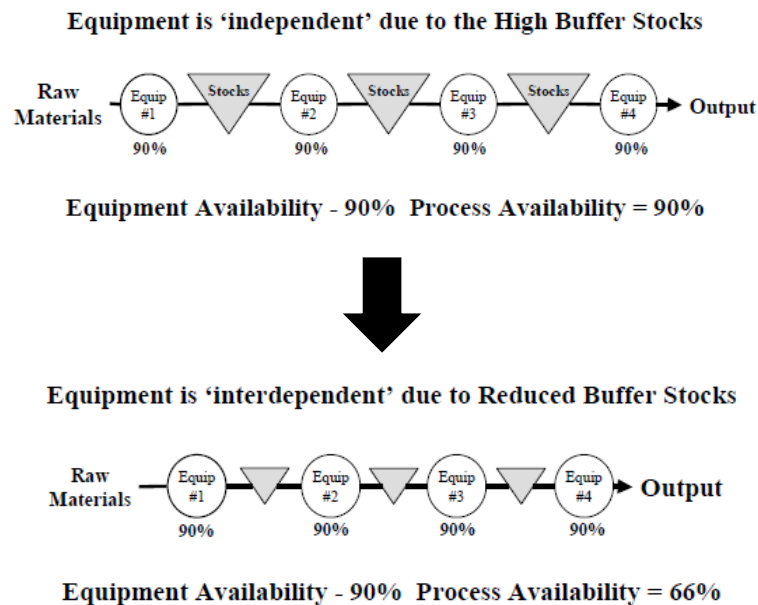


Figura 8 - Mudança de paradigma na gestão da manutenção (adaptado de Kennedy 2009)

Como pode ver-se na Figura 8, se cada equipamento, de um sistema de 4ª ordem, tiver uma fiabilidade de 90% obtém-se uma fiabilidade do sistema de $90\% \times 90\% \times 90\% \times 90\% = 60\%$. Invertendo os cálculos, constata-se que para uma eficiência de 90%, na linha, cada equipamento precisa de ter uma eficiência de 97.5% (Kennedy 2009).

Isto obrigou a uma mudança de paradigma nas empresas, pois a manutenção começou a deixar de ser vista como uma despesa e mais como um elemento essencial para a competitividade das organizações (Kennedy 2009).

4.3. TPM na Bosch

Apesar de originalmente o TPM apresentar 8 pilares (Nakajima 1988), o grupo Bosch decidiu, tendo em conta a sua realidade, estruturar a sua filosofia de manutenção em 4 pilares.

4.3.1. 1º Pilar (Eliminação dos principais problemas)

Neste pilar são tomadas ações que têm como objetivo a redução da frequência das falhas das máquinas – melhoria contínua. Sempre que há um problema numa máquina que apareceu de forma súbita, mas que se manteve de forma perene no equipamento, é aberta uma folha e resolução de problemas (FRP), a ser resolvida entre a produção e o departamento de manutenção. Ver folha FRP no anexo A.

O primeiro ponto desta folha passa pela descrição do equipamento e do local onde a máquina se encontra inserida. Depois passa-se para uma descrição do problema, sendo referida a sua localização e normalmente tem um gráfico, tabela (preenchidos pelos chefes de linha) onde se mostra de forma clara a mudança de comportamento da máquina. Ver folha FRP no Anexo A

Na segunda parte da folha são usadas 3 ferramentas distintas no auxílio da resolução do problema. Começa-se por um diagrama de *Ishikawa*, semelhante ao da Figura 9.

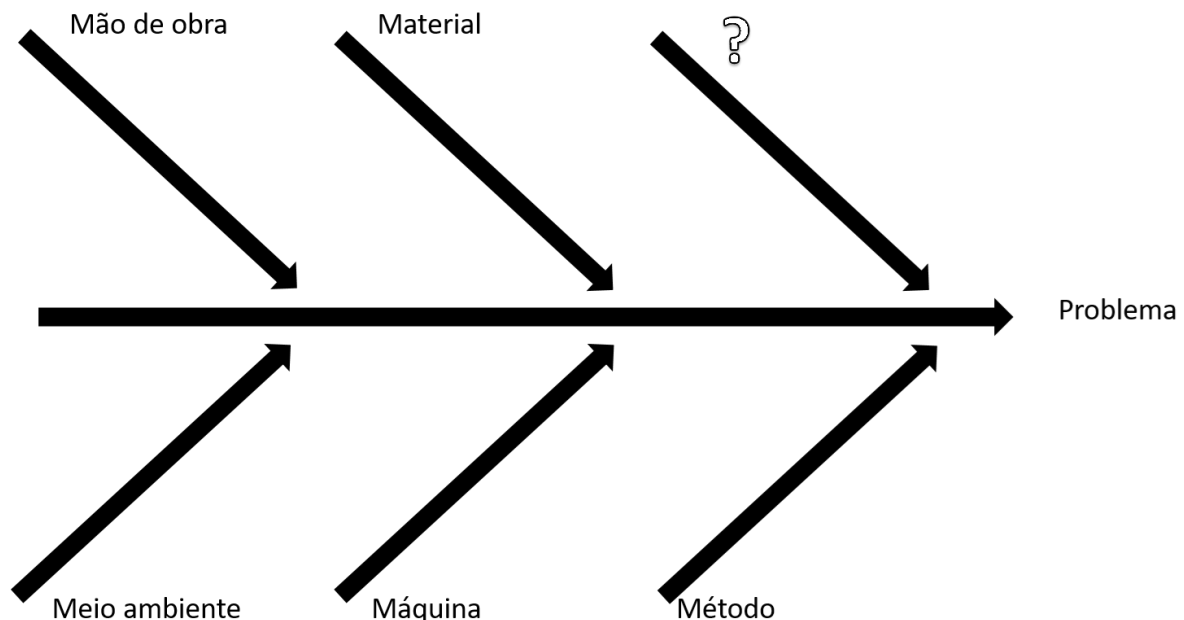


Figura 9 - Diagrama de Ishikawa usado nas FRPs

No diagrama da Figura 9 são utilizados os 5Ms (Mão de obra, Meio ambiente, Material e Método, Máquina) para identificar a fonte do problema. Existe ainda a possibilidade de adicionar novas categorias na causa dos problemas, como por exemplo *Software*.

Uma vez localizada a fonte do problema, é usada a ferramenta *5Whys* para a determinação da causa-raiz do problema. Esta ferramenta consiste em o analista questionar no máximo 5 vezes o porquê do problema. Exemplo: Uma máquina está com ruído, porquê? Porque o rolamento está a falhar, porquê? Porque o rolamento está danificado, porquê? Porque não tem lubrificante, porquê? Porque existe uma fuga no cárter do óleo. Ver folha FRP no Anexo A

Uma vez detetada a causa-raiz são desenhadas as ações para resolver o problema e implementar em outros equipamentos que possam estar sujeitos à mesma debilidade. Para o planeamento das ações de melhoria é usado o ciclo PDCA, que consiste numa *framework* semelhante à que da Figura 10.

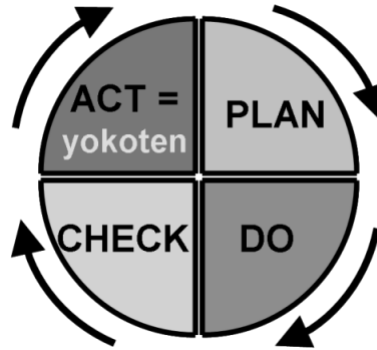


Figura 10 - Ciclo PDCA

Na fase de *Plan* (P- Planeamento) é definido o método de resolução do problema, bem como todas as subtarefas que são necessárias. Na fase do *Do* (D- Fazer) é executado todo o planeamento. Na fase seguinte (*Check*) é feito o acompanhamento dos efeitos da atividade no comportamento da máquina, ou na produção. Por fim, caso se verifique que a intervenção teve bons resultados, procede-se à disseminação da intervenção (*Yokoten*) em todos os equipamentos admissíveis na fábrica.

4.3.2. 2ºPilar (manutenção autónoma)

Aqui enquadram-se as manutenções realizadas pelos operadores. Estas caracterizam-se por serem de execução rápida e de reduzida complexidade. Estão incluídas operações como lubrificações simples ou limpezas do posto de trabalho. Este pilar caracteriza-se pelo envolvimento dos colaboradores na identificação e resolução dos problemas.

4.3.3. 3ºPilar (Manutenção preventiva)

Neste pilar enquadram-se todas as atividades que se destinam a prevenir ou reduzir as falhas nos equipamentos. São exemplo as manutenções por ronda, as manutenções sistemáticas. São ainda tomadas medidas preventivas relativas a perigos ambientais decorrentes da atividade do equipamento, a questões de segurança para os operadores e/ou técnicos de manutenção.

4.3.4. 4ºPilar (Gestão de novos equipamentos)

Este pilar tem vindo a ganhar relevância dentro da empresa, sendo que se está a fazer um esforço para a melhoria das *checklists* de aprovação dos equipamentos, bem como análises de manutibilidade, listas de spare parts.

Do ponto de vista da Bosch (e da maior parte das empresas), o objetivo é aumentar o OEE do equipamento. O *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) resulta da combinação de três métricas diferentes do equipamento sendo elas a disponibilidade, a velocidade e a qualidade (Kennedy 2009).

Na realidade, este indicador mede as diversas perdas que estão presentes no funcionamento do equipamento. Estas podem assim ser esquematizadas como na figura 11.

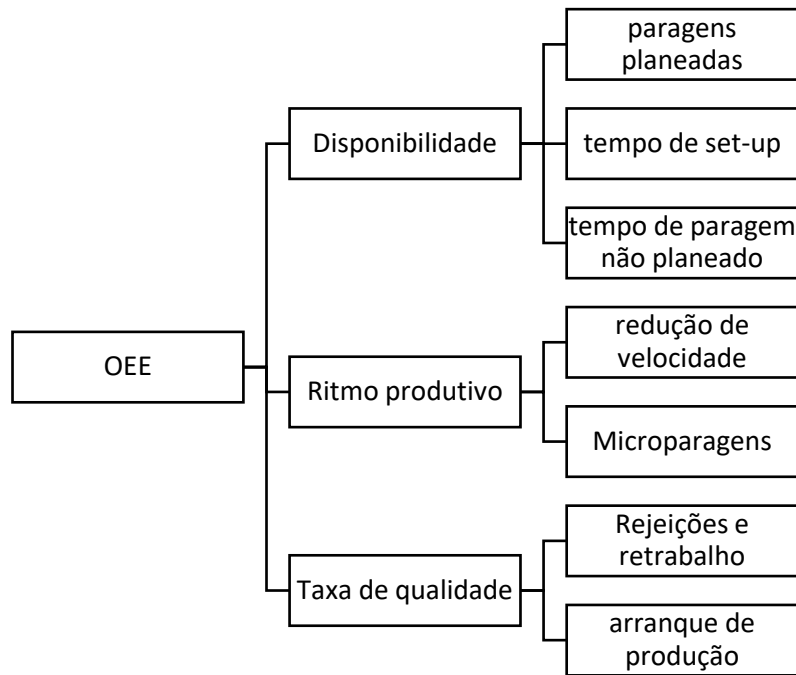


Figura 11 - Tipo de perdas avaliadas pelo OEE (adaptado de Pinto 2009)

Kennedy refere que, aquando da medição deste indicador nas suas companhias, obtêm-se resultados na ordem dos 50%-75% (resultados para produções em contínuo), no entanto as melhores práticas internacionais referem valores na ordem dos 85% (Vorne 2016).

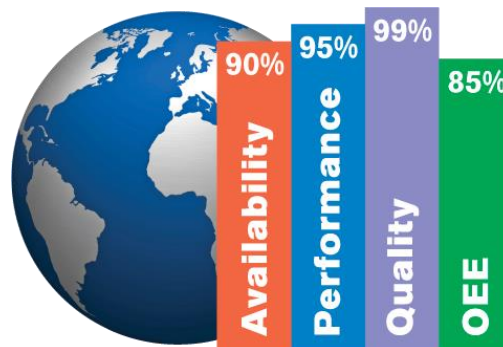


Figura 12 - Padrão internacional para o OEE e para as suas parcelas (adaptado de Vorne 2016)

Assim, verifica-se a oportunidade de, em grande parte das organizações, poder aumentar a produção em 30% (Kennedy 2009).

No caso Bosch Braga, o cálculo do OEE não é feito em tempo, é antes feito em perdas, e não para cada equipamento, mas para cada linha de produção. É assim porque na realidade de empresa é muito difícil medir os tempos exigidos, sendo ainda mais difícil fazê-lo para cada máquina. Assim, a fórmula usada é semelhante à equação (4) (Carvalho 2016):

$$OEE = PD * PV * PQ \quad (4)$$

Sendo:

PD = perdas de disponibilidade

PV = perdas de velocidade

PQ = perdas de qualidade

As perdas por diminuição da disponibilidade são calculadas segundo a Equação 5:

$$PD = \frac{Pa}{Q_p} \quad (5)$$

Sendo:

- Pa = Perdas de produção por avaria
- Q_p = Quantidade planeada de produção

As perdas por diminuição da velocidade de produção são calculadas conforme a Equação 6:

$$PV = \frac{Pv}{Q_p} \quad (6)$$

Sendo:

- Pv = Perdas totais – Perdas disponibilidade - Perdas qualidade
- Q_p = Quantidade planeada de produção

As perdas por diminuição da qualidade são calculadas conforme a Equação 7:

$$PQ = \frac{Q_{pb}}{Q_p} \quad (7)$$

Sendo:

- Q_{pb} = Quantidade de produtos sem defeitos
- Q_p = Quantidade total de produtos produzidos

Na Bosch Braga, os fatores do OEE rondam os valores apresentados na Tabela 5, culminando num OEE de cerca de 86.4%.

Tabela 5 - OEE na fábrica

Fator	%
<i>Disponibilidade</i>	91%
<i>Qualidade</i>	99%
<i>Velocidade</i>	96%
<i>OEE</i>	86.4%

Como pode analisar-se na Tabela 5, o OEE na Bosch ronda os 86%, no entanto existem evidências de que este valor não reflete a realidade da fábrica. Existem problemas de acuidade nos fatores de disponibilidade e de velocidade, sendo este último o mais crítico. Os problemas prendem-se sobretudo com a dificuldade na obtenção dos dados. Os problemas no cálculo da disponibilidade prendem-se com incoerências na contagem das perdas resultantes da avaria, pois estas são estimadas pelo chefe de linha, estando sempre sujeitas a algum tipo de análise mais subjetiva. A proposta para resolver este problema passaria pela automatização deste cálculo com base na produção teórica da linha. O cálculo das perdas de velocidade é influenciado, de igual forma, pela subjetividade dos chefes de linha, pois são eles que indicam a quantidade de perdas que se deveram a reduções de velocidade.

5. Diferença entre teoria e prática

5.1. Introdução

Malik referiu que “A manutenção é, muito provavelmente, a área profissional onde existe o maior distanciamento entre os teóricos de manutenção e os seus executantes” (Malik in Rausand 1998).

No centro do “conflito” estão muitas vezes os modelos de otimização de manutenções, que são desenvolvidos por engenheiros de fiabilidade, por estatísticos ou por investigadores de investigação operacional. Estes constroem modelos de compreensão e aplicação muito difícil para a realidade da manutenção em muitas organizações (Rausand 1998).

O RCM tem vindo a ser considerado uma ponte entre as duas realidades. Uma vez que através dos grupos de trabalho consegue-se o conhecimento estatístico teórico necessário, que por vezes já existe dentro da própria empresa, com a equipa que lida diariamente com a manutenção mais prática (Rausand 1998).

O RCM apresenta-se também como uma excelente ferramenta para a sensibilização dos técnicos de manutenção da importância dos cálculos necessários para a determinação do tempo das manutenções preventivas (Rausand 1998).

5.2. Dificuldades na aplicação da teoria da manutenção

A necessidade de manutenção tem normalmente dois *triggers*: a necessidade de aumentar a fiabilidade do equipamento e/ou a necessidade de cumprir normas.

Estas últimas são imposições legais, tais como o decreto-lei 50/2005, que visam a segurança dos colaboradores (Gomes et al. 2013).

No que respeita ao aumento da fiabilidade, o método clássico tende a usar dados fornecidos pelos fornecedores das máquinas, por normas internas da empresa ou, em menor escala, através de modelos de fiabilidade (Rausand 1998).

Os dados dos fornecedores devem ser cuidadosamente analisados tendo em conta a realidade operacional, uma vez que estes dados são obtidos em condições que não correspondem à realidade em que o equipamento está a ser usado, o que pode levar a desvios nos períodos de manutenção recomendados (Rausand 1998). Muitas vezes nas empresas existe a dúvida de que o período dado pelo fornecedor da máquina foi calculado com o objetivo de aumentar a venda dos consumíveis e não com o objetivo de aumentar a fiabilidade da máquina (Dekker 1996, Rausand 1998).

Além dos problemas de entendimento dos modelos de fiabilidade, estes, a maioria das vezes, falham porque a empresa não possui, ou possui de forma diferente ou inconsistente, os dados que são necessários para alimentar o sistema. A obtenção destes dados implica muitas vezes plataformas informáticas, ou mesmo a sua reestruturação, o que representa um elevado custo para a companhia. Estas mudanças, para muitas empresas, não são exequíveis (Dekker 1996).

Parte B

1. RCM, o que é?

De forma simplificada, o RCM é uma metodologia de desenvolvimento e/ou uma política de manutenção preventiva (Kennedy 2009 e, Rausand 1998). Toda a metodologia tem como base as funções principais do equipamento (Smith and Hinchcliffe 2004a). É assumido, ao mesmo tempo, que é impossível melhorar a fiabilidade intrínseca do sistema, isto é, a manutenção apenas consegue, na melhor das situações manter a fiabilidade inicial, sendo que qualquer melhoria apenas pode ser feita através de alterações de *design* (Rausand 1998). O objetivo principal do RCM é reduzir os custos globais de manutenção.

O método foi desenvolvido nos anos 50, pela indústria da aviação dos Estados Unidos, na sequência de diversos estudos de fiabilidade efetuados aos aviões. Um dos primeiros trabalhos de relevo nesta área foi publicado em 1960 pela *Federal Aviation Administration* (FAA) na sequência de estudos feitos nos aviões com o objetivo de combater o aumento dos custos, a fraca disponibilidade e os receios acerca da tradicional manutenção preventiva sistemática (Kennedy 2009).

Estes estudos concluíram que uma grande percentagem das falhas não era evitada pela execução das manutenções preventivas, independentemente da frequência com que eram executadas.

A evolução do conceito de RCM pode ser vista na Figura 13.

The Development of Reliability Centred Maintenance

1950s	Traditional maintenance approaches were found to be inadequate for post war “modern” aircraft
1960s	FAA / Airline industry reliability program FAA / Manufacturers Maintenance Steering Group (MSG)
1970s	MSG 1 applied to Boeing 747 MSG 2 applied to DC -10, L -1011
1980s	RCM coined by United Airlines (original Decision Diagram published) MSG 3 developed and applied to B -757, B - 767 (RCM 1: Revised Decision Diagram)
1990s	RCM applied in the nuclear industry RCM being applied in a variety of industries (RCM 11: Environment added to Decision Diagram)

Figura 13 - Descrição da evolução dos estudos sobre RCM na indústria aeronáutica Americana acerca de RCM (adaptado de Kennedy 2009)

É importante referir que o RCM surgiu para desenvolver todas as estratégias de manutenção bem como toda a estrutura logística necessária à sua implementação em função do estudo realizado pelo *Maintenance Study Group* (MSG).

Adicionalmente, concluíram que a manutenção preventiva sistemática apenas trazia benefícios quando existe um modo de falha predominante (Kennedy 2009).

Uma das mais conhecidas representações gráficas na manutenção é a conhecida “curva da banheira”. Este gráfico mostra, de forma simples, a evolução das falhas de um equipamento ao longo do tempo. Como se pode ver na Figura 14, esta sofreu imensas alterações no aspeto ao longo do tempo, à medida que foram sendo feitos mais estudos sobre fiabilidade (Kennedy 2009).

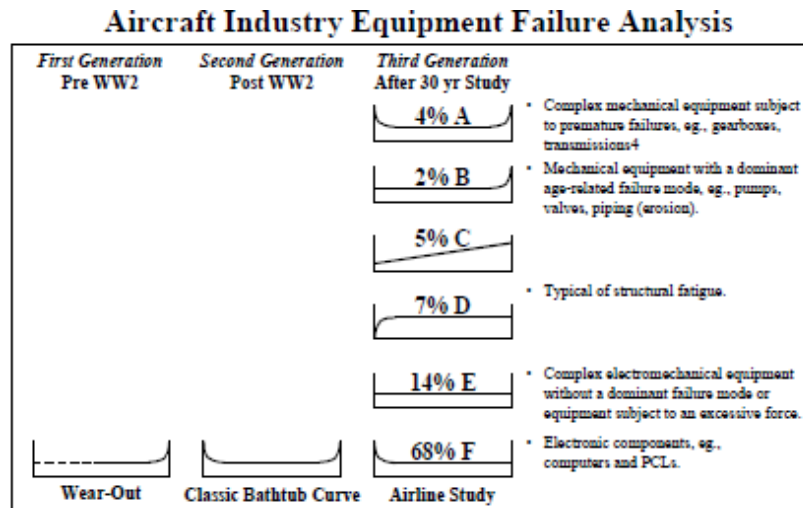


Figura 14 - Evolução da "curva da banheira ao longo do tempo (adaptado de Kennedy, 2009)

A manutenção preventiva sistemática funciona bastante bem caso o equipamento em análise apresente uma curva com uma forma semelhante ao formato clássico. Um equipamento com esta curva caracteriza-se por no início do seu funcionamento normal apresentar uma taxa de falhas com tendência decrescente até estabilizar num valor nominal. O fim de vida destes equipamentos caracteriza-se por um aumento gradual da taxa de falhas (Moubray 1997, Smith and Hinchcliffe 2004a)

Como pode verificar-se na Figura 14 devido à grande complexidade e variedade de equipamentos que as plantas industriais possuem, apenas 4% possuem o comportamento clássico, o que demonstra, mais uma vez, que a manutenção preventiva sistemática não é solução definitiva (Kennedy 2009).

Este facto é muito importante, visto que a manutenção preventiva, mesmo bem executada, pode levar a um aumento do número de falhas, como pode ver-se na Figura 15.

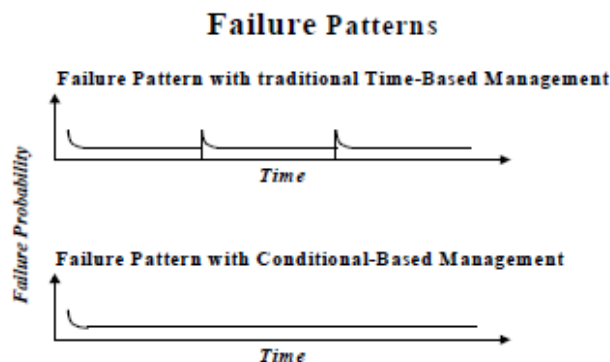


Figura 15 - Consequência da execução da manutenção preventiva sistemática de forma desajustada (adaptado de Kennedy, 2009)

Assim, a manutenção tem vindo a enfrentar diversos desafios tais como (Kennedy 2009):

- Tentar tomar as decisões mais acertadas no que toca às políticas de manutenção;
- Aumentar a eficiência da manutenção;
- Alargar o tempo entre manutenções;
- Garantir a cooperação entre os técnicos de manutenção, os técnicos de produção, logística,

O RCM tenta cumprir os objetivos acima descritos fazendo uma gestão equilibrada dos recursos disponíveis e tentando evitar ao máximo a ocorrência das avarias. Analisa o tipo de opção de manutenção tendo em conta o efeito das falhas e não a sua ocorrência. A manutenção baseada na fiabilidade defende a eliminação da redundância dos equipamentos, sempre que possível, no entanto privilegia a manutenção condicionada e a manutenção preventiva (Kennedy 2009, Smith and Hinchcliffe 2004a).

A metodologia tem como objetivo responder às seguintes questões (Rausand 1998):

1. Quais são as funções e os respetivos *standards* de funcionamento do equipamento para o contexto de funcionamento?
2. De que forma a máquina pode falhar a cumprir as suas funções?
3. O que causa cada uma dessas falhas, designadas por falhas funcionais?
4. O que acontece caso essas falhas ocorram?
5. Qual a importância de cada falha?
6. O que pode ser feito para prevenir cada falha?
7. O que pode ser feito caso não sejam encontradas manutenções preventivas adequadas?

Para responder a estas perguntas de forma eficiente é preciso realizar algumas etapas preparatórias para a implementação do modelo.

2. Preparação do estudo

Antes de iniciar a execução do projeto deve ser criado um grupo de trabalho. Este grupo tem a obrigação de, antes de começar a discussão, definir e clarificar os objetivos para análise. Devem ser apresentados os requisitos, políticas ou critérios aceitáveis para questões como a proteção ambiental e pessoal (Rausand 1998).

Deve, ao mesmo tempo, ser recolhida informação técnica do equipamento e do processo tais como: desenhos 2D, desenhos 3D e esquemas elétricos. Caso sejam detetadas discrepâncias entre esses dados e a realidade, estas devem ser claramente isoladas (Siddiqui 2009).

Estes grupos devem ser heterogêneos, de modo a possuir diferentes conhecimentos tendo em conta a realidade da máquina. Rausand (1998) recomenda 6 elementos, sendo que um deles tem a função de moderador RCM.

2.1. Realidade encontrada

Tendo em conta a realidade Bosch os grupos foram constituídos de forma ligeiramente diferente. À data deste documento, já é usual fazer-se FMECA aplicada ao processo produtivo, na qual já participam técnicos da manutenção. Nesta metodologia os parâmetros para o processo são estudados de modo a detetar as suas falhas e a estudar as implicações que estão poderão ter para o produto.

Tendo em conta esta informação, na equipa RCM, os elementos responsáveis pelo processo apenas foram convocados para as primeiras reuniões, a de definição do objetivo e a de definição das funções principais do equipamento e os respetivos *standards*.

Assim, a equipa RCM foi constituído por 5 elementos:

- Moderador RCM
- 1 Responsável de manutenção preventiva
- 2 Técnicos de manutenção preventiva
- O especialista de máquina

Ao longo da evolução do processo, foram trazidos para a discussão outros departamentos, mas por razões de otimização de tempo estes não foram convidados para o grupo base.

3. Seleção do equipamento e sua caracterização

3.1. Introdução

Antes de se tomar qualquer decisão acerca de qual o mecanismo a estudar, devem ser avaliados dois pontos (Rausand 1998):

1. Quais são os equipamentos na fábrica que irão beneficiar de forma mais clara da aplicação do RCM quando comparando com a manutenção preventiva sistemática?
2. Qual o nível do sistema a estudar?

O RCM pode ser aplicado, por princípio, tanto à fábrica como um todo, como ao componente elétrico mais pequeno numa máquina. Contudo devem ser tomados em consideração os recursos económicos disponíveis para a análise (Rausand 1998).

Um sistema é um conjunto de subsistemas que desempenha uma função principal dentro de uma fábrica. Um exemplo disto são os equipamentos de geração de energia elétrica da fábrica. Como é óbvio, estes sistemas são muitas vezes redundantes pelo que devem todos ser considerados para o sistema em estudo (Smith and Hinchcliffe 2004b).

Geralmente, a metodologia RCM é aplicada ao nível da máquina. Para a análise desse nível, é necessário decompor o mesmo nos seus componentes mais simples, pelo que o nível mais baixo na hierarquia do RCM é designado por elemento de análise (Moubray 1997).

A definição de elemento de análise implica que este seja capaz de realizar uma função sozinha, i.e., um motor elétrico funciona sozinho, no entanto uma válvula de emergência não tem sentido retirada do contexto de um equipamento. Este tipo de equipamentos são designados por equipamentos de suporte (Rausand 1998).

Esta separação é importante porque apenas no caso de o elemento de análise ter modos de falhas claros e relevantes é que se faz a análise dos elementos de suporte desse equipamento (Rausand 1998).

O resultado do RCM é um manual de planos de manutenção preventiva para todos os elementos de análise. No entanto é importante ter em consideração que o nível de detalhe utilizado deve ser regrado, uma vez que quanto mais baixo o nível de detalhe, mais difícil se torna a análise (Siddiqui 2009).

Por fim, o nível de detalhe deve ser igual ao tipo de manutenções que são realizadas na fábrica. Isto é, caso não se faça reparações em motores elétricos na fábrica, não compensa saber as causas dos modos de falha desse motor (Moubray 1997).

3.2. O caso em estudo

Depois de uma análise geral à fábrica, e tendo em conta o crescimento da empresa, optou-se por explorar a metodologia RCM num equipamento novo na fábrica, embora já exista um processo semelhante em outras máquinas, mas com tecnologias diferentes. Na Figura 16, pode ver-se a divisão da máquina nos seus sub-módulos.

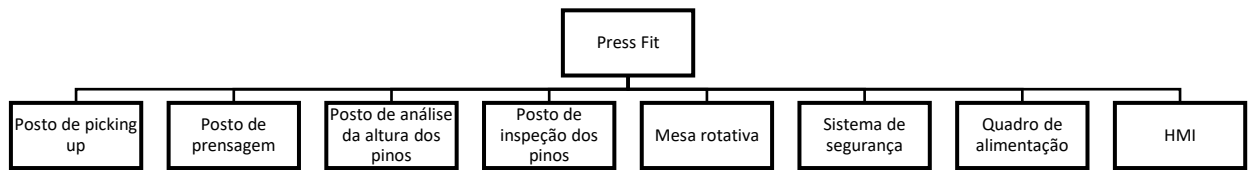


Figura 16 - Divisão da máquina em Módulos

A Figura 17 apresenta os principais módulos da máquina Press Fit. Dos 8 módulos apresentados apenas 4 deles têm funções ligadas diretamente ao produto sendo eles:



Figura 17A - Principais postos da máquina

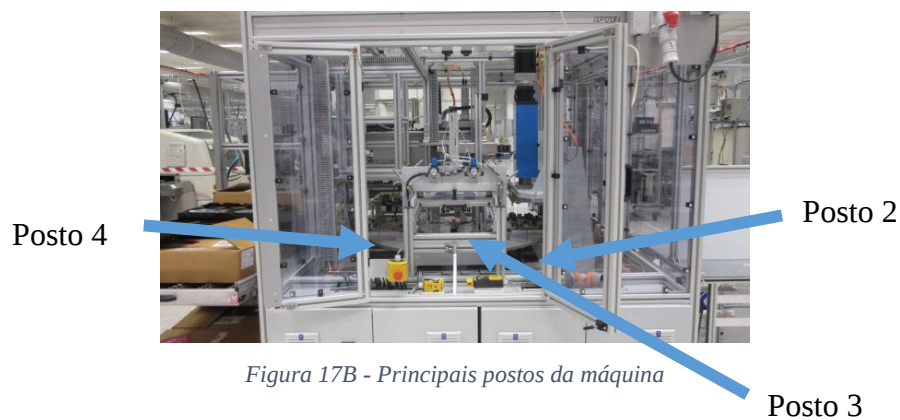


Figura 17B - Principais postos da máquina

1ºMódulo (Posto 1)

Este módulo é constituído por dois eixos lineares que são responsáveis por efetuar a colocação da *Printed Circuit Board* (PCB) no *housing* respetivo. Neste posto, a precisão dos eixos, e das próprias ferramentas de suportes do *housing* e da PCB é de importância crítica uma vez que a tolerância entre cada furo e pino é 0.3mm. As tolerâncias dos materiais irá ser importante também, tal como acontece no processo de inserção de pinos existente na fábrica. Com esta tecnologia de inserção de 40 pinos de uma só vez este problema ainda mais ampliado quando comparado com a inserção individual de pinos (tecnologia existente). O módulo é principalmente constituídos por alumínio e aços tratados. Sendo o ambiente da fábrica controlado não se preveem problemas de corrosão.

Na análise deste módulo efetuou-se a decomposição do mesmo em mais 4 sub módulos com os respetivos componentes. A Figura 18 ilustra esta divisão.

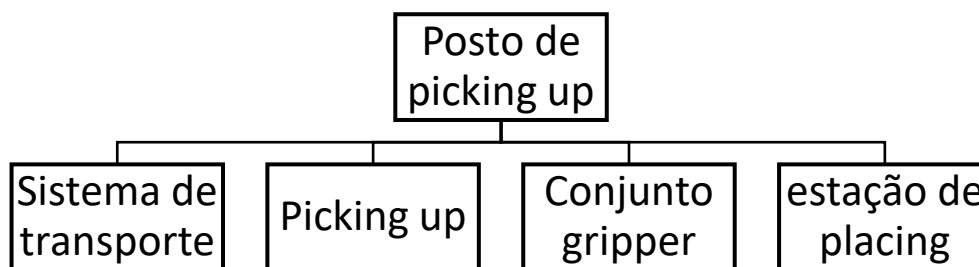


Figura 18 – Sub-módulos do posto de picking up

2ºMódulo

Este módulo representado na Figura 19 é responsável por fazer o encravamento definitivo da PCB nos pinos através de uma prensa eletromecânica. Aqui, a força de prensagem e a espessura do PCB são críticas. Tal como no 1º módulo, não se prevêem problemas de corrosão. No entanto é preciso ter-se em atenção ao fuso da prensa uma vez que este com o desgaste ou falta de lubrificação, pode começar a ter uma taxa de deteriorização superior à expectável.

Posto de prensagem	Prensa
	Motor Elétrico
	Controlador
	Ferramenta
	Sistema de elevação do ninho do housing
	Sensor deteção cabeça da prensa
	Sensor ID ferramenta
	Sensor housing OK
	Sensor housing NOK
	Sensor lock Pin

Figura 19 - Componentes presentes no módulo de prensagem

3ºMódulo

Neste posto (Figura 20) é feita a inspeção da altura de inserção da PCB através do tratamento de imagem, recolhido por uma câmara digital com uma tolerância de 0.2mm. Tal como nos postos anteriores não existe corrosão. No entanto, devido à natureza do posto, é preciso ter-se o cuidado de acompanhar o estado dos pinos de medição, uma vez que, estando eles em contacto direto com os pinos, vai existir desgaste, que pode levar a problemas na medição.

Posto medição altura pinos	Sistema Visão
	Sistema reset altura
	Sensor wb625
	Base dos pinos
	Sistema de eixo
	Reguladores de pressão
	Sensores ID ferramenta
	Ferramenta
	Sensor B626
	Sistema de elevação do ninho do housing

Figura 20 - Componentes presentes no posto de medição da altura dos pinos

4ºMódulo

No 4º módulo (Figura 21) é inspecionada a concentricidade dos pinos, através de uma câmara digital. À semelhança dos postos anteriores não existe um elevado risco de corrosão. Contudo deve ter-se em atenção ao estado de limpeza e conservação dos eixos por correia de atuação elétrica, pois qualquer folga vai impossibilitar a correta medição da concentricidade dos pinos pois esta apresenta uma tolerância de 0.3mm.

Posto inspeção concetricidade dos pinos	Câmaras digitais
	Sistemas de Eixos
	Sensor B631

Figura 21 - Componentes presentes no posto de inspeção da concentricidade dos pinos

Em todos os módulos são usados *Radio Frequency Identification* (RFIDs) para garantir a utilização da ferramenta correta para o *housing* e PCB respetiva. São usados também *scanners* para fazer o *status tracking* dos produtos, isto é, verificar que o produto passou todas as etapas predefinidas para o seu fabrico.

Relativamente aos elementos de análise seguiu-se a filosofia do elemento de manutenção.

Na Figura 22, segue um diagrama do funcionamento da Máquina.

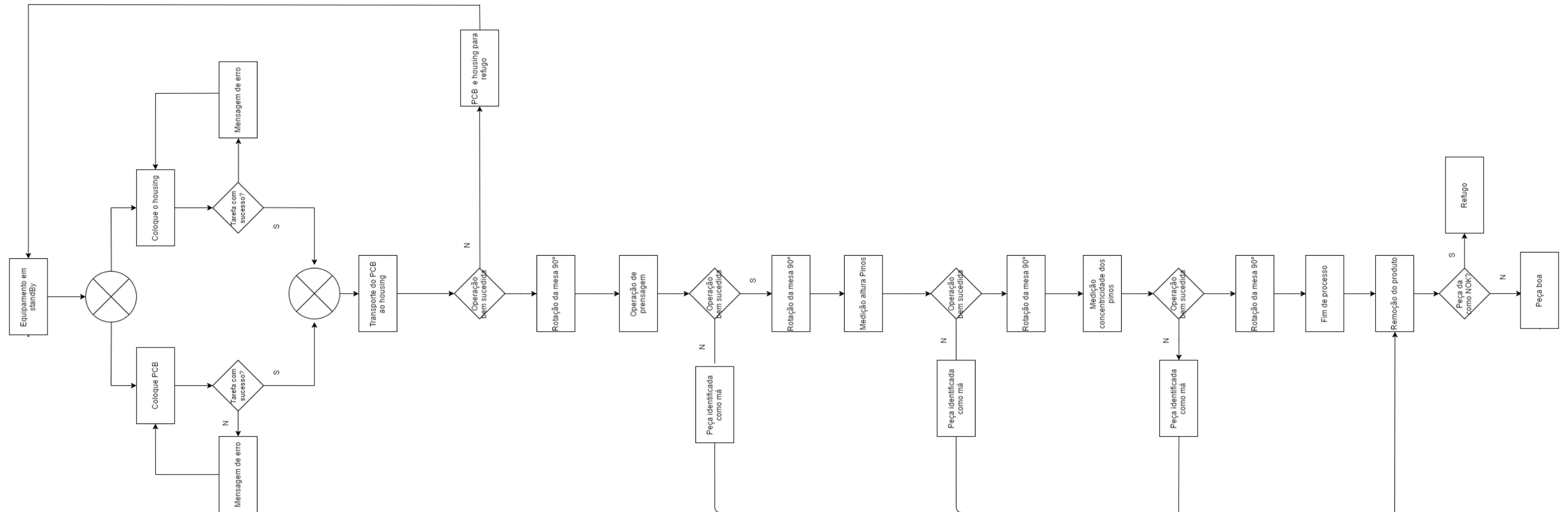


Figura 22 - Digrama funcional do equipamento

4. Análise das Falhas Funcionais (FFA)

4.1. Introdução

O objetivo do *Function Failure Analysis* (FFA) é: “Identificar e descrever as principais funções do nosso sistema e quantificar os parâmetros de funcionamento do mecanismo” (Rausand 1998).

Geralmente, qualquer mecanismo industrial possui diversas funções pelo que é importante distinguir as essenciais das acessórias (Rausand 1998). Assim, ao serem definidas as principais funções do equipamento estão-se a definir os principais objetivos da manutenção (Moubray 1997).

Rausand (1998) classificou as funções de um equipamento nos seguintes grupos:

Funções essenciais: são aquelas que fizeram a empresa adquirir o equipamento. Ou seja, a função de uma bomba de água é bombear água.

Funções auxiliares: Estas garantem o correto funcionamento das funções principais. Em muitas situações, uma falha destes equipamentos pode ser mais crítica que uma principal. Ex. Uma função auxiliar das bombas é o seu reservatório que tem como função conter fluido (Rausand 1998).

Funções de segurança: Estas funções têm como objetivo a proteção dos operadores, do próprio equipamento e do ambiente (Rausand 1998). Uma barreira luminosa é um exemplo de um equipamento com funções de segurança.

Funções de informação: Itens com este objetivo são por exemplo monitores, teclados, ratos.

Funções de interface: Estas são geralmente desempenhadas por equipamentos que conectam dois itens de análise, isto é, o suporte de um sensor luminoso funciona como interface entre o sensor e a máquina. Neste caso específico é uma função passiva, no entanto podem ser ativas caso interfiram diretamente com a função do item (Rausand 1998).

Funções desnecessárias: São aquelas que não desempenham qualquer função que interfiram na realização do desempenho da máquina. Normalmente existem quando a máquina foi demasiado sobredimensionada, ou está a ser utilizada para uma função para a qual não foi idealizada e projetada originalmente. Apesar de estas funções não influenciarem a função principal do equipamento a sua falha pode ser grave. Assim nestas situações recomenda-se a remoção desse equipamento (Rausand 1998).

Todas as funções apresentadas acima podem ser divididas em dois grandes grupos: Funções *online* e funções *offline*.

As funções *online* são aquelas que podem ser acompanhadas continuamente ou com grande frequência permitindo assim a constante monitorização do seu estado. Quando falham são designadas por falhas evidentes.

As funções *offline* caracterizam-se por possuírem uma detetabilidade difícil devido a serem utilizadas de forma intermitente ou raramente. Assim sem a realização de uma inspeção dedicada não é possível saber o estado da mesma. Um exemplo claro disto são as funções desempenhadas pelo dispositivo de segurança, uma vez que só sabemos a sua condição quando são atuados. Quando uma função destas entra em falha é designada por falha oculta. Normalmente, estas falhas tendem a ser particularmente evitadas (Rausand 1998).

As funções de um equipamento variam conforme o seu estado operacional pelo que estes podem ser:

1. Em funcionamento
2. Em standby

Identificação das interfaces

Depois de ter sido feita a clarificação das fronteiras do nosso sistema e das respectivas funções pode ser feita a análise das interfaces. Considera-se uma interface de entrada (*In interface*) aquela que recebe *inputs* de fora do sistema. Assim ela faz parte do nosso sistema. No caso das interfaces de saídas (*out interfaces*) servem de mecanismos de transporte dos *outputs* do nosso sistema. Fazem parte da fronteira do nosso sistema (Siddiqui 2009).

No caso de a interface estar em contacto com o ambiente designam-se por *Internal Out Interfaces* (Siddiqui 2009).

- Falhas Funcionais

Depois de identificadas as diferentes funções do equipamento em estudo é necessário proceder à análise dos modos de falhas dessas mesmas funções. Os modos de falha não são mais do que as formas através das quais as funções podem falhar (Rausand 1998).

Antes de iniciar o estudo é importante salientar a existem diversos tipos de falhas, tais como:

1. Falhas súbitas

Falhas que não podem ser previstas por análises prévias.

2. Falhas graduais

São aquelas que são detetadas através de inspeções. Neste tipo de falhas os diversos tipos de parâmetros de funcionamento dos itens na máquina vão sendo degradados de forma gradual. É importante realçar que muitas vezes esta análise não é fácil, ou é muito dispendiosa pelo que é necessário tomar em consideração os fatores económicos (Rausand 1998).

3. Falhas de envelhecimento

Este tipo de falhas é caracterizado pelo facto de a probabilidade de ocorrência ir aumentando ao longo do tempo. Este tipo de falhas é muitas vezes gradual, mas também pode ocorrer de forma súbita. São geralmente causadas por desgaste mecânico de peças (Rausand 1998).

4.2. Análise do caso em estudo

As funções principais e as respetivas falhas funcionais do equipamento foram então realizadas e registadas na Tabela 6.

Na primeira coluna foram registados os tipos de funções. Para cada tipo foram registadas as principais funções na coluna 2. Na coluna seguinte foram registados os *standards* de comportamento da máquina para cada função. As falhas funcionais foram registadas na coluna 4.

De seguida foi feita uma análise da criticidade das principais falhas detetadas. Em algumas situações, os valores obtidos permitiriam limitar o estudo às falhas importantes. Um exemplo é a aplicação do RCM a máquinas extremamente complexas. A criticidade foi então calculada com base nos seguintes critérios:

- I. Segurança de pessoas
- II. Impacto ambiental
- III. Disponibilidade de produção

IV. Perda de material

Para cada um foi-lhes atribuída uma escala de 4 valores (**N**-Não aplicável,**L**-Baixa Relevância,**M**-Média importância,**H**-Alta importância). Devido ao horizonte temporal do estágio não é possível o estudo de todos os módulos do equipamento assim de modo a estudar os módulos mais relevantes, considerou-se, sempre que algum dos critérios tivesse um M ou H, o modo de falha respetiva seria alvo de futura análise.

Tabela 6 - Análise das principais funções do equipamento

Tipo de função	Função	Parâmetros de Funcionamento	Falhas Funcionais	Críticidade				Freq.
				S	E	O	C	
Principal	Colocar o PCB dentro do housing	-	Falha no picking	L	L	H	L	H
		-	Falha no placing	L	L	H	M	M
		Exo Z: 0 $\pm$ 0.1 Exo X: 0 $\pm$ 0.2mm	Falha no transporte	L	L	H	H	L
Principal	Exercer força na PCB de modo a inserir os pinos. Colocar o housing numa posição standard antes de ser prensado;	Forças entre os 60 e os 120 N 10mm $\pm$ 0.1	Prensagem fora da curva de especificação; Altura do housing fora de especificação	L	L	H	H	M
Secundária	Verificar a profundidade de inserção	2.4mm $\pm$ 0.2	Pinos de medição danificados devido ao desgaste Sistema de eixos danificados Câmaras Danificadas	L	L	L	L	L
Secundária	Verificar o posicionamento x,y dos pinos	Tolerância de 0.3mm em diâmetro	Câmara danificada Sistema de eixos danificados Iluminação danificada	L	L	L	L	L
Principal	Rodar os Jigs Acomodar o housing	360° em 4 posições	Housing fora de especificação Ferramenta fora de especificação Motor danificado	L	L	M	L	M
Segurança	Impedir ou parar o equipamento sempre que estes sejam atuados e/ou desatuado	-	Barreiras luminosas danificadas Botoneiras danificadas mecânicamente	H	L	L	L	L
Secundária	Garantir a alimentação da máquina de energia elétrica e pneumática	230 V tensão elétrica 6 bar pressão pneumática	Componentes elétricos danificados Purga do ar	H	L	L	L	L
Informação	Informação do operador sobre o estado da máquina	-	Ecrãs danificados eletricamente	N	N	L	L	L

Através da análise da tabela 4 decidiu-se com base nos critérios apresentados em cima que as funções a analisar seriam a colocação do “PCB dentro do *housing*”, “a prensagem” e a mesa rotativa.

5. Recolha de dados

5.1. Introdução

Todo o modelo apresentado até agora é baseado em dados, sejam eles dados de *design* ou dados operacionais. No entanto, o RCM também necessita de dados de fiabilidade dos equipamentos (Smith and Hinchcliffe 2004b).

Os dados de Fiabilidade são essenciais para conseguir avaliar corretamente a criticidade de um componente, ou até para conseguir otimizar o tempo entre manutenções preventivas sistemáticas. Dados de fiabilidade incluem por exemplo (Rausand 1998):

- a) MTTR (médio tempo para reparação)
- b) MTBF (médio tempo entre falhas)
- c) Taxa de falhas, $z(t)$

No que respeita à taxa de falhas, esta, normalmente, apresenta uma progressão crescente indicando que o equipamento está a ficar danificado. Ou então pode estar a acontecer o oposto, indicando que o item está a melhorar. É este parâmetro que está expresso na curva da banheira (Rausand 1998). Em sistemas reparáveis esta evolução é muito complexa, o que implica que sejam desenvolvidos modelos para o seu comportamento.

Os modelos mais comuns para sistemas não reparáveis são (Rausand 1998):

1. Distribuição de Weibull (desenvolvida para modos de falha individuais)
2. Distribuição lognorm
3. Distribuição gamma (utilizada na presença de poucos dados)

Para a maioria dos sistemas a distribuição de Weibull é a mais ajustável, devido aos seus bons resultados e relativa simplicidade. Esta distribuição é baseada em três critérios um designado por parâmetro de forma, α , um parâmetro de escala, β e um parâmetro de posição γ .

Estes dados podem ser recolhidos a partir de dados de falha da própria fábrica ou então recorrendo a bases de dados. Deve-se no entanto, ter algumas precauções com o recurso estas, uma vez que podem não ter o nível de precisão desejado ou os mecanismos através dos quais foram recolhidos não simularem as condições em que o equipamento está a funcionar (Rausand 1998). As bases de dados podem ser extremamente úteis no caso de equipamentos novos, como é o caso da máquina que se pretende analisar.

5.2. No caso em estudo

No caso do trabalho desenvolvido, e tendo em conta o facto de o equipamento ser completamente novo e a inexistência de tempo, para que fosse possível fazer uma recolha de dados manualmente (devido à inexistência de dados informatizados) de componentes de outras máquinas que fossem semelhantes com a Press Fit, não foi realizada nenhuma recolha de dados.

6. FMECA, análise dos modos de falha, efeitos e criticidade

Nesta etapa pretende-se descobrir os modos de falha dominantes dos itens críticos que foram identificados no passo FFA. Define-se modo de falha como “um acontecimento que causa uma falha funcional” (Moubray 1997). Segundo Moubray, a melhor forma de isolar os modos falha é começar pela elaboração das falhas funcionais, etapa concluída no Capítulo 4.

Moubray recomenda o uso de verbos e nomes, sendo que deve ter-se cuidado na escolha dos verbos, uma vez que estes podem influenciar de forma determinante a análise subsequente. Assim devem evitar-se verbos tais como: “falhou” ou “partiu” uma vez que não acrescentam muita informação. Deve, portanto, dar-se uma explicação suficientemente detalhada, de modo a que se obtenha alguma informação sobre a estratégia a adotar na resolução do problema (Moubray 1997).

A identificação dos modos de falha é essencial porque, no trabalho do dia-a-dia, a gestão das falhas é feita com base nos modos de falha do equipamento e não nas causas específicas do equipamento (Moubray 1997).

6.1. Tipos de modos de falha

Quando se olha para a manutenção não se deve ter apenas em consideração as falhas por degradação, deve também ter-se em atenção erros de *design* ou erros humanos. Os modos de falha podem, desta forma, ser categorizados em 3 categorias:

- Capabilidade da máquina com níveis inferiores aos desejados
- Excesso de exigência
- Incapacidade total de realização da tarefa para a qual a máquina foi designada

6.2. Perdas de capacidade

Normalmente as perdas de capacidade estão associadas às seguintes causas (Moubray 1997):

- Degradação física (peças de desgaste rápido) devido a fatores como: corrosão, fadiga, abrasão erosão, evaporação, perda de estanquicidade
- Falhas na lubrificação
- Sujidade
- Desmontagem
- Erros humanos

Lubrificação

No que respeita à lubrificação, de forma genérica, tem-se 2 tipos de modos de falha: escassez ou desgaste do lubrificante. A forma de lubrificar os equipamentos tem vindo a mudar de forma significativa ao longo deste últimos 20 anos uma vez que dantes a grande maioria dos pontos de lubrificação eram abastecido manualmente, agora um grande número de componentes são “lubrificados para a vida” ou então lubrificados de forma automática. Isto leva a que se possa em certas situações levar à aplicação do RCM a estes sistemas e considerar a lubrificação manual nos restantes pontos (Moubray 1997).

O segundo modo de falha consiste na degradação do próprio lubrificante devido à deteiorização das moléculas do óleo, à oxidação da base do óleo e dos respetivos aditivos. A degradação pode vir também da presença de impureza ou da presença de água (Moubray 1997).

Sujidade

A presença de pó é um fator importante pois pode representar problemas de qualidade para o produto, bem como afetar a aparência dos mesmos. As sujidades podem aumentar a taxa de desgaste de certos componentes como por exemplos rolamentos ou então causar desalinhamentos (Moubray 1997).

Desmontagens

De forma genérica, se o produto se desmontar ou cair fora da máquina estamos perante um problema grave. Isto acontece sobretudo a problemas com soldaduras no produto, rebitagens, conexões elétricas, aparafusamentos, tubagens. Nessa característica é importante analisar os modos de falha de pinos de bloqueio ou outro qualquer sistema que esteja a unir materiais.

Erros Humanos

Este tipo refere-se a ações que os operadores da máquina podem fazer e que impedem a máquina de fazer o seu funcionamento normal. Por exemplo, caso haja a necessidade de fechar uma válvula manualmente e o operador se esqueça, a máquina não vai poder funcionar em condições normais.

6.3. Excesso de exigência

Este modo acontece quando se aumenta a exigência de capacidade da máquina até a um nível que sai fora dos exequíveis pela mesma. Normalmente, nestas condições, os modos de falha são os seguintes (Moubray 1997):

- Falha do equipamento em atingir a capacidade pretendida
- O excesso de força causa a degradação acelerada do equipamento,

Geralmente, este modo de falha acontece devido a quatro causas, sendo que três delas são devido a erros humanos. Assim as causas são:

- Excesso de esforço de forma proposita de forma contínua
- Excesso de esforço de forma involuntária de forma contínua
- Carga excessiva repentina
- Material de processamento incorreto

O problema da capacidade do equipamento é o exemplo claro das diferenças de objetivo entre a produção e a manutenção de uma fábrica. Enquanto os primeiros querem, mantendo os mesmos bens, produzir mais, os segundos não aceitam esta filosofia, pois sabem que a longo prazo haverá problemas com os equipamentos. Assim a solução nestas situações passa por tentar adaptar o equipamento às novas exigências, caso seja possível (Moubray 1997).

Pode acontecer também que, com o aumento de produção causado pelo aumento de máquinas, que exista um aumento da esforço por parte das instalações. Isto é, os sistemas de ar comprimido, por exemplo, podem sofrer com esta situação resultando em problemas no futuro.

A categoria das cargas repentinas remete-nos para o problema dos erros de operação das máquinas. Por exemplo a colocação de uma bomba a rodar no sentido inverso ou o aperto exagerado de um parafuso.

Por fim, o material fora de especificação representa um problema significativo nas fábricas, uma vez que são difíceis de controlar. Estes problemas devem ser tomados em consideração no FMECA uma vez que, apesar de a causa-raiz do problema não estar na máquina, deve considerar-se para se ter uma noção do que pode acontecer. Deve também deixar-se a nota sobre a localização do problema.

6.4. Qual o detalhe a efetuar na análise

Como regra foi dito que os modos de falha devem ser escolhidos de forma a ser possível seleccionar-se o correto tipo de manutenção. No entanto, deve ter-se o cuidado de não entrar em muito detalhe uma vez que pode investir-se demasiado tempo com pouco retorno no final .

Na realidade, a escolha do nível de análise revela-se bastante difícil, mas não deve ser menosprezada uma vez que os resultados dependem profundamente desta escolha.

De forma a não tornar a análise muito rígida, é permitida a análise dos diversos modos de falha em níveis de análise diferentes. É neste passo que a experiência na realização das FMECAs ajuda bastante, pois colaboradores sem experiência podem perder-se rapidamente na análise. Deve ter-se o cuidado de não incluir todos os tipos de falhas possíveis, mas sim aquelas que pareçam prováveis de acontecer. No entanto, aquando da presença de consequências com gravidades altas deve analisar-se mesmo que pareça improvável.

6.5. Efeitos dos modos de falha

É comum, principalmente quando a experiência na realização de FMECAs é reduzida, confundir-se causas e efeitos, pois as causas numa parte da máquina podem ser o efeito noutra. Assim atribui-se o nome de efeito à descrição da ocorrência da falha. Deve, no entanto, salientar-se que efeito não é o mesmo que consequência uma vez que os efeitos se preocupam em descrever o que aconteceu enquanto as consequências dedicam-se a analisar a gravidade do efeito (Moubray 1997).

Deve-se tentar incluir na descrição do modo de falha os seguintes pontos:

- A evidência que a falha ocorreu

Esta deve ser descrita de modo á equipa no terreno detetar de forma expedita a falha

- De que forma se apresenta uma ameaça para a segurança ou ambiente

Aqui deve tentar-se evitar dizer que existe perigo de segurança, deve substituir-se por uma expressão do género perigo de entalamento.

- De que forma afeta a produção

Deve tentar-se indicar de que forma a produção é afetada (peças defeituosas, produto bom rejeitado e produto mau aceite) e durante quanto tempo

6.6. Realidade encontrada

Na elaboração dos FMECA começou-se por fazer a divisão do equipamento conforme as regras definidas no Capítulo 2. O resultado para o Módulo de *picking up* é visível na Figura 23.

Implementação de RCM em equipamento novo

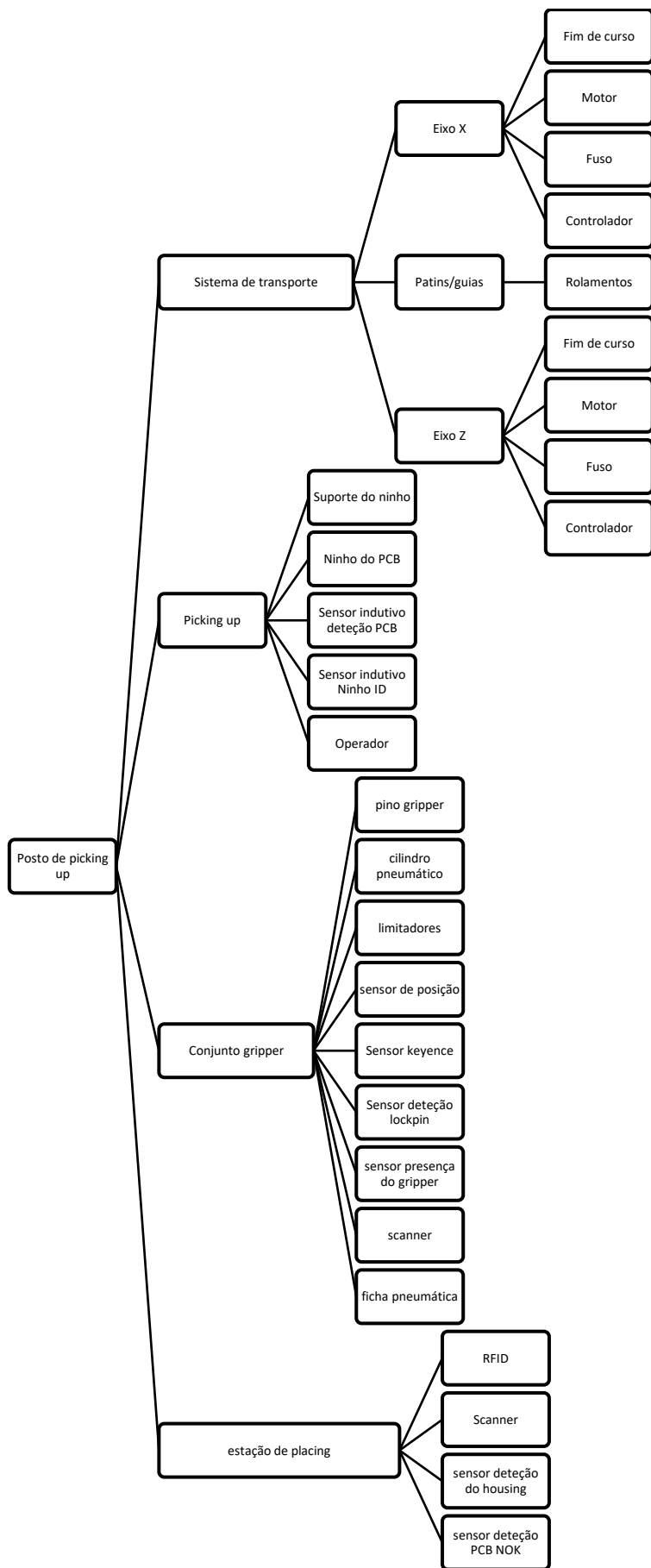


Figura 23 - Subdivisão do módulo de pick and place

Existe uma grande diversidade de *templates* que podem ser usados para executar esta tarefa. Apesar de diferentes todos apresentam os seguintes componentes:

- a) Elemento
- b) Modo operacional
- c) Função
- d) Modo de falha
- e) Efeito da falha

O RPN é calculado da seguinte equação (8)

$$RPN = S \times O \times D \quad (8)$$

Onde:

S – Severidade do efeito das falhas

O – Frequência prevista das falhas

D – Detetabilidade das falhas

Para ser possível classificar cada um destes parâmetros foram utilizados os critérios das Tabela 7,8,9.

Tabela 7 - Caracterização dos níveis de severidade

Matriz Severidade (S)		
Ranking	Descrição - Processo / Produto	
10	Perigoso	Paragem de produção superior a 8h ou produção de peças defeituosas superior a 1h ou risco de segurança.
9	Perigoso	Paragem de produção 6h-8h ou produção de peças defeituosas superior a 1h ou risco de segurança.
8	Muito Alto	Paragem de produção 4h-6h ou produção de peças defeituosas até 1h. Sem risco de segurança.
7	Alto	Paragem de produção 3h-4h ou produção de peças defeituosas até 1h. Sem risco de segurança.
6	Moderado	Paragem de produção até 2h-3h ou produção de peças defeituosas até activar o limite de reação. Sem risco de segurança.
5	Baixo	Paragem de produção até 1h-2h ou produção de peças defeituosas até activar o limite de reação. Sem risco de segurança.
4	Muito baixo	Paragem de produção até 30 minutos-1h sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.
3	Secundário	Paragem de produção até 30 minutos sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.
2	Muito secundário	A falha resulta numa manutenção "sem calendário" ou o ajuste pode ser feito durante a produção. Com tempo de paragem do equipamento reduzido (micro-paragem). Sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.
1	Nenhum efeito	A falha resulta numa manutenção "sem calendário" ou o ajuste pode ser feito durante a produção. Sem tempo de paragem do equipamento. Sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.

Tabela 8 - Caracterização dos níveis de ocorrência

Matriz Severidade (S)		
Ranking	Descrição - Processo / Produto	
10	Perigoso	Paragem de produção superior a 8h ou produção de peças defeituosas superior a 1h ou risco de segurança.
9	Perigoso	Paragem de produção 6h-8h ou produção de peças defeituosas superior a 1h ou risco de segurança.
8	Muito Alto	Paragem de produção 4h-6h ou produção de peças defeituosas até 1h. Sem risco de segurança.
7	Alto	Paragem de produção 3h-4h ou produção de peças defeituosas até 1h. Sem risco de segurança.
6	Moderado	Paragem de produção até 2h-3h ou produção de peças defeituosas até activar o limite de reação. Sem risco de segurança.
5	Baixo	Paragem de produção até 1h-2h ou produção de peças defeituosas até activar o limite de reação. Sem risco de segurança.
4	Muito baixo	Paragem de produção até 30 minutos-1h sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.
3	Secundário	Paragem de produção até 30 minutos sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.
2	Muito secundário	A falha resulta numa manutenção "sem calendário" ou o ajuste pode ser feito durante a produção. Com tempo de paragem do equipamento reduzido (micro-paragem). Sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.
1	Nenhum efeito	A falha resulta numa manutenção "sem calendário" ou o ajuste pode ser feito durante a produção. Sem tempo de paragem do equipamento. Sem produção de peças defeituosas. Sem risco de segurança.

Implementação de RCM em equipamento novo

Tabela 9 - Caracterização dos níveis de detetabilidade

Matriz Detetabilidade (D)		
Ranking		Descrição - Processo / Produto
10	Incerteza absoluta	Grande incerteza na detecção da causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico superior a 8h. OU Não está definido nenhum sistema de monitorização para controlo e diagnóstico da falha do componente (causa raiz)
9	Muito remoto	Muito remoto a detecção da causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico entre 6h a 8h. OU Não está definido nenhum sistema de monitorização para controlo e diagnóstico da falha do componente (causa raiz)
8	Remoto	Detecção atempada da causa raiz remota, previsão de diagnóstico entre 4h a 6h. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com probabilidade remota de detecção da falha do componente (causa raiz)
7	Muito baixo	Detecção atempada da causa raiz muito baixa, previsão de diagnóstico entre 3h a 4h. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com muito baixa probabilidade de detecção da falha do componente (causa raiz)
6	Baixo	Baixa probabilidade de detectar a causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico entre 2h a 3h. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com baixa probabilidade de detecção da falha do componente (causa raiz)
5	Moderado	Moderada probabilidade de detectar a causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico entre 1h a 2h. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com moderada probabilidade de detecção da falha do componente (causa raiz)
4	Moderado-Alto	Moderada-alto probabilidade de detectar a causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico entre 30 min a 1h. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com probabilidade moderada-alto de detectar a falha do componente (causa raiz)
3	Alto	Alta probabilidade de detectar a causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico entre 15 min a 30 min. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com probabilidade alta de detectar a falha do componente (causa raiz)
2	Muito Alto	Muito-alto probabilidade de detectar a causa raiz atempadamente, previsão de diagnóstico 15 min. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico com probabilidade muito-alta de detectar a falha do componente (causa raiz)
1	Quase certo	Certamente irá ser detectada a causa, previsão de diagnóstico imediato. OU Processo de monitorização definido para controlo e diagnóstico permite a detecção imediata da falha do componente (causa raiz)

Depois de se ter atribuído os níveis de severidade a todos os efeitos e a ocorrência e detetabilidade das causas, calculou-se o RPN para todos os componentes analisados nesta FMECA.

Obtiveram-se os resultados da Figura 24.

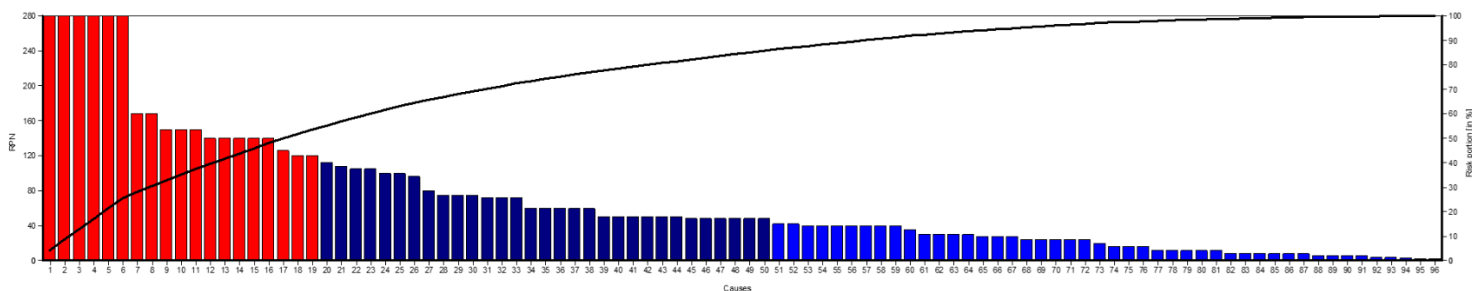


Figura 24 - Visualização dos níveis de RPN obtidos

Perante a necessidade de classificar as falhas mais críticas, de modo a atuar sobre estas em primeiro lugar, optou-se pela forma apresentada na Tabela 10

Tabela 10 - Atribuição de níveis de importância ao valor de RPN

Importância	RPN
Crítica	50% do RPN Max
Prioritária	15% do RPN Max
Secundária	Restantes

Optou-se por este método considerando o facto de se estar perante um equipamento novo e não se ter noção dos valores de RPN que se obteria. Adicionalmente, foi tido em consideração que a grande maioria das decisões foi baseada na experiência dos técnicos, o que levou a que muitas das opções que se tomaram fossem obtidas por comparação em relação às outras.

Desta feita, apenas se consideraram para determinação da estratégia de manutenção, aquelas que têm um nível de importância prioritário ou crítico. Pode ver-se o resultado na Figura 25

Implementação de RCM em equipamento novo

BOSCH Tecnologia para a vida			FMECA																	Pag.					
			Máquina: Press Fit																	DEPT.:MFE-MTN					
			Realizada por: Tiago Cabo							Verificado por:															
																				Data: 17-05-2017					
Componente	Função	Modo de Falha	Efeitos	Causa	S (max)	O	D	RPN =SxDxO	Consequências				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Ação normalizada			Ações a efetuar	Intervalo de manutenção	Pode ser realizado por:				
									H	S	E	O				H4	H5	S4							
Eixo X	transformar movimento rotativo em movimento linear no sentido do X, suavemente com um erro de +/- 0.1mm	Fim de curso danificado	[Sistema de transporte] Efeito módulo:Eixo X com movimento descontrolado	[Fim de curso WB650A/B] piko de corrente	10	1	3	30																	
			[Posto de picking up] >> Efeito global: Colisão do Eixo X	[Fim de curso WB650A/B] mau acondicionamento do cabo do sensor	10	1	4	40																	
			[Fim de curso WB650A/B] sensor desajustado	S	N	N	S	N	N	N	S									Verificação do posicionamento do cabo	6 meses	Manutenção			
		Fuso danificado devido a desgaste	[Sistema de transporte] Efeito módulo: Eixo X fora de posição	[Fuso] fraca lubrificação {1}	8	3	5	120	N					N	S						Verificar o estado da lubrificação e lubrificar se necessário	anual	Manutenção		
			[Posto de picking up] >> Efeito global: Produção de unidades defeituosas	[Fuso] Sujidade	8	7	3	168	N					S								Verificação da fita de proteção do fuso, limpeza do motor	Mensal	Produção	
			Motor sobreaquecido, sem movimento	[Sistema de transporte] Efeito módulo:Eixo X sem movimentação	[Motor M650] Esforço do motor devido à prisão mecânica do fuso	5	2	5	50	S	N	N	S	S									Verificação do estado do motor usando uma fita térmica	Contínua	Produção
		[Posto de picking up] >> Efeito global: Não transporta a unidade do picking para o placing		[Motor M650] Esforço do motor, rolamentos danificados devido a sujidades	5	2	10	100	S	N													Verificação do estado do motor usando uma fita térmica	Contínua	Produção
		[Motor M650] Dano nos cabos devido a vibração excessiva		N	N	N	S	N	N	N	S											Verificação do estado dos cabos	Anual	Manutenção	
		Controlador danificado	[Sistema de transporte] Efeito módulo:Eixo X sem movimentação	[Controlador ST1X] Pico de corrente	5	2	6	60	N					N	N	N	N	N				Sem manutenção aplicada ao controlador - Manutenção ao quadro elétrico			
			[Posto de picking up] >> Efeito global: Não transporta a unidade do picking para o placing																						
Patins/Guias	Transmitir o movimento do eixo para a cabeça do gripper de forma silenciosa	Prisão dos patins/guias	[Sistema de transporte] Efeito módulo: Eixos com ruído	[Rolamentos] Rolamentos danificados por falta de lubrificação	3	6	3	54	S	N	N	S	N	S							Lubrificação das guias com pano de oleo	6 meses	Manutenção		
			[Posto de picking up] >> Efeito global: Máquina com ruído	[Rolamentos] Rolamentos danificados por Guias com sujidade	3	6	3	54	S	N	N	S	N	S								Limpeza das guias com pano e alcool	6 meses	Manutenção	
Conjunto Gripper	Agarrar a PCB, de forma silenciosa	Agarra o PCB mas durante o transporte deixa cair	[Posto de picking up] Efeito global: Peça cai durante o transporte. Erro: PCB nao colocado na peça	[Pino gripper] Desgaste do pino	5	5	3	75	N					N	N	S					Substituição do pino	6 meses	Manutenção		
				[Sensor indutivo B604] sensor danificado	5	2	2	20																	
		Não amortece o impacto do sensor no PCB	[Posto de picking up] Efeito global: Funcionamento do posto de picking up com mais ruído	[Mola Misumi VUR-10-40] Mola perde a força	5	2	5	50	N					N	N	N	S				Verificação do estado da mola pelo técnico de manutenção	anual			
				[Mola Misumi VUR-10-40] Mola partida	5	1	5	25																	
				[Mola Misumi VUR-10-40] veio sem lubrificação	5	4	3	60	S					N	S							Lubrificação do veio com os panos com oleo	6 meses	Produção	
				[Mola Misumi VUR-10-40] veio com sugidade	5	4	3	60	S					N	S							Limpeza do veio com os panos com oleo	6 meses	Produção	
		Não deteta a posição de cilindro. Gripper nao agarra no PCB	[Posto de picking up] Efeito global: Erro: Fim de curso não atingido	[HGPP-10-Acilindro sem haste] fim de curso avariado	2	3	4	24																	
				[Posto de picking up] Efeito global: Colisão dos pinos do gripper contra o PCB	[Ninho da PCB] desgaste da guia da cabeça do gripper	8	2	4	64	N					N	N	N	N	N	N		Sem manutenção - Run to Failure			
			[Posto de picking up] Efeito global: Erro: Fim de curso não atingido	[HGPP-10-Acilindro sem haste] amplificador do fim de curso danificado	8	2	3	48	N						N	N	N	N	N	N		Sem manutenção - Run to Failure			
				[Posto de picking up] Efeito global: Erro na leitura do código 2D da PCB	[Pino gripper] Desgaste do pino	8	5	3	120	N					N	N	S					Substituição do pino	6 meses	Manutenção	
				[Pino gripper] pino partido	8	3	1	24																	
				[Pino gripper] sem pino	8	1	1	8																	
				[Pino gripper] pino empenado	8	4	3	96	N					N	N	S						Substituição do pino	6 meses	Manutenção	
				[limitadores fixos] desgaste do parafuso	8	1	6	48																	
				[limitadores fixos] desaperto do parafuso	8	3	3	72	N					N	N	N	N	N	N		Sem manutenção - Run to Failure				
				[HGPP-10-Acilindro sem haste] fuga de ar	8	3	2	48	S	N	N	S	S									Reparação depois dos operadores detetarem ruído		Manutenção	
				[HGPP-10-Acilindro sem haste] cilindro danificado	8	3	2	48	N					N	N	N	N	N	N		Sem manutenção - Run to Failure				
[Conetor pneumático] Contacto desgastado	8			3	2	48	N					N	N	N	N	N	N		Sem manutenção - Run to Failure						
[Conetor elétrico] contactos danificados devido ao desgaste	8			2	3	48	N					N	N	N	N	N	N		Sem manutenção - Run to Failure						
[Scanner A633 PCB] Danificado	8	2	5	80	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N				Sem manutenção - Run to Failure							
[Scanner A633 PCB] Bloqueio conversor datalogic	8	7	2	112	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N				Sem manutenção - Run to Failure							

Figura 25 - Resultados FMECA

6.6.1. Resultados Finais do FMECA

No FMECA realizado foram analisados 107 modos de falha e identificadas cerca de 300 causas, sendo que com a análise decorrente do FFA foram apenas consideradas 50 causas de falhas para análise. Destas, depois de se ter utilizado a árvore de decisão, foram selecionadas as seguintes manutenções:

- 6 Manutenções baseadas numa condição
- 5 Manutenções de restauração de condição
- 3 Manutenção de substituição de componentes
- 15 Manutenções de procura de falha
- 12 Causas de falha sem manutenção

Adicionalmente, aos mencionados no primeiro parágrafo, para 9 dos modos de falha foram selecionadas atividades com responsabilidade de outros departamentos. Por fim, foi ainda detetada 1 tarefa de redesign que por ter dado problemas ainda na fase de amostras foi executada de imediato.

Com o objetivo de tentar comparar as manutenções obtidas com aquelas que seriam criadas caso se tivesse optado pelo procedimento utilizado atualmente, efetuou-se um estudo às ações de manutenção que não foram sujeitas a análise e constatou-se que existiam 15 modos de falha com potencial para terem uma ação de manutenção associada. Assim, seriam necessárias 65 ações de manutenção para o equipamento. Conclui-se que com a introdução do RCM obteve-se uma diminuição de 21.5% no número de manutenções.

6.6.2. Aprendizagens do FMECA

A maiores dificuldades na execução do FMECA foram: a divisão do equipamento, pois certos componentes poderiam ser incluídos em mais do que um módulo o que dificultou o entendimento do equipamento; o nível de detalhe a ser atingido revelou-se também difícil de definir, uma vez que exista uma dificuldade de entendimento entre a equipa resultante da inexistência de experiência e formação em RCM. A integração do FMECA com o software utilizado na empresa, apresentou também um grande desafio.

No entanto o FMECA, a nível pessoal, revelou-se muito desafiador e permitiu que começasse a olhar para os equipamentos de outra forma. Isto revelou-se particularmente eficaz durante reparações de equipamentos.

6.7. Determinação dos intervalos de manutenção

Esta etapa é necessária em todas as intervenções de manutenção que sejam realizadas em intervalos de tempo regulares. Esta tarefa é das mais difíceis de ser executada corretamente pois depende muito da quantidade e sobretudo da qualidade de dados disponíveis para análise Smith (Smith and Hinchcliffe 2004b)

Na literatura existem diversos modelos teóricos de tratamento desta matéria, mas falham a maior parte das vezes porque, em adição à componente teórica muitas vezes incompreendida, necessitam de dados a alimentar os modelos que muitas vezes não são disponíveis nas organizações (Smith and Hinchcliffe 2004b).

Assim, tendo em conta a inexistência de dados para este equipamento todos os intervalos foram determinados com base na experiência da equipa. Consultar Figura 25.

6.8. Determinação das ações de manutenção

Esta etapa, é aquela onde muitos autores, consideram que o RCM dá uma contribuição diferente quando comparando com outras metodologias de gestão da manutenção (Rausand 1998).

Aqui é geralmente seguido um guião, onde o analista responda a questão de sim ou não, tendo em consideração os modos de falha do FMECA. O grande objetivo é, tendo em conta os modos de falha dominantes, determinar quais são as ações de PM mais eficazes e aplicáveis e quais são aquelas que não valem a pena ser implementadas e que implicam que se deixe deliberadamente o equipamento trabalhar até à falha e depois sim proceder a ações corretivas (Rausand 1998).

Genericamente, há três razões para a realização de ações preventivas (Rausand 1998):

- Para prevenir uma falha
- Para detetar o início de uma falha
- Para descobrir uma falha oculta

As ações de manutenção são divididas em 5 classes (Rausand 1998):

- Manutenção condicionada
- Manutenção preventiva sistemática
- Substituição de peças preventivamente
- Testes de funcionalidade
- Sem ação – *Run To Failure (RTF)*

Para a manutenção condicionada ser exequível têm de ser cumpridos os seguintes critérios (Rausand 1998):

- i. O modo de falha selecionado tem de pouco resistente à falha.
- ii. A falha tem de ser detetada por uma tarefa explícita.
- iii. O intervalo entre o tempo de funcionamento e o tempo funcional.

A inspeção preventiva sistemática consiste na execução de uma tarefa antes de um especificado limite de vida para o equipamento, como pode ser visto na curva da Figura 26 (Rausand 1998).

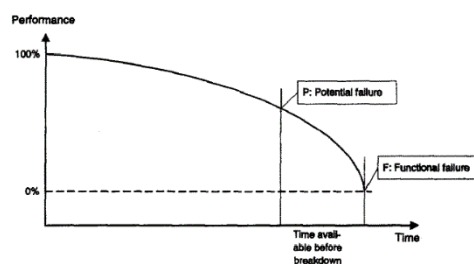


Figura 26 - Curva P-F (adaptado de Rausand 1998)

Tal como na condicionada, os requisitos que a tarefa preventiva sistemática tem de obedecer para ser exequível com sucesso são (Rausand 1998):

- i. Tem de ser detetada um período de tempo onde seja claro que a degradação do equipamento aumenta de forma significativa.

- ii. Uma grande percentagem dos itens da máquina tem de ser capaz de aguentar essa idade
- iii. Tem de ser possível a restauração da resistência inicial do item à falha com retrabalho

A substituição preventiva de determinados componentes tem de obedecer aos seguintes critérios (Rausand 1998):

- i. O item tem de estar sujeito a uma falha crítica
- ii. Deve estar provado que não irá a ocorrer falhas antes do tempo *standardizado*
- iii. As falhas resultantes devem ter um impacto económico significativo
- iv. Tem de ser observado um comportamento semelhante à curva P-F
- v. Uma grande maioria dos itens tem de ser capaz de suportar a idade estipulada

A manutenção de teste de funcionamento do equipamento serve para identificar falhas ocultas, tais como em equipamentos de segurança. Os critérios a que tem de obedecer são os seguintes (Rausand 1998):

- i. Estar sujeita a falhas que têm detetabilidade difícil
- ii. Nenhum dos outros tipos de manutenção apresentado é aplicável e/ou eficiente.

Caso nenhum destes tipos de manutenção seja aplicável e/ou eficiente e ainda os custos das falhas sejam baixas, deve optar-se por deixar o equipamento funcionar até à falha – situação RTF (Rausand 1998).

A PM não vai prever todo o tipo de falhas, pelo que, caso exista alguma onde o risco seja muito elevado é necessário proceder a alterações de conceito na máquina (Rausand 1998).

As ações de manutenção analisadas em cima seguiram a árvore de decisão proposta por Moubray. Esta baseia-se na análise dos efeitos sob quatro critérios principais: Evidência da falha por parte dos operadores (H), Perigo de segurança para as pessoas (S), Perigo de dano ambiental (E) e impacto negativo na produção (O).

Através das respostas “Sim” ou “Não” a cada uma das perguntas na sequência sugerida pelo modelo podem obter-se os seguintes tipos de Manutenção:

- Manutenção segundo condição
- Manutenção de restauração de condição
- Manutenção de substituição
- Redesign
- RTF

O diagrama da Figura 27 exemplifica o típico diagrama de decisão que os mediadores de RCM seguem na atribuição das estratégias de manutenção.

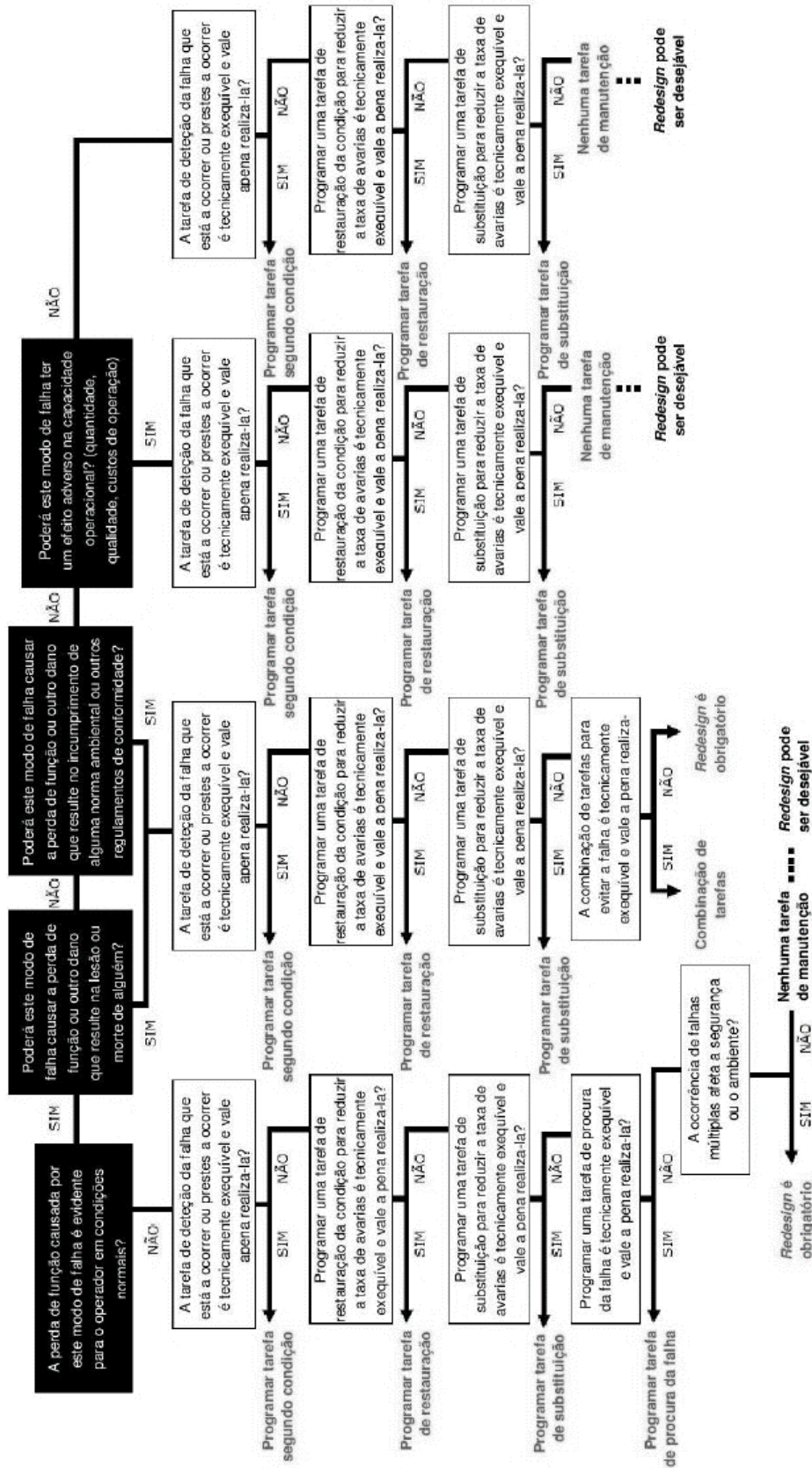


Figura 27 - Árvore de decisão (adaptado de Moubray 1997)

7. Organização e planeamento das manutenções preventivas

Depois de serem definidas as manutenções preventivas a realizar é necessário fazer uma organização das mesmas pela sua importância. Neste momento na empresa, tendo em conta o enorme crescimento da mesma, está a ser difícil gerir o planeamento das manutenções preventivas, uma vez que a quantidade existente leva a que muitas estejam em atraso (Khanlari, Mohammadi, and Sohrabi 2008). Assim ao longo do estágio e em parceria com a Universidade do Minho foi desenvolvido um modelo para a sua gestão.

Modelo em desenvolvimento

A estratégia que está a ser desenvolvida está apresentada na Figura 28.

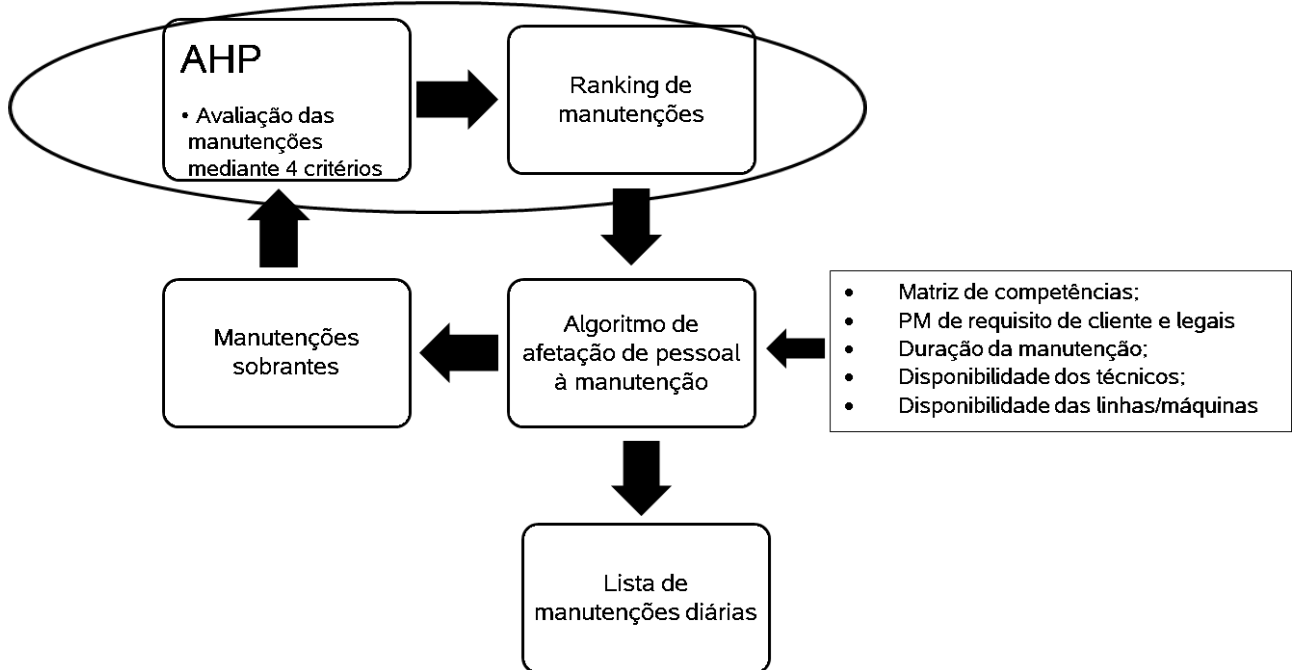


Figura 28 - Framework do novo método de gestão e planeamento das preventivas

Começou-se por desenvolver um modelo que organiza as manutenções tendo em conta três critérios:

- **Delay**

Este critério categoriza as manutenções tendo em conta o seu atraso, ou a proximidade com a data prevista para a sua execução. A fórmula usada para o cálculo do atraso foi a seguinte:

$$delay [\%] = \frac{today() - dueDate()}{T} \quad (9)$$

Onde:

- Today() é a data atual
- DueDate() é a data prevista para planeamento
- T é a periodicidade do planeamento

Depois de aplicada a fórmula sentiu-se a necessidade de criar uma forma de transformar os valores obtidos numa escala quantitativa. O modelo utilizado visível na Tabela 11, para a conversão foi baseado nos percentis dos valores obtidos.

Tabela 11 - Definição dos pesos para o atraso de planeamento das ações preventivas

Nível do critério	Gama de valores
1	-100% até <0
2	De 0% até p25%
3	P25% até p50%
4	P50% até p75%
5	>=P75

Todos os valores menores do que 0 (não atrasados) são categorizados com o valor 1, de 0 ao percentil 25 com o valor 2, do p25 ao p50 com o 3, do p50 ao p75 com o valor 4 e do p75 até ao p100 com o valor 5.

A Figura 29, ilustra esta forma de pensamento.

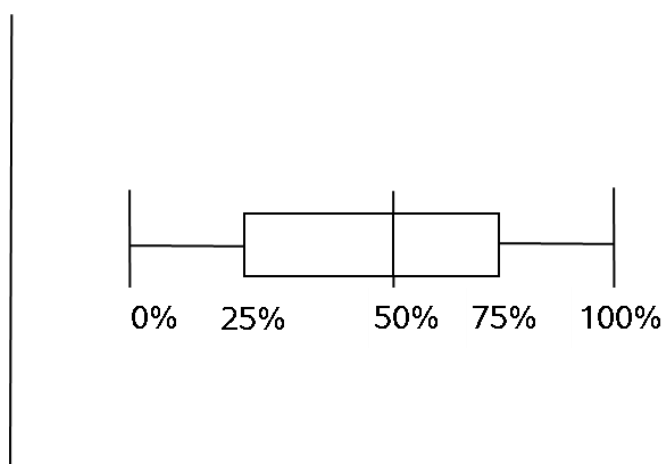


Figura 29 - Distribuição dos pesos usando percentis

Categorizou-se desta forma uma vez que se sentiu a necessidade de ter um modelo que se auto ajustasse em função do tempo de atraso. Se se tivesse uma tabela estática poderia-se perder sensibilidade nos valores.

- **Criticidade**

Com este fator, o objetivo foi classificar a manutenção em função da sua importância para a máquina/equipamento considerando o efeito que a manutenção teria caso não fosse executada.

Assim, definiram-se 4 critérios de modo a normalizar a atribuição de classificação conforme a Tabela 12, sendo eles:

- Influência na qualidade do produto
- Tempo de reparação
- Perda de produção
- Perigo para as pessoas

De modo a normalizar a atribuição de classificação conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Níveis de classificação dos critérios de importância de cada manutenção preventiva

Afeta a qualidade do produto	Perigo para operador	Risco de paragem da máquina	Tempo de resolução
1: Não afeta	1: Sem risco	1: Sem risco de paragem	1 Resolução quase instantânea (Ex.reset)
2: Falsa rejeição		2: Abrandamento ligeiro (funcionamento contínuo)	2 Resolução rápida (Ex. <15min)
3: Dano com reparação	3: Com risco (e.g. manutenção elétrica)	3: Movimento intermitente (funcionamento contínuo)	3 Resolução demorada (Ex. 15min<t<45min)
4: Dano sem reparação		4: Paragem gradual	4 Resolução muito demorada e complexa (Ex. 45min<t<120min)
5: Dano não detetável	5: Risco de acidente (e.g. sistema de segurança)	5: Paragem instantânea	5 Resolução muito demorada, complexa; necessário 2 técnicos (Ex. >120min)

Com a Tabela 12 conseguiu-se que a avaliação, mesmo com analistas diferentes, ficasse o mais homogênea possível.

O passo seguinte foi aplicar estes critérios a todas as manutenções preventivas existentes. Mediante o enorme número de manutenção existente ficou claro que não seria viável aplicar esta avaliação exaustiva para todas. Assim optou-se pela criação de uma tabela designada por tipos de manutenções, na qual se procurou agrupar os tipos existentes.

Apesar de se ter tentado agrupar o máximo de manutenções possíveis, algumas serão designadas por exceções dentro do seu grupo. Estas terão tratamento especial e será permitida a edição dos parâmetros de forma individual.

- **BIR**

Este parâmetro foi incluído de modo a comparar aquelas manutenções que têm prioridade diferente mediante a máquina/ferramenta a que estão a ser aplicadas. Ou seja, considerou-se que máquinas que trabalhem mais turnos e que não possuam equipamentos duplicados em linha possuam manutenções mais críticas (Stadnicka, Antosz, and Ratnayake 2014).

A Tabela 13 ilustra a classificação dadas às manutenções com base nas características da sua aplicação

Tabela 13 - Pesos para cada manutenção com base na sua aplicação

Nível do critério	Nºturnos	Equipamentos duplicados
1	1 turno	
2	2 turnos	Sim
3	> 3 turnos	Não

Com base nos valores de cada um dos critérios foi criada uma tabela que converteu os dois parâmetros no parâmetro genérico BIR (Tabela 14).

Tabela 14 - Determinação do BIR com base no numero de turnos e na existência de equipamentos duplicados

Nºturnos	Equipamentos duplicados	Bir
3	2	4
3	1	3
2	2	3
2	1	2
1	2	2
1	1	1

Para a integração de todos os critérios apresentados em cima, foi usado o modelo AHP para comparar os 4 critérios das manutenções e para comparar os critérios BIR, *delay* e criticidade. No subcapítulo 7.1 será explicado o procedimento deste método de decisão.

7.1. Modelo AHP

Modelo de decisão multicritério desenvolvido por Thomas Satty, matematicamente simples, que admite tanto dados qualitativos como quantitativos (Saaty 1990).

Este modelo tem vindo a ser estudado, por diversos autores, como uma ferramenta para a determinação dos tipos de manutenção mais adequado para certos equipamentos (Bertolini and Bevilacqua 2006, Bevilacqua and Braglia 2000, Triantaphyllou et al. 1997)

O modelo consiste numa árvore hierárquica com o objetivo no topo, seguido dos critérios de seleção no meio e por fim as alternativas de decisão. Neste trabalho optou-se por não introduzir as manutenções como alternativas (devido à falta de eficácia em ambiente real), pelo que a árvore ficou-se apenas pelo segundo ramo conforme apresentado na Figura 30.

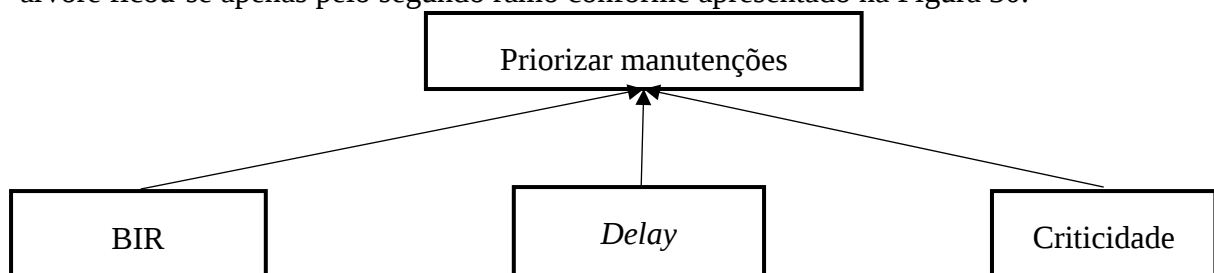


Figura 30 - Esquema hierárquico para o AHP

Como se mostra na Tabela 15, foi utilizada uma escala de 1 a 9 para comparar as manutenções (Saaty 1990).

Tabela 15 - Gama de classificação utilização na comparação dos critérios

Grau de comparação	Valor
Semelhante	1
Moderada	2;3
Forte	4;5
Muito Forte	6;7
Extremamente	8;9

Os resultados da comparação entre os critérios surgem na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da comparação dos critérios BIR, Delay, Criticidade

	BIR	Delay	Criticidade
BIR	1	0,333333333	0,5
Delay	3	1	2
Criticidade	2	0,5	1

Um exemplo de interpretação da tabela é o seguinte: O delay foi considerado 3 vezes mais importante que o BIR e 2 vezes mais importante que a criticidade.

Com esta tabela é efetuada uma normalização dos valores de modo a garantir uma homogeneização dos pesos dos critérios durante o cálculo. No fim resulta a ordenação dos critérios conforme a importância. Pode ver-se o resultado final na Tabela 17.

Tabela 17 - Hierarquização dos três critérios

	Peso do critério
BIR	0,163780664
Delay	0,538961039
Criticidade	0,297258297

O passo final consiste em efetuar uma média ponderada entre os pesos de cada manutenção para cada critério e por fim ordenar as manutenções do valor mais alto para o menor.

O trabalho acima apresentado serviu de base para a elaboração de um artigo que foi submetido para a conferência IEEM, organizada pelo instituto IEEE a ocorrer em Singapura durante o mês de Dezembro de 2017, intitulado de “Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling” e encontra-se neste momento em fase de integração no CMMS da Bosch. O artigo encontra-se no Anexo C.

8. Implementação e atualização dos dados

8.1. Introdução

Para que o RCM seja implementado com sucesso é necessário que a organização possua meios de manutenção e organizacionais que deem apoio. Para certos níveis de manutenção pode ser necessário analisar o risco para o técnico e verificar se são comportáveis (Rausand 1998).

Segundo Moubray (1998), para que os benefícios do RCM sejam perpetuados no tempo é preciso garantir que certas etapas sejam feitas. Essas etapas são:

- Todas as recomendações têm de ser aceites pelos responsáveis máximos do equipamento;
- Todas as tarefas rotineiras têm de ser descritas de forma clara e concisa;
- As ações que sejam apenas efetuadas uma vez (por exemplo alterações de design) têm de ser corretamente identificadas e executadas;
- As alterações ao modo de trabalho têm de ser incluídas nas requisições de trabalho da linha
- As requisições de trabalho devem ser incluídas em sistemas que garantam que estas são executadas pelas pessoas corretas, no tempo certo e de forma eficaz.
- Qualquer falha adicional detetada deve ser resolvida rapidamente.

8.2. Aceitação pelos responsáveis

Caso aconteça algum dano grave com o equipamento (acidente de trabalho ou avaria grave), todas as medidas implementadas no plano de manutenção vão ser analisadas por seguradoras ou auditores que vão questionar tudo o que foi feito e o porquê (Moubray 1997). Assim, apesar de o processo ter sido desenvolvido com a maior responsabilidade, é do interesse de quem trabalhou no RCM sujeitá-lo à aprovação da sua chefia máxima, garantindo assim a partilha de responsabilidades. A revisão pode ser efetuada por uma pessoa designada pela chefia, no entanto no caso da existência de problema a chefia é na mesma a responsável. Caso seja encontrado algum ponto de discórdia, este deve ser ponderado e corrigido caso necessário (Smith and Hinchcliffe 2004c)

A revisão deve ser efetuada o mais depressa possível (preferivelmente duas semanas) porque na presença de discordâncias ainda é possível recordar pormenor não documentados das decisões tomadas. As equipas ficam motivadas porque vêem o seu trabalho valorizado e a empresa começa a experienciar os resultados do RCM de forma mais antecipada (Moubray 1997).

O auditor deve verificar se o RCM foi bem aplicado em primeiro lugar e posteriormente analisar os detalhes. Deve verificar se a análise não foi, erroneamente, executada a um nível de detalhe muito alto. Isto vê-se claramente com a existência de muitos componentes com poucas funções para si designadas (Moubray 1997).

Deve verificar se as funções foram claramente escritas e se vêm acompanhadas pelos seus parâmetros. Deve ainda ter atenção particular aos sistemas de segurança de modo a garantir que todos estão analisados e que as suas funções estão na forma (faz Y se Z não acontecer) (Moubray 1997).

No processo de aceitação deve ser analisada a FMECA. Deve começar-se pelas falhas funcionais garantindo que cada função tem a sua falha analisada. No que respeita aos modos de falhas, no caso de equipamento já existentes deve garantir-se que as falhas que já aconteceram estão presentes na análise e que no caso de equipamento novos a falhas mais prováveis estejam também presentes (Smith and Hinchcliffe 2004c).

As descrições dos efeitos devem ser completas o suficiente para garantir quando e como uma falha se vai tornar evidente para a equipa operacional. Quando a falha é uma ameaça para a segurança e, caso exista, dar a conhecer as falhas que resultam em problemas de produção. Deve, ainda, ser referido o tempo de avaria previsto e o tempo de resolução bem como a ação a efetuar (substituição de componentes, reparação e *reset*) (Moubray 1997).

Na análise das consequências das falhas deve ter-se cuidado de se analisar a problemática das falhas ocultas bem como eventuais problemas de segurança de pessoal e ambiental (Moubray 1997).

No que respeita à seleção de tarefas, deve ter em atenção que estas têm de ser tecnicamente exequíveis, como também devem abordar as consequências da falha. Deve respeitar-se a árvore de decisão. Devem ter o detalhe suficiente de modo a não deixar qualquer dúvida sobre o que se pretende com a tarefa. Por fim, deve verificar-se que na mesma descrição de tarefa não se referem dois modos de falha diferentes. Deve, ainda, verificar-se se os intervalos de manutenção estão baseados em dados relevantes (Smith and Hinchcliffe 2004c)

8.3. Descrições das tarefas

A descrição das tarefas deve ser detalhada o suficiente para que não deixe qualquer dúvida ao técnico relativamente às etapas que tem de cumprir. As tarefas devem incluir, ao mesmo tempo, ações que devem ser tomadas caso seja detetado algum defeito. Por exemplo, durante a limpeza de uma máquina caso surja algum problema numa peça deve haver a indicação sobre se o técnico pode efetuar a reparação imediatamente ou se deve apenas reportar o problema (Moubray 1997).

Informação necessária

A descrição detalhada das tarefas deve incluir os seguintes pontos (Moubray 1997):

- Descrição do equipamento onde irá ser feita a intervenção
- Quem deve proceder à execução da atividade
- Qual a frequência da atividade
- Etapas de preparação necessárias caso o equipamento tenha de ser interrompido, ou instruções para que a execução seja feita em segurança
- Ferramentas especiais ou *spare parts* necessárias

8.4. Alterações de *design*

Segundo Moubray (1997), o normal é encontrar entre 2% a 10% tarefas que estejam sujeitas a este tipo de alterações. Estas alterações incluem:

- Alterações de *design* mecânico à máquina
- Alterações de processo
- Alterações nas capacidades dos operadores, geralmente por treino.

No que respeita às alterações ao equipamento, estas devem ser feitas por um colaborador qualificado para o efeito e deve evitar-se que esta alteração seja feita durante o RCM. O técnico deve ser consultado no fim do processo e guiado de forma clara de modo a garantir que as tarefas de manutenção diárias não sejam afetadas.

8.5. Instruções de trabalho

Estas têm de ser organizadas conforme a natureza da manutenção, isto é, caso a manutenção seja de grande frequência (caso das tarefas a elaborar pelos operadores) ou de frequência mais espaçada. O inspetor deve também ter em atenção se é mostrado de forma clara que técnicos e com que qualificações pode ser executada a manutenção.

8.6. Atualização dos dados

Devido a muitas vezes a disponibilidades de dados, para o equipamento em estudo, ser baixa ou inexistente é necessário ir incluindo os dados de funcionamento do equipamento no modelo. Rausand (1998) refere que esta é uma das grandes vantagens do RCM pois compreende sistemáticas de atualização de dados. Assim conclui-se que só se obtém os benefícios do RCM com a junção de análise *a priori* e depois com dados da experiência (Rausand 1998).

O processo de atualização deve ser segmentado em três períodos temporais:

- Janelas de tempo curtas- Nesta janela atualiza-se sobretudo intervalos de manutenção usando dados de funcionamento
- Janelas intermédias (1ano) – Aqui faz-se uma análise às estratégias de implementação escolhidas
- Longo prazo – Aqui revê-se toda a estratégia usada no RCM e tem em conta contra impactos do equipamento como por exemplo ao nível das instalações.

Deve ser feita uma comparação entre a FMECA inicial e as falhas que realmente foram detetadas durante o funcionamento do equipamento.

9. Conclusões

Os maiores desafios para a aplicação do RCM na empresa passam pela integração com o TPM. O RCM mostra-se como uma excelente ferramenta para a melhoria contínua, pois o *know-how* que adiciona à equipa permite que esta seja muito mais eficaz na elaboração de planos de melhoria. No que respeita à autónoma, é possível obter vantagens significativas a nível de planeamento uma vez que a decisão dos níveis das manutenções é suportada com dados. A manutenção preventiva é o pilar do TPM mais diretamente influenciado. Com o RCM consegue-se otimizar as manutenções executadas quer a nível de quantidade a executar pela máquina, quer a nível de periodicidade.

No caso de estudo apresentado, o RCM comprovou ser uma ferramenta eficaz no trato de equipamentos novos, pois conduziu a uma redução de mais de 20% nas manutenções preventivas e conduziu a um profundo entendimento da máquina por parte da equipa. Age, também, como uma excelente ferramenta de formação, ao mesmo tempo que permite que se obtenham desde o início do trabalho do equipamento todas as manutenções necessárias, sendo necessário *á posteriori* uma atualização dos seus intervalos.

Constatou-se ainda que empresa possui excelentes requisitos para a implementação desta metodologia, entre as quais a estreita familiaridade com a ferramenta FMECA e a receptividade da chefia para a problemática da manutenção. A empresa possui ainda disponibilidade de meios para a aplicação de todo o tipo de ações de manutenção que se revelem vantajosas.

Tendo sido este projeto realizado em empresa no âmbito do estágio curricular, resultaram daí numerosas e valiosas aprendizagens para o futuro profissional tais como: a importância da clareza na especificação de planos de manutenção, bem como a dificuldade de gerir e planear a execução dos mesmos. A experiência de trabalhar numa empresa com a dimensão da Bosch permitiu desenvolver competências muito importantes a nível de comunicação e interação entre os diversos departamentos.

A aprendizagem mais importante do estágio foi a constatação na prática de que a aplicação de conceito e modelos teóricos de manutenção apresenta um grau de dificuldade bastante elevado. Esta aprendizagem permite-me afirmar que o futuro vai passar por um lado pelo aumento da participação de *stakeholders*, tradicionalmente considerados influências indiretas na manutenção tais como os fornecedores e também pela integração de novas tecnologias cada vez mais focadas na interligação dos equipamentos, reforçando cada vez mais a necessidade de dados consistentes e que acrescentem realmente valor.

10. Trabalho Futuro

As próximas etapas são a execução dos planos de manutenção referentes às ações de manutenção definidas no Capítulo 6, bem como a aplicação dos restantes módulos da máquina que foram considerados menos importantes, tendo em conta o horizonte temporal do estágio.

O futuro passará também pelo desenvolvimento de uma forma eficaz de classificação da importância das *spare parts* da máquina e a utilização dos modos de falha obtidos através da FMECA para agilizar e otimizar a recolha de dados das falhas do equipamento por meio do CMMS da empresa.

Para o investimento no RCM ter ainda mais vantagens, deve investir-se no cálculo da fiabilidade total do mecanismo. Esta ideia, se replicada, pelos restantes equipamentos da linha, irá permitir o cálculo da disponibilidade de trabalho da linha. Desta feita, será possível um melhor planeamento de toda a produção e permitir assim complementar a gestão das manutenções preventivas.

11.Referências

2006. "International Standard - ISO/IEC 14764 IEEE Std 14764-2006 Software Engineering ߝ Software Life Cycle Processes ߝ Maintenance." *ISO/IEC 14764:2006 (E) IEEE Std 14764-2006 Revision of IEEE Std 1219-1998*:0_1-46. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.235774.
- Bertolini, Massimo, and Maurizio Bevilacqua. 2006. "A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem." *Reliability Engineering & System Safety* 91 (7):839-848.
- Bevilacqua, Maurizio, and Marcello Braglia. 2000. "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection." *Reliability Engineering & System Safety* 70 (1):71-83.
- Bosch, Web Page. 2017. "Bosch em Portugal." accessed 17 de Abril. http://www.bosch.pt/pt/pt/our_company_10/our-company-lp.html.
- Carvalho, José Dinis. 2016. "Waste Identification Diagrams." *Revista Manutenção*.
- De Groote, Peter. 1995. "Maintenance performance analysis: a practical approach." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 1 (2):4-24.
- Dekker, Rommert. 1996. "Applications of maintenance optimization models: a review and analysis." *Reliability Engineering & System Safety* 51 (3):229-240.
- Gomes, Emanuel , Fátima Moreira, Joaquim Cavaca, and José Soares Pina. 2013. *Segurança de máquinas e equipamentos de trabalho*. edited by Autoridade para as condições no trabalho ACT.
- Kennedy, Ross. 2009. "Examining the Processes of RCM and TPM." accessed April,3. www.ctpm.org.au.
- Khanlari, Amir, Kaveh Mohammadi, and Babak Sohrabi. 2008. "Prioritizing equipments for preventive maintenance (PM) activities using fuzzy rules." *Computers & Industrial Engineering* 54 (2):169-184.
- Lehman, M. M. 1979. "On understanding laws, evolution, and conservation in the large-program life cycle." *Journal of Systems and Software* 1:213-221. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0164-1212\(79\)90022-0](http://dx.doi.org/10.1016/0164-1212(79)90022-0).
- Moubray, John. 1997. *Reliability-centered maintenance*: Industrial Press Inc.
- Muchiri, Peter, Liliane Pintelon, Ludo Gelders, and Harry Martin. 2011. "Development of maintenance function performance measurement framework and indicators." *International Journal of Production Economics* 131 (1):295-302.
- Nakajima, Seiichi. 1988. "Introduction to TPM: Total Productive Maintenance.(Translation)." *Productivity Press, Inc., 1988*:129.
- Pinto, José. 2009. *Modelo de implementação do pensamento JIT*: Publindústria.
- Rausand, Marvin. 1998. "Reliability centered maintenance." *Reliability Engineering & System Safety* 60 (2):121-132.
- Saaty, Thomas L. 1990. "How to make a decision: the analytic hierarchy process." *European journal of operational research* 48 (1):9-26.
- Siddiqui, Atiq. 2009. "Reliability centered maintenace." *University of Dammman*
- Smith, Anthony M., and Glenn R. Hinchcliffe. 2004a. "4 - RCM—A Proven Approach." In *RCM*, 57-69. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Smith, Anthony M., and Glenn R. Hinchcliffe. 2004b. "5 - RCM Methodology—The Systems Analysis Process." In *RCM*, 71-132. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Smith, Anthony M., and Glenn R. Hinchcliffe. 2004c. "8 - Implementation—Carrying RCM to the Floor." In *RCM*, 183-202. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Stadnicka, Dorota, Katarzyna Antosz, and RM Chandima Ratnayake. 2014. "Development of an empirical formula for machine classification: Prioritization of maintenance tasks." *Safety Science* 63:34-41.

- Triantaphyllou, Evangelos, Boris Kovalerchuk, Lawrence Mann, and Gerald M Knapp. 1997. "Determining the most important criteria in maintenance decision making." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 3 (1):16-28.
- Vorne. 2016. "World-Class OEE." accessed 18, June <http://www.oeo.com/world-class-oeo.html>.
- Weber, Al, and Ivara Ron Thomas. 2005. "Key performance indicators." *Measuring and Managing the Maintenance Function*, Ivara.

\

12. Anexos

Anexo A

Bosch Production System					Folha Resolução Problemas					Nº:
Definição do problema	(1)	Descrição problema:								
		MOEX				Desenho Foto: 				
		Linha								
		Produto								
		Data, hora								
		Turno								
		Operador								
		Chefe de Linha								
Análise dos factos	(2)	Descrição:		O problema é	O problema não					
		O quê é exactamente o problema?								
		Onde ocorreu exactamente o problema?								
		Quando ocorreu exactamente o problema?								
		Com que frequência ocorreu o problema?								
Contenção	(3)	Nº.	Ação de contenção (previne a continuidade do problema)	Responsável	Data, hora	Status				
		1								
		2								
		Escalonado por		Escalonado para		Date, hora				
Análise dos dados	(4)			Equipa						
				Cadaço suporte						
Acções correctivas	(5)	Nº.	Causa raiz	Ação		Responsável	Data	Status		
		1								
Standardização	(6)	Standardização		Resp.	Data	Yokoten (Transferência da informação)		Resp.	Data	
		QA-Matrix (Firewall).....								
		P-FMEA								
		Trabalho Standard.....								
		Documentos da produção.....								
		Desenhos								
	Justificação para e não alteração das dimensões				Justificação para e não realisaçao de yokoten:					
	(7)									
	(8)									
	(9)									

Anexo B

Manutenção de Software

Está familiarizado com o termo "manutenção de software?"

S

Conhece os 4 tipos de manutenção de software?

N

Manutenção Corretiva	Em primeiro lugar é necessário entender o erro que foi despoletado e se de facto corresponde a uma anomalia do software. Mediante a gravidade do erro, os responsáveis de equipa e a própria equipa são informados, de forma a ser pensada uma solução. Caso seja um erro pontual, de fácil correção, procede à implementação da solução. No momento de análise é necessário verificar as implicações do problema e se não existem outros dados/funcionalidades afetados pelo erro. No final, quando o erro for corrigido, são realizados alguns testes para verificar o correto funcionamento do sistema. O responsável pelo projeto é informado da correção do erro de forma a que a solução entre em ambiente produtivo.
Manutenção Adaptativa	No que diz respeito à manutenção adaptativa o grupo de trabalho analisa as alterações de ambiente e identifica potenciais melhorias de software. Neste caso é realizado um levantamento dos requisitos junto do cliente tendo sempre em conta os recursos disponíveis (hardware, pessoas alocadas ao projeto,...). No final é feito um <i>brainstorming</i> sobre algumas ideias a implementar. Quando ficam delineadas as funcionalidades a implementar, é efetuada uma modelação do sistema e implementadas essas funcionalidades. É sempre tido em conta o valor que estas novas funcionalidades têm para o cliente final.
Manutenção Melhoria	Quando se pretende realizar operações de melhoria no software é verificado em primeiro lugar quais são as funcionalidades mais "rudimentares" e com baixo nível de performance. Após terem sido identificadas estas oportunidades de melhoria, é realizado um <i>refactoring</i> do código de modo a tornar estas funcionalidades mais eficientes e fáceis de manter. Por vezes também é muito comum reestruturar o projeto (software) de forma a torná-lo mais escalável e fácil de manter. Por norma não tenho o hábito de melhorar código caso a performance seja aceitável. Para além disso privilegio a manutenção corretiva e preventiva em prol de melhoria do sistema uma vez que estas trazem valor para o cliente. Melhoria de código e tornar a aplicação mais escalável apenas quando necessário ou em "tempos mortos". Por fim, de forma a melhorar a manutenibilidade do software, costumo documentar o código.
Manutenção preventiva	Uma medida utilizada para a prevenção de um determinado erro no software consiste na implementação de um sistema de logs/notificações que, sempre que algum critério se afaste dentro dos limites estabelecidos, o programador/administrador de sistemas é notificado sobre uma flutuação anormal do correto funcionamento do software. Quando isto acontece, é analisada a causa e realizada a respetiva correção. No final são realizados alguns testes e colocada a correção em ambiente produtivo. Neste caso, enquanto programador, apenas procedo à correção preventiva quando o administrador de sistemas informa sobre um potencial erro verificado na sua análise dos logs.

Manutenção de Software

Está familiarizado com o termo "manutenção de software?"

SIM

Conhece os 4 tipos de manutenção de software?

NAO

Manutenção Corretiva	Correções de bugs, para permitir o correto funcionamento
Manutenção Adaptativa	Configuração e implementação dependendo de localização (traduções)
Manutenção Melhoria	Refactoring de Queries para melhorar performance (normalmente tempo de resposta)
Manutenção preventiva	N.A.

Manutenção de Software

Está familiarizado com o termo "manutenção de software?"

sim

Conhece os 4 tipos de manutenção de software?

sim

Manutenção Corretiva	Em todas as aplicações que crio existe um log de eventos para que em caso de falha seja possível num curto espaço de tempo eliminar o erro. Para um exemplo simples. Na minha aplicação delete files a partir do log de eventos consegui concluir que o tamanho de um ficheiro pode influenciar o tempo de resposta da aplicação. Para isso em vez de apagar, movo para a reciclagem e limpo a mesma por system threading task.
Manutenção Adaptativa	Em casos específicos temos que adaptar o software ao ambiente em que se encontra. No meu caso ao usar vb.net tenho que adaptar a aplicação ao sistema operativo. X64 x86 win 10 7 win2k (max framework2). Em casos em que não seja possível adaptar o SWV automaticamente é necessário criar instaladores específicos de aplicações com compilações diferentes
Manutenção Melhoria	Um desenvolvimento constante é importante. Tenho aplicações que vão na ver. 5... Numa fase inicial criamos a funcionalidade posteriormente avançamos com a parte gráfica e criamos uma app user friendly para mim uma das coisas mais importantes numa aplicação.
Manutenção preventiva	Todas as minhas apps tem log de eventos. Além disso estou a trabalhar numa aplicação que tenha contemplado um modo debug para ver em real time o processo. Sendo possível ter um modo de manutenção interno. Além disso as minhas apps tem update automatico auto kill e alertas de falha.

Manutenção de Software

Está familiarizado com o termo "manutenção de software?"

Não

Conhece os 4 tipos de manutenção de software?

Não

Manutenção Corretiva	Após feedback que alguma funcionalidade contém um erro rapidamente é criado uma tarefa no nosso gestor de tarefas com máxima prioridade para tratar do erro descrito. São feitos testes locais com dados reais (copia do sistema) de modo a encontrar a falha. assim que seja encontrada, corrigida e testada é colocado a correção assim que possível no servidor de produção.
Manutenção Adaptativa	O feedback dos colegas que usam a aplicação é contante e ajuda a constante atualização da aplicação. Quer seja por iniciativa propria ou por eu perguntar tento ao máximo compreender as necessidades e criar novas tarefas a cada semana para manter a aplicação de acordo com as necessidades correntes
Manutenção Melhoria	As versões de servidor e base de dados raramente são atualizadas devido a possíveis incompatibilidades com código (muito complexo). Já foi feito no passado algumas atualizações mas menores. Manutenção a base de dados é anual (otimização de tabelas etc), só em caso de correção de erros na aplicação é que em certas situações caso haja disponibilidade se faça refactoring ao código de modo a aumentar a rapidez da página.
Manutenção preventiva	Testes é uma fase crucial na produção de software, em todas as novas funcionalidades é feito testes, se falhar tem de ser corrigido para ser feito a atualização para produção. Não costumo aplicar aquilo que é designado por Unit Tests

Anexo C

Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling

I. S. Lopes¹, P. Senra¹, B. Neto², R. Costa², M. Sousa³, T. Cabo⁴, J.A. Oliveira¹

¹ALGORITMI Research Centre, Department of Production and Systems, University of Minho, Guimarães, Portugal

²Production Maintenance Department, Bosch Car Multimedia Portugal, Braga, Portugal

³Department of Production and Systems, University of Minho, Guimarães, Portugal

⁴Department of Mechanical Engineering, University of Porto, Porto, Portugal
(ilopes@dps.uminho.pt)

Abstract – Preventive maintenance scheduling is a complex maintenance management activity that involves the consideration of several factors: maintenance technicians' availability, available machine periods, maintenance skills required and, task duration and its set date of achievement. When resources are scarce and time to perform maintenance is limited due to high utilization of equipment, tasks are delayed in relation to the date set for achievement. In this context, maintenance tasks must be prioritized to minimize the delays of critical tasks and, consequently, the overall negative impact. Thus, tasks classification is considered the first step of maintenance scheduling. This paper presents a multi-criteria classification using a risk-based approach to prioritize preventive maintenance tasks. The developed method can be easily integrated in a computerized maintenance management system to support maintenance scheduling.

Keywords – Classification, Maintenance scheduling, Maintenance task prioritization, Risk-based maintenance.

I. INTRODUCTION

Several manufacturing companies adopt the well-known Toyota Production System, designated by Lean Manufacturing, to reduce non-added values activities, i.e., to avoid several kinds of wastes defined by this management philosophy such as: transport, inventory, motion, waiting, over-processing, overproduction and defects [1]. This approach implies a bigger impact of equipment reliability on productivity and, therefore of maintenance function inside companies since it is based on the concepts of Value Stream Flow and Pull System [2]. In this way, associated to Lean Manufacturing, increasingly companies implement the Total Productive Maintenance (TPM) methodology for maintenance management.

TPM is focused on avoiding reactive maintenance with the participation of operators in some maintenance activities such as lubrication, inspection and cleaning, which is one of the most known pillar of TPM, known as Autonomous Maintenance [3]. Another fundamental pillar of TPM is Maintenance Planning which leads companies to implement and develop maintenance standard, defining preventive maintenance tasks to be performed usually based on machine manufacturer recommendations. Due to the scarcity of resources and

also to the limited stop times of the productions lines, it is frequent to have long delays on the performing of maintenance tasks compared to their defined dates. This hinders the maintenance programmer's job that has to decide which maintenance tasks he must schedule first since the line stoppage only allows the performing of a limited number of maintenance tasks.

This paper proposes a multi-criteria approach to prioritize maintenance tasks. The methodology is focused on minimizing the delay on preventive maintenance tasks mainly to those that are considered critical. Therefore, it is based on a risk-based approach to sort the preventive maintenance tasks. This is considered the first step of the maintenance scheduling process defined for the assembly lines of a semi-conductors company. This scheduling process is intended to be automated to be integrated in the computerized maintenance management system of the company.

The remaining of the paper is organized as follows. The second section presents a literature review about classification methods in maintenance. The third section defines the criteria and sub-criteria used in the proposed classification methodology. In section four, the multi-criteria classification is explained. Section five presents an application example. Finally, section six draws the main conclusions and presents future work.

II. CLASSIFICATION METHODS FOR MAINTENANCE TASKS PRIORITIZATION: LITERATURE REVIEW

In literature, some works can be found with the main objective of prioritizing maintenance tasks or equipment.

Reference [4] proposes a method based on fuzzy rules to classify equipment for preventive tasks prioritization in a context of scarce resources. Six criteria are defined for the classification: Sensitivity of Operation (degree of critically of equipment operation), Mean Time between Failures (MTBF), Mean Time to Repair (MTTR), Availability of Required parts, Availability of Repair Personnel and Work Load. Since this method considers MTBF and MTTR, it does not suppose a previous determination of preventive maintenance tasks frequencies or intervals. Furthermore, it prioritizes equipment according to the mean time between requesting and receiving the needed spare parts of the given equipment. This approach does not consider the different

preventive maintenance tasks of a given machine that can have different periodicity, leading often to group some tasks to be scheduled at the same time interval.

Reference [5] also proposes a machine classification for prioritizing maintenance tasks. The authors emphasize that the basis for any maintenance planning is to carry out machine classification and/or criticality analysis. Therefore, based on three models used in three different companies, they define a machine classification method based on a formula that considers the following parameters: actual machine working time (in relation to available machine working time), number of machine failures in a predetermined period of time, breakdown time in a predetermined period of time, Machine changeability, stability of the machine (i.e. provide uniform process quality), influence on safety and environment. To each parameter a weight, defined by the company, is assigned to obtain a final score through which the tasks will be sorted. In this work, such as in [4], the classification is defined for equipment and not for maintenance tasks. Three of the considered factors in both works can be considered the same (MTBF, MTTR, Work Load). Machine changeability is a new factor compared to [4]. “Stability of the machine” and “Influence on safety and environment” in [5] can be considered similar to “Sensitivity of operation in [4].

Ratnayake and Antosz [6] states that risk-based maintenance helps to deal with unexpected failures, loss of production and high maintenance costs which are the major problems of manufacturing systems. The authors proposed a risk-based classification that uses fuzzy logic to minimize suboptimal calculations in the classification process. The developed method aims to classify equipment in order to define the more adequate maintenance strategy. Equipment are classified in six levels of priority based on four factors: personal safety, percentage of non-conforming products, time of failure elimination and machinery failure frequency.

According to Arunraj and Maiti [7], risk-based maintenance studies failures modes and respective risk associated with their occurrence, in order to develop a maintenance strategy that minimizes the occurrence of high-risk failures modes.

According to [8], maintenance task prioritization is crucial to reduce unnecessary or improper maintenance tasks, mainly when maintenance resources are not able to deal with all work orders. Prioritization allows utilizing maintenance resources more efficiently and minimizing the total cost of system operation. Therefore, [8] presents a decision support system for task prioritization based on bottleneck detection and identification of maintenance opportunity window. The priorities are given to throughput-critical stations or machines, i.e., bottleneck, that are identified by online measurable data.

III. THE SORTING CRITERIA

In a manufacturing process oriented by the Lean Manufacturing philosophy, all equipment have high

priority and also high utilization rate and, bottleneck are removed by production line balancing. Thus, the failure of an equipment stops the line or reduces productivity (in case of parallel machines). Therefore, all the machines should have a maintenance plan.

The classification that is proposed in this paper supposes that the maintenance intervals are previously defined for each tasks and due to the scarce human resources and limited time to perform maintenance (high utilization of machines), a priority must be assigned to tasks in order to perform firstly the more critical tasks, avoiding delays in the tasks that can have a more harmful impact. Therefore, the developed multi-criteria method follows a risk-based approach.

Considering what have been mentioned, the following criteria have been defined:

- Delay: is defined as a percentage of the delay in relation to the maintenance interval. The delay of the tasks is considered as sorting criteria, since the ideal condition of scheduling is to perform all the tasks in the setting dates.
- Business Impact Rating (BIR): This criterion intends to classify the importance of the machine with respect to the current productivity of the production lines.
- Criticality of the maintenance action: the criticality is determined for the maintenance action and not for the equipment since in an equipment, some of the tasks can be critical, having for instance impact on safety or quality, and other can have no significant impact.

The levels of each criteria are defined in the following subsections.

A. Delay (D)

The delay criterion will be calculated based on expression (1). This criterion is defined as a percentage since the impact of a delay depends on the periodicity of the maintenance action. For example, a 3-day delay has a minor impact on a maintenance task with a 30-day maintenance interval than a maintenance task with a 5-day interval. The use of a percentage allows comparing the delay of maintenance tasks with significant difference in maintenance interval.

$$Delay = (Current\ Date - Due\ Date) / Periodicity \quad (1)$$

TABLE I
DELAYS LEVELS

Level	Delay
1	$-100\% \leq D < 0\%$
2	$0\% \leq D < P25$
3	$P25 \leq D < P50$
4	$P50 \leq D < P75$
5	$D \geq P75$

The expression (1) is used to calculate the criterion value to each maintenance action available in the planned maintenance list. With all this values, a computerized maintenance management system will calculate the percentile 25, 50 and 75 of the sample (list values) in order

to group each maintenance action in one of the 5 levels, as shown in Table I. This process will be daily updated. This way, the process will be more dynamic and changeable.

B. Business Impact Rating (BIR)

The BIR criterion is composed of two sub-criteria and intends to classify the importance of the machine to guarantee the current production rate of the production lines. These sub-criteria were defined taking into account the impact of the breakdown of the equipment on productivity. The sub-criteria are as follows:

- C_A – Operating hours of the machine: this sub-criterion reflects the occupation rate of the production line to which the machine belongs. A line with a high solicitation is considered critical, once its availability for maintenance activities is reduced and the possibility to recover from possible delays is low.

- C_B - Availability of alternative machines: this sub-criterion is intended to represent the possible existence of one or more machines in the production line with the same functionality, avoiding the complete stoppage of the line when breakdown occurs.

Table II shows the levels defined for both sub-criteria in the company under study.

TABLE II
SUB-CRITERIA LEVELS

Level	Operating hours	Availability of alternative machines
1	≤ 84 h a week	At least one alternative machine
2	$84\text{h} < \text{operating hours} \leq 126\text{h}$ a week	No alternative machine
3	$> 126\text{h}$ a week	

The combination of both criteria was analyzed and to each combination one of four levels was assigned. A higher level is assigned to a machine with a high occupancy rate whose failure will lead to a greater loss of productivity. The levels of the criterion are shown in Table III.

TABLE III
BUSINESS IMPACT RATING LEVEL

Operating hours	Availability of alternative machine	BIR
3	2	4
3	1	3
2	2	3
2	1	2
1	2	2
1	1	1

C. Criticality (C)

The objective of this criterion is to prioritize preventive maintenance actions based on the impact of the failure, associated with the maintenance task, on the performance of the equipment and on the safety of the operators. It is composed of the following sub-criteria and respective

levels (L): Safety (S), Quality (Q), Downtime (D), and Resolution Time (T) presented in Table IV.

To obtain the final classification for the criticality criterion, Proportional Hazard Modeling is used. The weight of each sub-criterion of criticality, which affects the ordering of tasks, is defined through peer-to-peer comparisons that consider Saaty's relative importance scale presented in Table V [9].

TABLE IV
SUB-CRITERIA LEVELS

L	Safety	Quality	Downtime	Resolution Time
1	Without Risk	Does not affect the quality	Without downtime	Immediate resolution
2		False rejection	Slight slowdown	Rapid resolution (< 15 min)
3	With risk (electrical maintenance)	Damage with repair	Intermittent movement	Long resolution ($15 < t < 45$ min)
4		Damage without repair	Gradual stop	Time-consuming and complex resolution ($45 < t < 120$ min)
5	Accident risk (security system)	Undetectable damage	Instant stop	Time-consuming, complex resolution with more than one technician ($t > 120$ min)

TABLE V
SCALE OF RELATIVE IMPORTANCE [9]

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Weak importance of one over another	Experience and judgment slightly favor one activity over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
7	Demonstrated importance	An activity is strongly favored and its dominance demonstrated in practice
9	Absolute importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between the two adjacent judgments	When compromise is needed
Reciprocals of above nonzero	If activity i has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with activity j, the j has the reciprocal value when compared with i	

With the participation of the company, the sub-criteria were compared. The result of this comparison is presented in table VI.

TABLE VI
COMPARISON OF CRITICALITY SUB-CRITERIA

	Quality	Safety	Downtime	Resolution time
Quality	1	0.2	3	3
Safety	5	1	7	7
Stoppage	1/3	1/7	1	3
Resolution time	1/3	1/7	1/3	1
Σ	6.667	1.486	11.333	14

Dividing each element of Matrix A (matrix of comparisons) by the corresponding sum of the respective column and calculating the arithmetic average of each row, Matrix B - the priority vector (2), is obtained.

$$B = \begin{bmatrix} 0.182 \\ 0.645 \\ 0.092 \\ 0.061 \end{bmatrix} \quad (2)$$

The consistency of the subjective judgments that took place during the construction of the matrix is determined by multiplying the matrix of comparisons (Matrix A) by the vector itself (2), obtaining a vector of weighted sums (3). By dividing each element of vector C by its corresponding element into vector B, a new vector D - vector of consistency (4), is obtained.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0.2 & 3 & 3 \\ 5 & 1 & 7 & 7 \\ 0.333 & 0.140 & 1 & 3 \\ 0.333 & 0.140 & 0.333 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.182 \\ 0.645 \\ 0.092 \\ 0.061 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.770 \\ 2.626 \\ 0.428 \\ 0.244 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.770 \\ 0.182 \\ 2.630 \\ 0.645 \\ 0.427 \\ 0.092 \\ 0.244 \\ 0.061 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.231 \\ 4.071 \\ 4.652 \\ 4.000 \end{bmatrix} \quad (4)$$

In AHP it is considered that the peer-to-peer comparisons are adequately consistent when the Consistency Ratio (CR) is less than 10%. In order to calculate the consistency ratio it is necessary to estimate the Consistency Index (CI) through expression (5).

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \quad (5)$$

In expression (5), n is the number of criteria and $\lambda_{\max}$ is obtained by the arithmetic average of the elements of vector D, giving in this case a value of 4.239. Thus, CI gives a value of 0.0797. The consistency ratio is obtained by dividing the consistency index by the Random Consistency Index (RCI) in table VII, which gives 8.85%.

TABLE VII
RCI FOR DIFFERENT VALUE OF n

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RCI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

The values obtained by the peer-to-peer comparison to obtain the own vector are only considered consistent if

the RC is less than 10%. As the RC obtained is 8.85%, the values obtained are consistent.

To facilitate the definition and assignment of the criticality value to the maintenance tasks carried out in the company, 11 groups of maintenance tasks were defined, which encompass the majority of the maintenance actions carried out. These groups with their respective values of sub-criteria and final value of the Criticality criterion are presented in Table VIII.

TABLE VIII
MAINTENANCE ACTIONS GROUP

Maintenance group	Q	S	D	T	Weighted average
Tool Lubrification	1	1	3	2	1,23
Lubrification of machine parts	1	3	3	3	2,58
Checking parts in direct contact with the product	3	1	3	2	1,59
Checking parts without direct contact with the product	1	1	2	2	1,13
Tool cleaning	3	1	2	2	1,50
Machine cleaning	1	1	1	2	1,04
Customer or Legal Calibration / Verification	3	1	4	3	1,74
Replacement of parts with direct influence on quality	4	1	4	3	1,92
Replacement of parts without direct influence on quality	3	1	3	2	1,59
Replacement of electrical components	2	1	5	3	1,65
Verification of security systems	1	5	5	3	4,05
Electrical maintenance	1	3	5	2	2,70

For the assignment of a final level, the weighted average of sub-criteria is calculated. Criticality is divided into 5 levels, considering the weighted average (M) obtained, as shown in Table IX.

TABLE IX
CRITICALITY LEVELS

Level	Weighted average
5	$M > 3$
4	$2,5 < M < 3$
3	$1,5 \leq M \leq 2,5$
2	$1,2 < M < 1,5$
1	$M \leq 1,2$

IV. THE MULTI-CRITERIA CLASSIFICATION

The weight of each criterion to perform the ordering of tasks was also defined by the peer-to-peer comparison method and the result is presented in Table X.

TABLE X
COMPARISON OF ORDERING CRITERIA

Criterion	Delay	BIR	Criticality
Delay	1	3	2
BIR	1/3	1	1/2
Criticality	1/2	2	1
Σ	1.833	6	3.5

Considering that the primary objective is to minimize delays, the Delay criterion was considered slightly more important than the remaining two criteria. In this way it was possible to obtain the vector of priority (6) through the same method explained in III.C.

$$B = \begin{bmatrix} 0.539 \\ 0.164 \\ 0.297 \end{bmatrix} \quad (6)$$

According to the priority vector, the Delay criterion obtained a significantly higher weight than the other criteria, followed by criticality and BIR.

Then, the consistency study of the values obtained was carried out. Following the same method previously applied, $\lambda_{\max} = 3.009$, $CI = 0.0046$ and $RCI = 0.008$. The obtained RCI is less than 10%, thus, the elements of the priority vector are consistent values.

V. AN APPLICATION EXAMPLE

The present application example uses some real company information such as the maintenance action designation, its duration and associated machine / tool / line. The remaining data presented in Table XI were randomly assigned, since they are not yet applied in the company. The application example consists of a small instance of 12 tasks that are carried out in the company and that are randomly classified according to the ordering criteria (BIR, Delay (D) and Criticality (C)) to obtain the ordering factor, using the Proportional Hazard Modeling method. The result is shown in Table XI.

TABLE XI
LIST OF MAINTENANCE TASKS CLASSIFIED

	Equipment	BIR	Maintenance task	C	D	Output
t ₁	GP01	4	Replacing the Stator and Rotor of the Dispensing Pump	3	2	2.621
t ₂	VT17	4	Cleaning the flow tank	2	2	2.324
t ₃	GP01	4	Curtains replacement of in EPM's	3	3	3.16
t ₄	VT17	4	Check flow quantity	1	2	2.027
t ₅	VT17	4	Machine Check	1	2	2.027
t ₆	ASY10	3	Replacing Vacuum Pumps (suction cups)	3	3	3
t ₇	FCT50	2	Replace interface needles	3	3	2.834
t ₈	FCT50	2	Internal cleanliness	2	1	1.459
t ₉	BUR50	1	Maintenance level 1 aparaf. Guides and suction cups (ASI)	1	3	2.077
t ₁₀	BUR50	1	O-ring replacement	3	2	2.132
t ₁₁	BUR50	1	Preventive Maintenance PC - Cooler and Mass	3	1	1.593
t ₁₂	BUR50	1	Cleaning the oven glasses	2	3	2.374

VI. CONCLUSION

This paper presents a method for preventive maintenance

tasks classification and prioritization. This method is based on three main criteria: Delay of the task, Business Impact Rating of the equipment and criticality of the tasks. The method is based on risk and reflects the importance of the target manufacturing equipment for keeping the actual productivity. Besides, it considers the criticality of the maintenance tasks considering the effect of the failure in term of quality, safety, downtime and resolution time.

The proposed method will be integrated in a computerized maintenance management system to support maintenance scheduling.

ACKNOWLEDGMENT

This research is sponsored by the Portugal Incentive System for Research and Technological Development. Project in co-promotion n° 002814/2015 (iFACTORY 2015-2018) and has been partially supported by COMPETE: POCI-01- 0145-FEDER-007043 and FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia within the Project Scope: UID/CEC/00319/2013.

REFERENCES

- [1] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation*. New York: Simon and Schuster, 1996.
- [2] A. H. C. Tsang, "Strategic dimensions of maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 8, no. 1, pp.7-39, 2002.
- [3] S. Nakajima, *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*. Portland, OR: Productivity Press, 1988.
- [4] A. Khanlari, K. Mohammadi and B. Sohrabi, "Prioritizing equipments for preventive maintenance (PM) activities using fuzzy rules", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 54, pp.169-184, 2008.
- [5] D. Stadnicka, K. Antosz and R. M. Chandima Ratnayake, "Development of an empirical formula for machine classification: Prioritization of maintenance tasks", *Safety Science*, vol. 63, pp. 34–41, 2014.
- [6] R. M. Ratnayake and K. Antosz, "Development of a risk matrix and extending the Risk-based Maintenance analysis with Fuzzy Logic", *Procedia Engineering*, vol. 182, pp. 602-610, 2017.
- [7] N. S. Arunraj and J. Maiti, "Risk-based maintenance-techniques and applications", *Journal of hazardous Materials*, vol. 142, pp. 653-661, 2007.
- [8] L. Li and J. Ni, "Short-term decision support system for maintenance task prioritization", *International Journal of Production Economics*, vol. 121, pp. 195-202, 2009.
- [9] S. T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1980.