



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica



Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a uma Varredoura Urbana Compacta

VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO

(Licenciado em Ciências de Engenharia - Engenharia Eletrotécnica e de Computadores)

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

Orientador:

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais: Prof. Mestre António Afonso Roque

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Outubro de 2018



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica

Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a uma Varredoura Urbana Compacta

VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO

(Licenciado em Ciências de Engenharia - Engenharia Eletrotécnica e de Computadores)

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

Orientador:

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais: Prof. Mestre António Afonso Roque

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Outubro de 2018

Agradecimentos

A realização deste trabalho apenas foi possível, graças ao apoio e colaboração de algumas pessoas, às quais gostaria de manifestar a minha gratidão, consciente de que sem elas, esta caminhada teria sido muito mais difícil.

Agradeço em primeiro lugar e de forma muito especial à minha família pelo apoio, dedicação, paciência e conforto, demonstrados ao longo deste tempo de formação.

Quero agradecer também de forma igualmente especial ao meu orientador, Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral, pela disponibilidade no desenvolvimento desta Tese, pois as suas opiniões, sugestões e críticas em todas as fases da sua elaboração foram essenciais.

Finalmente, um agradecimento aos meus/minhas amigos/as e colegas que me acompanharam nesta caminhada.

Obrigado a todos vós!

Resumo

Este trabalho final de mestrado aborda a elaboração de uma Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA, *Failure Mode and Effects Analysis*) de uma Varredoura mecânica compacta, modelo RAVO 540 do Grupo Fayat, usada num Município destinada ao serviço de limpeza urbana e arruamentos.

Tem como objetivo desenvolver um estudo de prevenção de falhas, de modo a elevar a fiabilidade do produto aplicando medidas de manutenção preventiva mais adequadas e nas situações de falhas repetitivas, de manutenção melhorativa (prevendo melhorias no equipamento ou mudanças de funcionalidades).

A FMEA incide na análise de sistemas e componentes da Varredoura compacta, tratando-se de uma Design FMEA (DFMEA ou FMEA de Produto/Projeto). Este trabalho implicou uma avaliação de riscos aos vários modos de falha da Varredoura e a criação de um *ranking* para identificação dos itens com maior risco de falha, de acordo com o número prioritário de risco, tendo em conta a ocorrência, detetabilidade e severidade do modo de falha. Foram depois recomendadas ações para diminuir o grau de risco dos modos de falha (número prioritário de risco) e feita uma nova ordenação dos modos de falha com maior número prioritário de risco (tendo em conta que as recomendações foram aplicadas).

Foi assim possível medir/avaliar o risco dos modos de falha dos itens da Varredoura, priorizá-los e fazer as recomendações mais adequadas de modo a diminuir o número prioritário de risco.

Palavras chave: *FMEA, DFMEA, Análise Modal de Falhas, Número Prioritário de Risco, Varredoura, Manutenção.*

Abstract

This Master Thesis approach the failures and its effects, using the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) method in an urban Sweeper, model RAVO 540 from Fayat Group, used to clean the streets of a parish.

The goal of this work is to develop a failure prevention study, increasing the product (the Sweeper) reliability, by applying optimizations in the current maintenance program and proposing design/functionality updates to the product.

The FMEA approaches the systems and items of the urban Sweeper, classifying the FMEA as a Design FMEA (DFMEA or Product/Project FMEA). In this Master Thesis there was a risk evaluation to the several failure modes and a ranking was performed to identify the items with major failure risk, according with the risk priority number and its occurrence, detectability and severity. Recommendations were made to decrease the failure modes with higher risk priority number and a new ranking was performed, considering these new recommendations.

It was possible to measure/evaluate the failure mode risk of the Sweeper items, prioritize them and perform recommendations in order to decrease the risk priority number.

Keywords: *FMEA, DFMEA, Failure Mode Analysis, Risk Priority Number, Sweeper, Maintenance.*

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivo do trabalho	2
1.3	Estrutura do trabalho.....	3
2	A Metodologia FMEA	4
2.1	A Origem da FMEA	4
2.2	Tipos de FMEA	6
2.3	FMEA vs. FMECA	8
2.4	Aplicações da FMEA e Estado da Arte	11
2.5	Preparação da FMEA.....	14
2.6	Desenvolvimento da FMEA	15
2.7	Vantagens e Limitações	25
3	Varredoura Compacta Urbana.....	28
3.1	O modelo Ravo 540 STH.....	28
3.2	Funcionamento da Varredoura.....	32
3.3	Localização de Componentes da Varredoura	34
3.4	Sistemas da Varredoura	39
4	Caso de Estudo	47
4.1	Critério de aceitação	47
4.2	Análise macro	48
4.3	Análise detalhada.....	49
4.4	Ações recomendadas.....	52
5	Conclusões	58
	Referências bibliográficas	60
	Anexo I - Histórico de Manutenção da Varredoura	65
	Anexo II - FMEA da Varredoura	67

Índice de figuras

Figura 1: Elementos presentes numa FMEA (Adaptado (Sobral & Abreu ,2013))	8
Figura 2: <i>Papers/Patents</i> Distribuição no tempo (Adaptado (Spreafico et al., 2017)) ..	11
Figura 3: Exemplo de um diagrama de blocos usado numa DFMEA (Adaptado (Moura, 2000))	16
Figura 4: Fluxograma de análise FMEA (Adaptado (Pedrosa, 2014)).....	17
Figura 5: Operação da Varredoura (Ravo, 2015)	32
Figura 6: Manual de manutenção da Varredoura – Lubrificação (* PTFE <i>grease</i> , **NLGI <i>grade 2 grease</i>) (Ravo, 2015)	34
Figura 7: Localização de componentes na Cabine da Varredoura (Ravo, 2015)	35
Figura 8: Localização dos componentes no exterior da Varredoura (Ravo, 2015)	35
Figura 9: Localização dos componentes debaixo do contentor da Varredoura (Ravo, 2015).....	36
Figura 10: Localização de componentes na porta de serviço da Varredoura (Ravo, 2015)	36
Figura 11: Tubo de aspiração da Varredoura (Ravo, 2015)	37
Figura 12: Baterias da Varredoura (Ravo, 2015)	37
Figura 13: Porta de serviço, bomba de alta pressão da Varredoura (Ravo, 2015)	38
Figura 14: Terminal positivo das baterias da Varredoura (Ravo, 2015)	38
Figura 15: Números de identificação da Varredoura (Ravo, 2015)	39
Figura 16: Iveco Tier 3 / Stage III engine N45 ENT (Ravo, 2011).....	41
Figura 17: Linde Hydrostatic Drive. *not required on 2 to 3.5 t models (Linde, 2014) 42	
Figura 18: Funcionamento da tração hidrostática (Linde, 2014)	43
Figura 19: <i>Hydraulic Manifold</i> (Compensador +- 10 Bar). Válvulas para controlar os sistemas hidráulicos (Ravo, 2013).....	44
Figura 20: Montagem da Ventoinha de Sucção (Ravo, 2013)	45
Figura 21: Tubo de aspiração de folhas na porta do contentor.....	46
Figura 22: Critério de aceitação do risco.....	48
Figura 23: Dispersão da quantidade de modos de falha pelos critérios.....	49

Índice de tabelas

Tabela 1: Tabela de Severidade DFMEA (Moura, 2000)	20
Tabela 2: Tabela de Severidade PFMEA (Moura, 2000)	20
Tabela 3: Ocorrência (O) DFMEA (Moura, 2000).....	22
Tabela 4: Ocorrência (O) PFMEA (Moura, 2000)	22
Tabela 5: Tabela de índice de detecção (Moura, 2000)	23
Tabela 6: Detalhes Técnicos Gerais da RAVO 5-Series 540 STH (Adaptado de Adeco, 2015 e Ravo, 2015).....	29
Tabela 7: Detalhes Técnicos RAVO 5-Series: Sistemas hidráulicos (Escovas e Reservatório Basculante (Ravo, 2015)).....	31
Tabela 8: manual de manutenção da Varredoura – Lubrificação (Ravo, 2015).....	33
Tabela 9: Resumo dos modos de falha com classificação “Inaceitável”	50
Tabela 10: Valorização dos fatores FMEA com RPN individuais.....	51
Tabela 11: Valorização dos fatores da FMEA com RPN _R individuais “Aceitável com Reservas” (tabela parcial).....	57

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABS(a)	Anti-Lock Brakes System
ABS(b)	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AC	Ar Condicionado
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIAG	Automotive Industry Action Group
APQP	Advanced Product Quality Planning
BITE	Built-In Test Equipment
DFMEA	Design FMEA
DVP&R	Design Verification Plan & Report
FDA	Food and Drug Administration
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
FWRPN	Fuzzy Weighted Risk Priority Number
GMP	Good Manufacturing Practices
HAZOP	Hazard and Operability
IATF	International Automotive Task Force
ISO	International Organization for Standardization
MSG-3	Maintenance Steering Group-3
MULTIMOORA	Multiple Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NLGI	National Lubricating Grease Institute
NPR	Número de Prioridade de Risco
OEM	Original Equipment Manufacturer
PFMEA	Process FMEA
PRA	Probabilistic Risk Assessment
PSM	Process Safety Management Act
PTFE	Polytetrafluoroethylene
QFD	Quality Function Deployment
RBD	Reliability Block Diagram
RCM	Reliability Centered Maintenance

RPN	Risk Priority Number
RPN _R	Reviewed Risk Priority Number
SAE	Society of Automotive Engineers
STH	Standard Tipping High

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente a manutenção assume um papel decisivo na definição da estratégia de uma organização. De acordo com a norma NP EN 13306 (IPQ, 2007) a manutenção é a *“combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que ele possa desempenhar a função requerida”*.

A manutenção desempenha um papel fundamental na fiabilidade, disponibilidade, qualidade dos produtos e serviços, redução de risco de funcionamento (segurança, ambiente e operação), aumentando assim a rentabilidade económica e o respetivo ciclo de vida.

O presente trabalho aborda a responsabilidade de um município em assegurar o sucesso da operacionalidade do material circulante, neste caso aplicado a uma Varredoura compacta urbana. Inserida na vertente da manutenção planeada, a manutenção preventiva engloba a supervisão de todos os bens constituintes do material circulante, de forma a garantir tanto a segurança de circulação deste, quanto os padrões de qualidade exigidos para efetuar a tarefa de limpeza das estradas. Porém, as consequências de uma política de manutenção ineficiente vão muito além dos custos diretos de manutenção (Pariazar et al., 2008).

O processo de seleção de uma política de manutenção depende dos custos de manutenção, juntamente com outros critérios como (Pariazar et al., 2008):

- Qualidade do produto/serviço adicionado;
- Disponibilidade de peças de reposição;
- Tempo de manutenção disponível;
- Satisfação do cliente;
- Risco associado;
- Uso e desgaste dos equipamentos;
- Efeitos ambientais;
- Custos de pessoal;
- Fiabilidade.

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

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

A metodologia FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) veio dar o suporte necessário na política de manutenção, ao avaliar e minimizar os riscos de um produto (ou serviço), com o recurso à análise das possíveis falhas dos sistemas, (determinação da causa, o respetivo efeito/risco para cada falha) e implementação de ações corretivas para melhorar a fiabilidade e qualidade do produto.

A metodologia FMEA é aplicada onde se pretende diminuir o grau de severidade e a probabilidade de ocorrência de falhas em projetos de novos produtos e processos, bem como, em produtos e processos já em operação.

1.2 Objetivo do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia de análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA) a partir da análise de sistemas e subsistemas e respetivos componentes, de uma Varredoura urbana compacta modelo RAVO 540 STH produzida pelo grupo Fayat e comercializada em Portugal pela Certoma (Comércio Técnico de Máquinas, LDA.).

Os objetivos específicos do presente trabalho são os seguintes:

- Dividir a Varredoura Ravo 540 STH em sistemas e subsistemas.
- Determinar os modos de falhas mais críticos e mais frequentes nos sistemas principais da Varredoura Ravo 540 STH.

- Analisar os modos de falha e seus efeitos nos sistemas principais da Varredoura Ravo 540 STH.

A escolha deste equipamento deve-se à quantidade de sistemas da Varredoura, ao facto de operar seis dias por semana durante o ano inteiro (mais propicio a falhas) e acesso ao respetivo histórico de manutenção.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco Capítulos. No Capítulo 1 faz-se um enquadramento do tema e do âmbito do trabalho realizado, assim como se apresentam os objectivos e a estrutura do documento. No Capítulo 2 é apresentada e detalhada a metodologia FMEA, uma vez que esta será aplicada no caso de estudo desenvolvido. Serão descritos os princípios e os vários tipos de FMEA normalmente assumidos por vários autores e apresentado o estado da arte relativamente à aplicação da metodologia a uma diversidade de situações. No Capítulo 3 será apresentado com detalhe o activo físico alvo de estudo, uma Varredoura compacta urbana, normalmente ao serviço de autarquias locais. O Capítulo 4 serve para demonstrar a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 2 ao equipamento apresentado no Capítulo 3, sendo este o foco do desenvolvimento autónomo deste trabalho. Finalmente, no Capítulo 5 serão apresentadas algumas conclusões e possíveis trabalhos futuros, que possam se seguir na sequência do trabalho agora realizado.

2 A Metodologia FMEA

2.1 A Origem da FMEA

A primeira referência da metodologia FMEA surgiu na indústria militar Norte Americana em 1949, no entanto metodologias relacionadas com sistemas de qualidade já eram utilizadas nos projetos e processos de produção, nos Estados Unidos, Japão, Inglaterra, etc.

Essa primeira referência surge documentada em novembro de 1949 quando o exército Norte Americano concluiu o procedimento militar US MIL-P-1629 com o nome *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, (Procedimentos para Realização de Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade). Este método era utilizado na procura dos efeitos de falhas de sistemas e equipamentos e classificação de acordo com o impacto sobre o sucesso da missão e condições de segurança referentes ao pessoal e equipamentos (Smith, 2014).

Durante a década de 60 este procedimento foi desenvolvido e utilizado na indústria aeroespacial NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no programa Apollo de modo a identificar de uma forma sistemática, potenciais falhas em sistemas, processos ou serviços, identificar os seus efeitos, as suas causas e consequentemente definir ações para reduzir ou eliminar o risco associado a essas falhas. Os requisitos exigentes da NASA permitiam evitar falhas em equipamentos que ficariam impossibilitados de ser reparados após descolagem e garantiam a segurança da tripulação.

Em novembro de 1974 a metodologia FMEA passa a ser norma quando a marinha Norte-Americana substitui o procedimento MIL-P-1629 pela norma militar MIL-STD-1629A (USA Department of Defense, 1980).

A norma militar foi aplicada de forma comercial na indústria automóvel na década de 70, pela Ford Motor Company depois do caso Ford Pinto, um modelo automóvel que sofreu inúmeros *recalls* devido a graves falhas de conceção (problemas estruturais, sistema de combustível, problema no acelerador) e vários processos na justiça. Após adotar a metodologia FMEA, a Ford ultrapassou os problemas de fiabilidade e imagem perante o cliente final.

A norma é depois integrada pela IATF (*International Automotive Task Force*) como requisito obrigatório dos sistemas QS9000, criada em conjunto pelos três grandes da indústria automóvel Americana, a General Motors, Chrysler e Ford em 1994, de modo a definir critérios de inspeção mais rigorosos e uma mentalidade de controlo de qualidade preventivo, normalizando os sistemas de qualidade dos fornecedores. Ou seja, aplicar uma FMEA de processo e de produto e também de desenvolvimento de planos de controlo.

Anteriormente, em 1988 a ISO (*International Organization for Standardization*), desenvolveu a norma ISO9000, que recomenda a implementação de sistemas de qualidade em empresas assentes num método de cariz preventivo, focando a melhoria dos seus processos e produtos como constante objetivo a cumprir. Esta norma é aplicada noutras indústrias, como por exemplo a eletrónica, sendo a norma QS9000 específica para a Indústria Automóvel desenvolvida à posteriori.

Em 1993, o AIAG (*Automotive Industry Action Group*) publicou uma norma sobre a FMEA para Indústria Automóvel (Wikipedia, 2014).

Em 1994, a SAE (*Society of Automotive Engineers*) publica a norma J1739, designada por “*Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA)*” (Wikipedia, 2014).

Em 14 de Dezembro de 2006 as certificações QS9000 foram substituídas pela norma *Technical Standard ISO/TS16949:2002* (ISO, 2002). Em 2016 a IATF publicou a norma IATF 16949:2016 (IATF, 2016) que substituiu a norma ISO/TS 16949:2009 (ISO, 2009).

A metodologia FMEA foi criada centrada no projeto de novos produtos e processos, mas devido à sua grande utilidade passou a ser aplicada de diferentes formas e em diferentes tipos de organizações. A construção de uma FMEA deverá ser efetuada por uma equipa multidisciplinar, cujas ideias e criatividade são imprescindíveis para o sucesso na sua aplicação. A FMEA é atualmente utilizada nos mais diversos locais, desde indústrias do ramo automóvel até à indústria farmacêutica, até em hospitais (Ramos, 2006).

Baseado no anteriormente exposto, conclui-se que é essencial aplicar esta metodologia para evoluir continuamente, assegurando a fiabilidade do produto final e a sua qualidade de modo a reduzir riscos para os consumidores e utilizadores. Esta metodologia pode ter impacto positivo no retorno financeiro das organizações, evitando por exemplo os *recalls* no caso da indústria automóvel, que afetam a imagem e saúde financeira de qualquer fabricante.

2.2 Tipos de FMEA

Em relação aos tipos ou classes de FMEA, não há uma classificação que se possa considerar unânime. Existem várias correntes, como por exemplo uma que defende a existência de vários tipos de FMEA, como FMEA de Sistema, FMEA de Produto, FMEA de Processo e FMEA de Serviço (Stamatis, 2003), outra apenas refere a FMEA de Produto, FMEA de Processo e FMEA de Serviço, e ainda outra que apenas distingue FMEA de Produto e FMEA de Processo.

A FMEA de Produto também é conhecida como FMEA de Projeto (estudo das falhas que poderão ocorrer com o produto dentro das especificações do projeto).

Do ponto de vista de Stamatis (2003), a FMEA, de um modo geral, seja ela de qualquer tipo, fornece um método sistemático de examinar todas as formas possíveis pelas quais a falha pode ocorrer. A cada falha está associada uma avaliação, baseada numa estimativa para os seus efeitos no sistema total, quer se trate de um bem, um processo ou um serviço.

A função de localizar riscos, encontrar as suas probabilidades e estimar as consequências para no final se tomarem as precauções necessárias com o devido peso, são características comuns aos três tipos de FMEA que se seguem.

- FMEA de Sistema: o sistema é um conjunto organizado de peças ou subsistemas para desempenhar uma determinada função. A FMEA de Sistema é realizada na fase de conceção, antes do processo de desenvolvimento e analisa a correta interação de múltiplos sistemas e interação dos componentes de cada sistema. A análise tem como objetivo identificar os potenciais modos de falha do sistema em relação às suas

funcionalidades e do ponto de vista da expectativa do cliente. Está ligada à percepção do cliente final em relação ao sistema.

- FMEA de Produto ou Projeto (*DFMEA Design FMEA*): examina as especificações do projeto e características do produto antes de ser enviado para a produção. Durante a produção o produto deverá ser continuamente analisado (exemplo: queixa sistemática de vários clientes durante o uso de um produto devido a defeito num componente) estabelecendo prioridades para as ações de melhoria ou alterações no projeto do produto. A deteção de deficiências no projeto, escolhas de material incorreta e especificações inadequadas que possam resultar num ciclo de vida útil curto se acontecer na fase de conceção tem um custo inferior do que se essa deteção acontecer na fase de produção e comercialização (existem inúmeros exemplos na industria automóvel onde a deteção de uma falha aconteceu já na fase de produção e comercialização).

Segundo Stamatis (2003), existe uma maior economia nos custos e tempo de desenvolvimento quando a FMEA é realizada na fase de conceção e que a aplicação desta, ajuda na identificação e respetiva solução de problemas, mantém o conhecimento do produto e do processo na organização sendo uma mais valia para possível identificação de falhas. Este tipo de FMEA, esclarece a necessidade de alterações no projeto do produto, estabelece prioridades para ações de melhoria, auxilia na definição de testes e validação de produto, proporciona uma forma de documentação aberta para recomendar e rastrear ações de redução de risco e proporciona referências para no futuro ou num novo protótipo haver uma melhoria significativa em relação ao produto atual. Este método pode ser aplicado em qualquer etapa do projeto (nos respetivos sistemas, subsistemas ou componentes) ou inclusivamente ser utilizado em produtos já em produção, como é o caso deste trabalho de mestrado.

- FMEA de Processo (*PFMEA Process FMEA*): usado para analisar processos já desenvolvidos, em funcionamento, ou em projeto. Foca-se nas potenciais falhas associadas à segurança, eficácia, eficiência e às funções do produto causadas por problemas do processo, seja fabrico ou

montagem. Ou seja, analisa modos de falha durante a montagem e excessivas variações do processo de fabrico. Está ligada à capacidade do processo em cumprir margens ou parâmetros de montagem do produto. Todos os passos do planeamento do processo e operações aplicados nos produtos até à entrega ao cliente final são analisados com a FMEA de Processo.

2.3 FMEA vs. FMECA

A FMEA e a FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) são técnicas que utilizam a mesma metodologia, um método analítico indutivo essencialmente preventivo, para identificar e prevenir falhas em produtos e processos antes que eles ocorram, excetuando algumas diferenças. A figura 1 exemplifica de forma genérica a estrutura de uma FMEA.

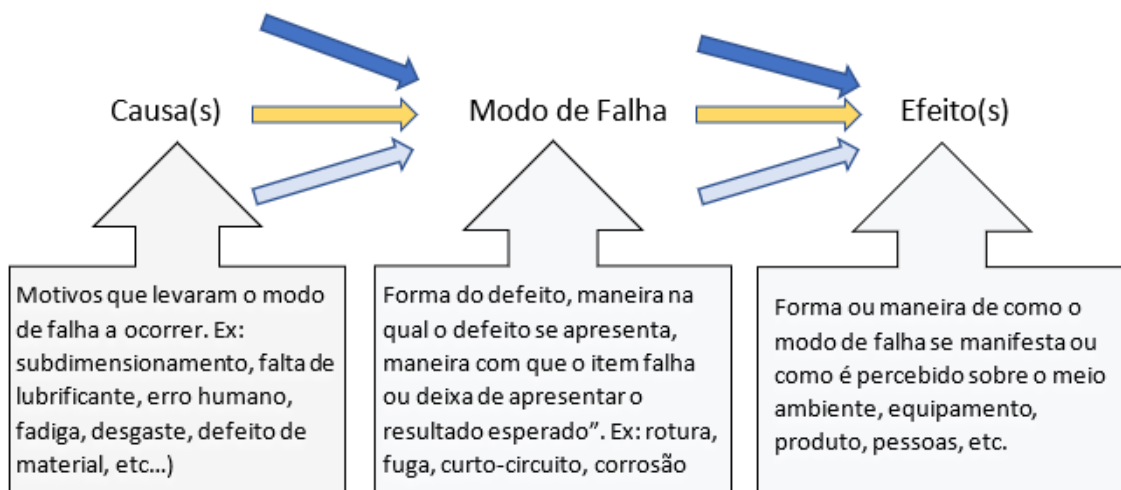


Figura 1: Elementos presentes numa FMEA (Adaptado (Sobral & Abreu ,2013))

De uma forma geral a FMEA dá a informação de forma qualitativa, indicando os potenciais modos de falha e a falha priorizada. A FMECA além dessas informações, quantifica os dados capazes de serem mensuráveis alcançados pela FMEA, ou seja, é uma FMEA + Análise de Criticidade.

Tem-se assim uma extensão da FMEA, ou seja, além da priorização da falha, que é calculada pelo Número de Prioridade de Risco NPR ou em inglês RPN (*Risk Priority Number*) $RPN=(S)\times(O)\times(D)$ (S Severidade, O Ocorrência, D Detecção), a

FMECA vem adicionar dois tipos de análise de criticidade, quantitativa e qualitativa de acordo com a norma MIL-STD-1629A (USA Department of Defense, 1980).

Em relação à Severidade da falha (S) ou grau de Severidade, podem ser classificadas como falhas catastróficas, falhas críticas, falhas maiores e falhas menores (Sobral & Abreu, 2013).

- Falhas Catastróficas: originam a degradação irreversível, e mesmo colapso dos equipamentos, podendo causar inclusivamente perdas humanas. Exemplo: paragem por falhas de todos os motores de indução de acionamento das bombas hidráulicas de uma aeronave, que teria como consequências a sua queda provável, com perdas de vidas humanas.
- Falhas Críticas: degradação significativa dos equipamentos, acima do que é aceitável, podendo verificar-se situações de perigo. Exemplo: destruição térmica do isolamento de um motor elétrico, que, embora seja uma falha grave, não causa a destruição do motor, mas que poderá originar intoxicações por inalação dos gases de combustão.
- Falhas Maiores: afetam o desempenho para além de limites considerados aceitáveis.
- Falhas Menores: não afetam o desempenho para além de limites considerados aceitáveis.

Por exemplo os índices de severidade das falhas propostos pela norma MIL-STD-1629A (USA Department of Defense, 1980), dividem-se em Catastrófico (Código 5), Crítico (Código 4), Médio (Código 3), Marginal (Código 2) e Insignificante (Código 1).

A probabilidade de ocorrência de falhas pode ser determinada a partir do registo histórico de falhas, experiência do fabricante e ensaios de fiabilidade (Sobral & Abreu, 2013). Do mesmo modo pode ser quantificada em Quase certo (Código 5), Provável (Código 4), Ocasional (Código 3), Remota (Código 2), Improvável (Código 1) e em relação ao nível de detetabilidade como, quase impossível (Código 4), difícil (Código 3), moderada (Código 2) e fácil (Código 1).

Os números de prioridade de risco RPN's só deverão ser comparados dentro de uma mesma análise e não entre análises distintas.

Para RPN's altos devem ser concentrados esforços a fim de reduzir o risco calculado através de ações corretivas. De um modo geral, deve ser dada atenção especial quando o índice de severidade é alto, independentemente do valor de RPN.

Em relação à FMECA, para usar o método quantitativo de criticidade é necessário (ReliaSoft Corporation, 2018):

- Definir a fiabilidade para cada item, num dado tempo de operação.
- Identificar se a taxa de falha de um item pode originar um potencial de modo de falha.
- Definir a probabilidade de cada grau de severidade originar um potencial modo de falha.
- Calcular a criticidade para cada potencial modo de falha; Criticidade = Fiabilidade do item x Taxa de falha x Probabilidade de perda.
- Calcular a criticidade para cada item somando os respetivos modos de criticidade para cada potencial modo de falha.

Para usar o método qualitativo de criticidade é necessário avaliar o risco e priorizar ações corretivas, para isso é necessário (ReliaSoft Corporation, 2018):

- Definir um rácio para a severidade dos potenciais efeitos de falha.
- Definir um rácio para a ocorrência de cada potencial modo de falha.
- Comparar os vários modos de falha via matriz de criticidade, colocando a severidade no eixo horizontal e a ocorrência (probabilidade de ocorrência) no eixo vertical.

De um modo geral a FMECA diferencia-se da FMEA quando há uma análise de fiabilidade de cada item para cada modo de funcionamento, entrando com probabilidades de ocorrência versus severidade. A FMEA só por si é útil para priorizar e comparar modos de falha, sendo possível fazer uma triagem dos problemas mais graves do produto/projeto, processo ou serviço.

2.4 Aplicações da FMEA e Estado da Arte

Desde a introdução da FMEA após a segunda grande guerra mundial, inicialmente usada para estudar os problemas dos sistemas militares, que a FMEA tem sido modificada ao longo do tempo, principalmente desde os finais dos anos noventa. A figura 2 ilustra a evolução das patentes e artigos na área académica e área industrial sobre a FMEA.

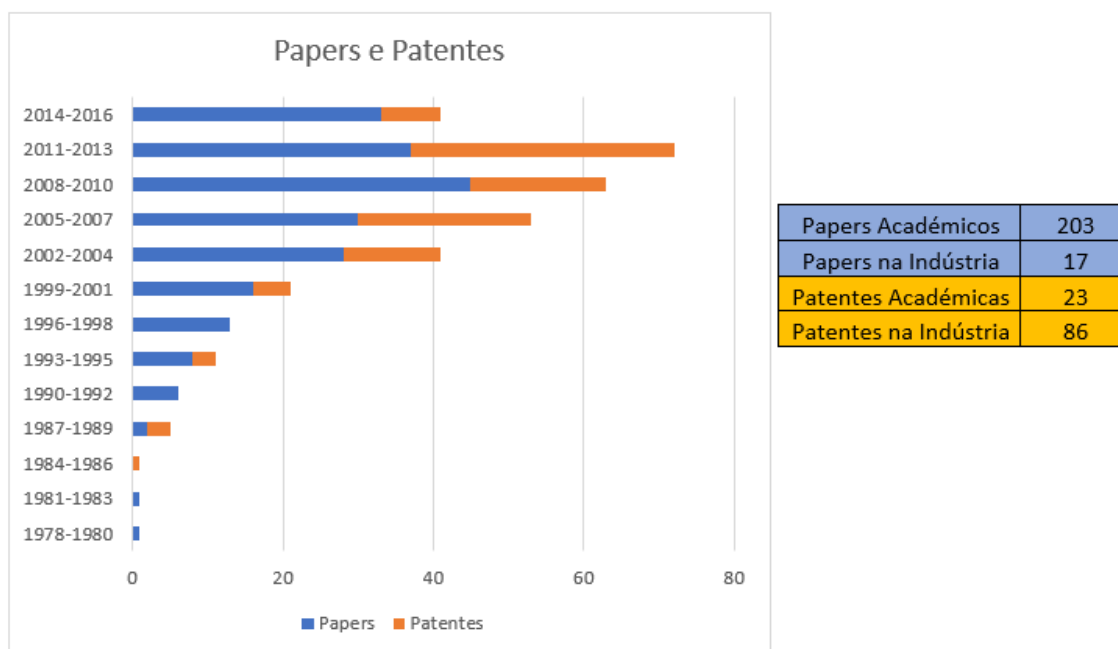


Figura 2: *Papers/Patents* Distribuição no tempo (Adaptado (Spreafico et al., 2017))

Este método é largamente utilizado na indústria automóvel, aeroespacial, eletrónica, química, construção civil, em diferentes fases e a vários níveis da empresa, nomeadamente: durante a fase de conceção e desenvolvimento do projeto (FMEA de Projeto ou Produto) para otimizar e melhorar as características do produto ou analisar a conceção de produtos/sistemas inovadores, antes da fase de execução/produção deste, e durante a fase de execução (FMEA de Processo) tendo em vista a redução de falhas e otimização de processos.

De seguida são exibidos alguns exemplos da vasta gama de aplicações práticas da FMEA/FMECA encontradas nas áreas já referidas, onde se incluem nos dias de hoje (ReliaSoft Corporation, 2014):

- Usada para analisar o design de produtos e processos (linhas de produção, procedimentos do serviço, etc.) e antecipar e resolver

potenciais modos de falha no início do processo quando é mais económico de os resolver.

- Contribui para o desenvolvimento de procedimentos de manutenção eficazes. Como por exemplo, a análise com Manutenção Centrada na Fiabilidade RCM (*Reliability Centered Maintenance*) e análise MSG-3 (*Maintenance Steering Group-3*) para a indústria aeronáutica.
- Integração na política de gestão de crescimento de fiabilidade RG (*Reliability Growth*).
- Integração nos processos de DVP&R Relatório e Plano de Verificação de Projecto (*Design Verification Plan & Report*) e APQP (*Advanced Product Quality Planning*) Planeamento Avançado da Qualidade do Produto.
- Analisar planos para modificar/melhorar um processo existente.
- Investigar a fiabilidade de sistemas/processos atuais.
- Providencia uma base de dados de conhecimento para ajudar em futuras identificações e resoluções de problemas.
- Funciona como ferramenta de aprendizagem para novos engenheiros.
- Providencia *inputs* a outros sistemas de análise, como diagramas de blocos RBD (*Reliability Block Diagram*), Análises de Markov, Árvores de Falhas, etc.
- Contribui para a identificação de requisitos para o BITE (*Built-In Test Equipment*) equipamento de teste (são usados equipamentos de teste no auxílio da manutenção no teste e diagnóstico, alguns exemplos: multímetros, osciloscópios, etc.).
- Aplicação de técnicas de Análise Probabilística de Riscos PRA (*Probabilistic Risk Assessment*) na indústria. Usado em indústrias onde há risco de vida elevado (Severidade alta e Probabilidade alta de falha), como por exemplo: companhias aéreas, central nuclear, etc.
- Efetuada de modo a cumprir com os requerimentos do cliente e/ou estar conforme os requisitos de Segurança e Qualidade:
 - ISO 9001, QS 9000
 - ISO/TS 16949
 - Six Sigma

- FDA (*Food and Drug Administration*) e GMP (*Good Manufacturing Practices*)
- PSM (*Process Safety Management Act*)

De seguida, referem-se alguns trabalhos recentes onde a metodologia FMEA foi utilizada, em diversas áreas, com diversos objetivos e diferentes abordagens.

Por exemplo, na área das energias renováveis, a FMEA foi utilizada para turbinas eólicas aplicada nos componentes, controlo e fiabilidade de sistemas, tendo por base métodos probabilísticos usando um histórico de falhas de turbinas eólicas na Alemanha e Dinamarca (Costa, 2010).

A FMEA é uma das metodologias de análise de risco mais efetivas, sendo largamente adotada na melhoria da segurança e fiabilidade de sistemas. Wang et al. (2018) apresentam um estudo sobre um sistema de aterragem de aeronaves baseado num modelo híbrido de FMEA com fatores de risco, comparando no fim os resultados obtidos com os resultados alcançados numa FMEA tradicional.

Hirayama et al. (2018) desenvolveram uma investigação relativa à aceitabilidade de instalações de hidrogénio em áreas públicas, tendo por base uma avaliação de risco. Para tal, os vários cenários foram identificados através de uma FMEA e de um estudo HAZOP (*Hazard and Operability*). Através deste estudo, os autores concluíram que este tipo de instalações em áreas públicas possui um risco considerado aceitável.

Ho e Chen (2018) também realizam uma análise de risco para identificar os fatores de risco presentes num contentor de líquidos usados em laboratório. Neste caso é aplicada a metodologia fuzzy-FMEA. O estudo revela que após a implementação de ações a taxa de melhoria aumentou para 60.2%.

Kang et al. (2017) conduziram uma avaliação do risco através de uma FMEA modificada, chamada Correlação-FMEA, estudando a ligação entre os modos de falha e seus efeitos na probabilidade de falha do sistema global de turbinas eólicas offshore através do método do vetor do índice de fiabilidade. Os resultados levaram a sugestões para o projeto de turbinas eólicas, tendo em consideração aspetos de segurança e fiabilidade.

Fattahi e Khalilzadeh (2018) apresentam um novo modelo fuzzy híbrido para a FMEA, considerando um número fuzzy de prioridade de risco ponderado FWRPN (Fuzzy Weighted Risk Priority Number) em vez do tradicional RPN. Esta metodologia incorpora os pesos para os três fatores e dos modos de falha por computação pelas metodologias fuzzy AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e fuzzy MULTIMOORA (*Multiple Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form*), respetivamente. Os resultados apurados após implementação de ações de melhoria mostram uma diminuição de 56% no risco.

À semelhança dos exemplos anteriores, muitos mais poderiam ser apresentados, comprovando a mais valia desta metodologia (FMEA) e a sua vasta aplicação para situações tão diversas em todo o mundo.

2.5 Preparação da FMEA

Através das pesquisas efetuadas sobre o tema da FMEA, verifica-se que os tipos de FMEA mais comuns são a FMEA de Projeto e FMEA de Processo.

Resumidamente a FMEA de produto visa prevenir as falhas de produto, como assegurar a segurança do consumidor, cumprir os requisitos estabelecidos, evitar efeitos colaterais perigosos e minimizar consequências desastrosas em caso de acidente.

No caso da FMEA de processo, visa evitar matérias primas ou componentes defeituosos, erros de montagem e não atendimentos aos requisitos do processo de fabricação.

A elaboração de uma FMEA é um processo moroso e a altura mais apropriada para a aplicar é na fase inicial do Projeto/Processo quando as alterações podem ser implementadas com menores custos e maior facilidade. No entanto a FMEA também pode ser realizada em produtos ou processos que já se encontram em funcionamento e comercialização, como é o caso de estudo deste trabalho. Neste caso o objetivo da FMEA passa por estudar os sistemas e subsistemas do produto e propor soluções de melhoria, também podem ser usados dados estatísticos e históricos de falhas.

Há necessidade de rever uma FMEA em qualquer fase do ciclo de vida de um produto quando (NPD Solutions, 2016):

- Se procede ao desenvolvimento inicial de um novo produto ou processo.
- Se pretende maximizar o lucro, por exemplo usando um material equivalente com menor custo (situação comum na área automóvel, mesmo em produtos já em comercialização).
- São impostas novas normas ou requisitos.
- Em casos de insatisfação de um grande número de clientes devido a uma falha no produto.
- Há mudanças nas condições de utilização de um produto ou processo.
- Há mudanças no design do produto ou processo, o que implica mudanças por exemplo no fabrico, dado que o produto e processo estão relacionados.

Stamatis (2003) defende que uma FMEA bem implementada é um processo iterativo sem fim, quando bem aplicada.

2.6 Desenvolvimento da FMEA

O documento usado como base para explicar o desenvolvimento da FMEA é a 2ª edição do Manual QS9000 (AIAG, 1995), onde a Análise de Modos de Falha e seus Efeitos se divide em vinte e dois passos. Existem outras referências com diferentes números de etapas, optou-se por esta referência desenvolvido pelo grupo AIAG, constituído pela Chrysler, Ford e General Motors. O manual diferencia uma Design FMEA (DFMEA ou FMEA de Produto/Projeto), de uma FMEA de Processo (PFMEA), sendo a base da metodologia semelhante.

Tal como mencionado no capítulo anterior, para se efetuar uma FMEA eficiente é importante aplicá-la na fase inicial de conceção do produto ou caso se trate duma melhoria de um produto em comercialização, recolher toda a informação existente relativa a produtos semelhantes anterior e respetivos relatórios de falhas. Logo numa fase inicial é necessário um Engenheiro responsável pela elaboração da FMEA e todos os documentos necessários para preparação da DFMEA ou PFMEA. A interação dos vários departamentos de desenvolvimento com reuniões periódicas, contribui para uma eficiente aplicação da metodologia.

Na DFMEA é útil a elaboração de um QFD (*Quality Function Deployment*) de modo a determinar o que o cliente quer e precisa do produto a desenvolver (ou melhorias de um produto já em comercialização). Uma DFMEA deve começar por um diagrama de blocos dos sistemas, subsistema ou componente a ser analisado.

Na figura 3 está exemplificada uma lanterna que irá sofrer um teste de condições extremas operacionais, sujeita a poeira, variação de temperatura e humidade.

O diagrama de blocos também indica o fluxo de informações, energia, fluido, etc. O objetivo é indicar claramente as entradas *inputs*, o processo desenvolvido (função) e as saídas *outputs* dos blocos (Moura, 2000).

A DFMEA é benéfica para os Engenheiros responsáveis e equipa de desenvolvimento/fabrico na fase de conceção/testes, como também pode ser elaborada a partir do histórico de falhas do cliente final, melhorando um produto já em comercialização.

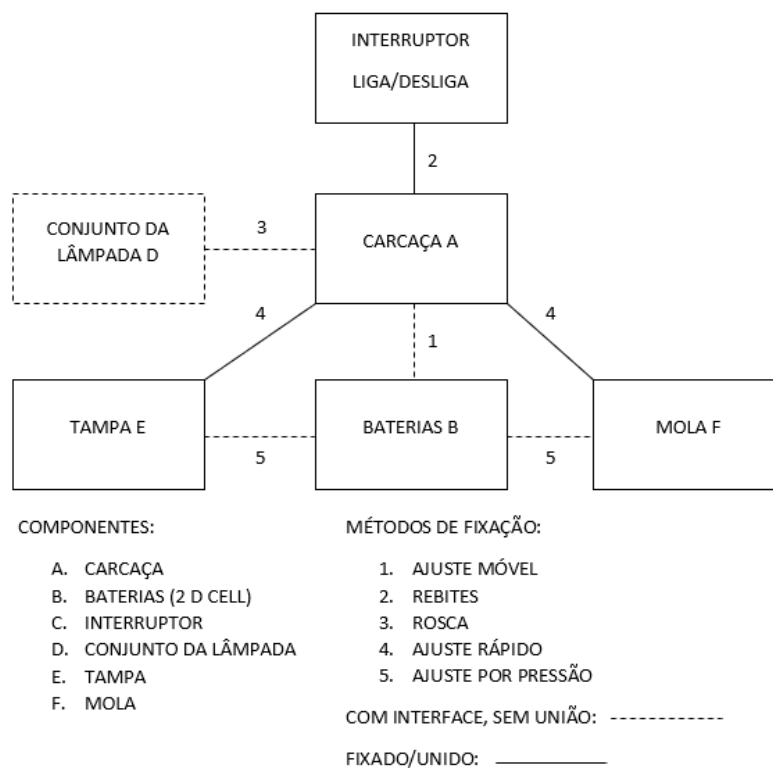


Figura 3: Exemplo de um diagrama de blocos usado numa DFMEA (Adaptado (Moura, 2000))

No caso da FMEA de Processo (PFMEA), um fluxograma de processo é essencial para melhor visualização dos potenciais riscos (figura 4) antes do início de produção, ajudando na escolha de equipamentos e processos a utilizar na produção. Os

inputs da FMEA de Produto (DFMEA) são úteis, dado que um modo de falha identificado no projeto de um produto pode estar relacionado com um modo de falha no processo de fabrico/montagem (não identificado na PFMEA).

Fluxogramas, diagramas de blocos e formulários são ferramentas sugeridas na implementação de uma FMEA, sendo possível aplicar a metodologia sem essas ferramentas.

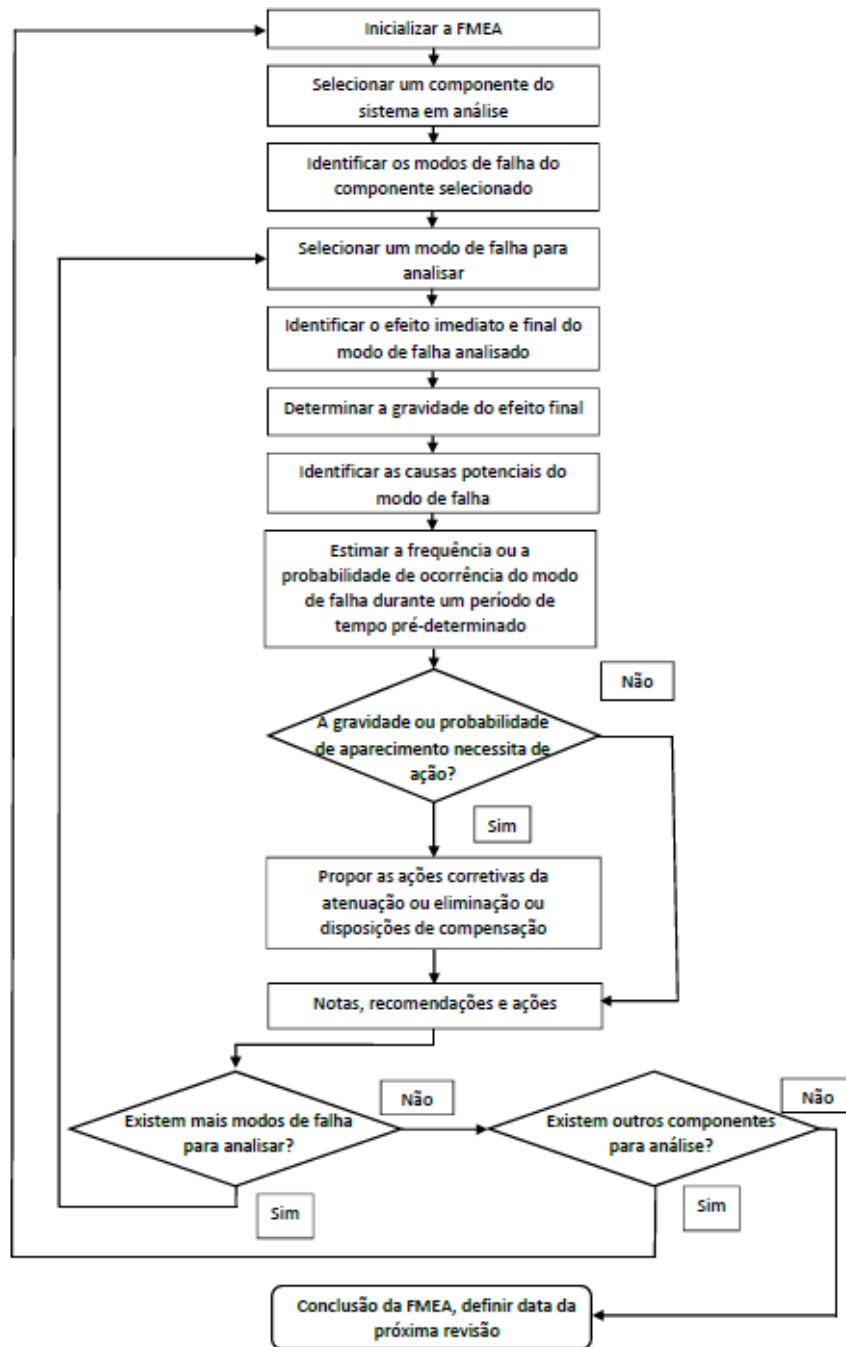


Figura 4: Fluxograma de análise FMEA (Adaptado (Pedrosa, 2014))

No documento original (AIAG, 1995) há alguma divergência nos vinte e dois passos entre PFMEA e DFMEA e uma aplicação objetiva na indústria automóvel. De seguida descrevem-se os vinte e dois passos para uma FMEA genérica, de modo a resumir este capítulo.

1) Numeração da FMEA:

Colocação de o número do documento da FMEA que poderá ser usado para rastreabilidade.

2) Sistema, Subsistema, ou Nome ou Número do Componente:

Indicação do nível de análise apropriado, nome, número do componente, subsistema e sistema a ser analisado.

3) Entidade à qual vai ser aplicada a DFMEA ou PFMEA:

Preencher grupo/departamento do fabricante de equipamento original OEM (*Original Equipment Manufacturer*). Incluir também o nome do fornecedor se aplicável.

4) Responsável da aplicação da metodologia FMEA:

Preencher, nome, telefone e a empresa do Engenheiro responsável.

5) Produto ou Processo a ser analisado: exemplo de produto “*Model Year/Veículo*”).

6) Prazo de conclusão da FMEA, *Key Date*:

Data de conclusão prevista para finalizar a FMEA, que não deve exceder a data de início de produção de um produto.

7) Data da FMEA:

Data em que a FMEA inicial foi compilada e a data da última revisão.

8) Membros da equipa, *Core Team*:

Agregar todos os responsáveis dos vários departamentos que têm a autoridade para a identificação e/ou realizar tarefas relacionadas com a FMEA. É recomendado o uso de uma lista de distribuição de modo a otimizar a troca de informação entre equipas.

9) Identificação dos componentes ou processos:

Preencher o nome e número de item a ser analisado no caso de uma DFMEA ou descrição do processo ou operação (exemplo: soldadura, montagem, pintura, etc.) a ser analisada no caso de uma PFMEA. Descrever detalhadamente a função do item ou processo consoante o tipo de FMEA, no caso do item, descrever ambiente de operação, com amplitudes no qual o

sistema opera (exemplo: temperatura, pressão, umidade, etc.) na função do produto, se o produto tiver mais que uma função que origine diferentes modos de falha, listar as restantes funções. No caso de um processo, indicar o objetivo do processo e suas operações/passos que correspondam a diferentes potenciais modos de falha.

10) Potenciais Modos de Falha:

É definido como potencial falha de um componente, subsistema ou sistema, a atingir a função para a qual foi desenhado. Ou no caso de uma PFMEA definido como potencial falha de um processo numa lista de requerimentos ou objetivo, entrando em não conformidade com as normas estabelecidas.

Nota que a falha tem probabilidade de ocorrer, mas poderá não ocorrer. É recomendado um brainstorming, discussão de ideias entre os envolvidos/responsáveis pela FMEA, recorrendo a histórico de dados/falhas para identificar com rigor todos os potenciais modos de falha.

11) Efeitos potenciais da falha:

São definidos como os modos de efeito de falha no cliente final, ou seja, a forma como o cliente final percebe a falha. Para o preenchimento deste campo, é recomendado o uso de histórico de dados, reclamações, acionamentos de garantia, falhas de fiabilidade, etc.

Um exemplo de falha de PFMEA: veículo com defeito de pintura na chegada ao concessionário, decorrente de uma falha no processo de pintura, um exemplo de DFMEA pode ser uma infiltração de água devido a uma falha de *design* de um componente do veículo.

12) Severidade (S):

A severidade é uma classificação da gravidade do efeito do potencial modo de falha. No estudo da FMEA utiliza-se, para medir esta característica, um índice (S) que varia entre 1 e 10, de acordo com as tabelas 1 e 2, para DFMEA e PFMEA respetivamente:

13) Classificação:

Este campo pode ser usado para classificar características de um produto no caso da DFMEA ou processo no caso da PFMEA, que necessitem de um controlo adicional.

Tabela 1: Tabela de Severidade DFMEA (Moura, 2000)

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

Tabela 2: Tabela de Severidade PFMEA (Moura, 2000)

Efeito	Critério (Severidade do efeito)	Índice
Perigoso sem aviso prévio	Pode causar grave perigo à máquina e ao operador. Não conformidade com legislação governamental sem aviso prévio.	10
Perigoso com aviso prévio	Pode causar grave perigo à máquina e ao operador. Não conformidade com a legislação governamental com aviso prévio	9
Muito alto	Interrupção da linha de produção. Cem por cento do produto ficar danificado. Item inoperável, perda da função primária. Cliente muito insatisfeito	8
Alto	Interrupção parcial da linha de produção. Produto parcialmente danificado. Item operável, mas com reduzida performance. Consumidor insatisfeito.	7
Moderado	Interrupção parcial da linha de produção. Produto parcialmente danificado. Item operável, mas com algumas funcionalidades limitadas. Cliente sente desconforto.	6
Baixo	Interrupção parcial da linha de produção. Cem por cento do produto tem de ser corrigido. Item operável, mas com algumas funcionalidades ligeiramente limitadas. O cliente sente alguma insatisfação.	5
Muito baixo	Interrupção parcial da linha de produção. O produto tem de ser parcialmente corrigido. Item operável, mas com algumas funcionalidades a causar ligeiro desconforto no uso. Defeito notado pela maioria dos clientes.	4
Menor	Interrupção parcial da linha de produção. O produto tem de ser parcialmente corrigido, fora da linha de produção. Item operável, mas com alguns defeitos em não conformidade. Defeito notado por alguns clientes.	3
Muito menor	Interrupção parcial da linha de produção. O produto tem de ser parcialmente corrigido, dentro da linha de produção. Item operável, mas com alguns defeitos em não conformidade. Defeito notado por clientes mais exigentes.	2
Nenhum	Sem efeito.	1

14) Causas e mecanismos potenciais da falha:

É definida como uma indicação de uma deficiência do projeto, cuja consequência é o modo de falha. Devem-se listar todos os mecanismos/causas que possam impedir que o processo (no caso da PFMEA) cumpra os seus objetivos ou que um produto/projeto não cumpra a sua função ou não esteja em conformidade (no caso DFMEA). Um exemplo na metodologia PFMEA; aperto de um parafuso com binário incorreto ou usando o exemplo da metodologia DFMEA; material com especificações incorretas aplicado no fabrico do produto. As causas apresentadas devem ser as mais específicas possíveis, devendo-se evitar a justificação de falhas com situações redundantes como a falha do operador ou mau funcionamento da máquina.

15) Ocorrência (O):

A ocorrência é a probabilidade de um mecanismo/causa ocorrer. Esta probabilidade pode ser estimada numa escala de “1” a “10”. Para se reduzir efetivamente o índice de ocorrência (de “1” a “10”) é necessário alterar o processo (PFMEA) ou o produto/projeto (DFMEA). Na determinação da probabilidade de ocorrência, devem-se considerar questões como “a experiência/histórico de capo com os componentes a usar ou sistemas similares?”, “A aplicação do componente mudou?”, etc., no caso da DFMEA.

De seguida tem-se a tabela 3 com a classificação do índice de ocorrência da DFMEA e a tabela 4, com o índice de ocorrência da PFMEA onde existe um índice extra o “Cpk” índice de capacidade do processo (quanto mais alto o “Cpk” mais o processo está de acordo com as especificações requeridas).

Tabela 3: Ocorrência (O) DFMEA (Moura, 2000)

Probabilidade de falha	Taxa de falha possíveis	Índice de Ocorrência
Muito alta: falha quase inevitável	≥ 1 em 2	10
	1 em 3	9
Alta: Falhas frequentes	1 em 8	8
	1 em 20	7
Moderada: Falhas ocasionais	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 2000	4
Baixa: Poucas Falhas	1 em 15000	3
	1 em 150000	2
Remota. Falha improvável	≤ 1 em 1500000	1

Tabela 4: Ocorrência (O) PFMEA (Moura, 2000)

Probabilidade de falha	Taxa de falha possíveis	Cpk	Índice de Ocorrência
Muito alta: falha quase inevitável	≥ 1 em 2	$< 0,33$	10
	1 em 3	$\geq 0,33$	9
Alta: Falhas frequentes em processos similares	1 em 8	$\geq 0,51$	8
	1 em 20	$\geq 0,67$	7
Moderada: Falhas ocasionais em processos similares	1 em 80	$\geq 0,83$	6
	1 em 400	$\geq 1,00$	5
	1 em 2000	$\geq 1,17$	4
Baixa: Poucas Falhas em processos similares	1 em 15000	$\geq 1,33$	3
Muito baixa: Falhas isoladas em processos quase idênticos	1 em 150000	$\geq 1,50$	2
Remota. Falha improvável	≤ 1 em 1500000	$\geq 1,67$	1

16) Controlos atuais do Produto/Projeto (DFMEA) e Processo (PFMEA)

É a listagem das ações de controlo que podem detetar ou prevenir a ocorrência de um modo de falha, de modo a assegurar que o projeto ou processo esteja em conformidade com os objetivos definidos.

De um modo geral são considerados três tipos de ações de controlo:

1. Prevenção da ocorrência da causa ou modo/efeito de falha ou redução da taxa de ocorrência destes.
2. Detecção da causa/mecanismo e implementação de ação corretiva.
3. Detecção do modo de falha.

É recomendado seguir os passos pela ordem descrita, dado que as ações do tipo 1 podem ajudar a baixar os índices de ocorrência (O) e as ações 2 e 3, baixam o índice de deteção, desde que os protótipos (DFMEA) ou processos (PFMEA) em uso sejam representativos do objetivo do projeto.

17) Detecção (D):

A detecção é a capacidade de os controlos (descritos no ponto 16) em identificar causas (controlos do tipo 2) e modos de falhas (controlos do tipo 3), antes do componente, subsistema ou sistema ser produzido (ou antes de um componente sair de um processo no caso da PFMEA). Para baixar o índice de Ocorrência (O) e Severidade (S), é necessário aperfeiçoar o programa de controlo do projeto/produto (DFMEA) ou processo (PFMEA), aplicando medidas preventivas e verificações/validações. A tabela 5 é similar para DFMEA e PFMEA.

Tabela 5: Tabela de índice de deteção (Moura, 2000)

Detecção	Critério; Probabilidade de deteção pelo controlo do produto/projeto (DFMEA) ou processo (PFMEA)	Índice de deteção
Incerteza Absoluta	O controlo de projeto não irá e/ou não pode detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha; ou não existe controlo de projeto.	10
Muito remota	Possibilidade muito remota que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	9
Remota	Possibilidade remota que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	8
Muito baixa	Possibilidade muito baixa que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	7
Baixa	Possibilidade baixa que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	6
Moderada	Possibilidade moderada que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	5
Moderadamente alta	Possibilidade moderadamente alta que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	4
Alta	Possibilidade alta que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	3
Muito Alta	Possibilidade muito alta que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	2
Quase Certamente	Controlo atual quase certamente que irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	1

18) Número de prioridade de risco (RPN):

O número de prioridade de risco é o produto dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D); **RPN=(S)x(O)x(D)**

É uma medida de risco do projeto/produto ou processo consoante a metodologia utilizada. Este número deve ser usado para priorizar as falhas do projeto (ex: Diagrama de Pareto). O RPN varia entre “1” e “1000”. Para RPN’s altos a equipa deve concentrar esforços de modo a reduzir o risco calculado através de ações corretivas. De modo geral, deveria ser dada atenção especial quando a severidade é alta, independentemente do RPN resultante.

19) Ações recomendadas:

Quando os modos de falha estiverem classificados pelo RPN, devem ser aplicadas ações corretivas ao modo de falha com o ranking mais alto. O objetivo das ações recomendadas é o de reduzir o índice de ocorrência, de severidade ou de deteção. Uma melhoria na verificação/validação resultará somente na redução do índice de deteção (D). Uma redução do índice de ocorrência (O), pode ser atingida somente pela eliminação ou controlo de uma ou mais causas/mecanismos potenciais de falha, através de alterações do projeto/produto ou processo consoante a metodologia. Devem ser consideradas as seguintes recomendações DFMEA:

- Desenho de experiências (particularmente quando causa múltiplas ou interativas estão presentes)
- Revisão do plano de testes
- Revisão a especificação do material

Ou no caso da PFMEA:

- Para reduzir a probabilidade de ocorrência, são recomendadas revisões ao processo. Podem ser realizados estudos estatísticos para se obter *feedback* de informação para melhoria continua e prevenção de defeitos.
- Só uma revisão no processo pode reduzir o índice de severidade (S).
- Para aumentar a probabilidade de deteção são requeridas revisões no processo.

Se nenhuma ação for recomendada para uma causa específica, deve ser indicado “Nenhuma” nesta coluna.

20) Responsável e Prazo:

Preenchimento da organização e das pessoas responsáveis pela implementação de ações de correção e prazo de execução.

21) Ações tomadas:

Preenchimento deste campo após a implementação da ação corretiva com uma breve descrição e a data de implementação.

22) RPN resultante:

Após a ação corretiva ter sido implementada, calculam-se os novos índices resultantes de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), que devem ser inferiores aos que existiam antes.

A FMEA é um documento dinâmico que deve refletir o último nível de melhoria ao processo ou produto/projeto, tal como as últimas ações implementadas e aquelas realizadas após o início da produção. O engenheiro responsável pela FMEA assegura que as falhas foram identificadas e que as ações recomendadas foram implementadas garantindo que os requisitos de projeto foram cumpridos, fazendo uma análise crítica da documentação de engenharia, confirmação da incorporação das modificações a documentação de montagem e produção e análise crítica da FMEA de processo e planos de controlo.

2.7 Vantagens e Limitações

De um modo geral uma FMEA é uma ferramenta preventiva (e corretiva) que visa avaliar um projeto de um produto ou um processo, de forma a identificar onde e como ele pode falhar por meio de análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria. A aplicação desta metodologia traz os seguintes benefícios, quando aplicada corretamente:

- Minimizar ou eliminar a ocorrência de falhas.
- Aumentar a viabilidade do sistema.
- Calcular e avaliar os riscos para cada falha considerando diferentes critérios e atribuindo uma prioridade para a sua solução.
- Permitir modificar e melhorar significativamente qualquer processo ou projeto.
- Permitir identificar necessidades de desenvolvimento ou mudanças.
- Os custos de prevenir as falhas são muito menores do que os custos de resolver falhas após estas terem ocorrido.

- Reduzir custos (considerando também os custos de garantia de um produto) e tempos desnecessários, maximizando eficiência.
- Fonte de dados rastreáveis para manutenção e auditorias.
- Permitir utilizar falhas identificadas como referências na fase de desenvolvimento de novos produtos, processos ou serviços, reduzindo assim tempo, custos, maximizando a sua viabilidade.
- Ferramenta integrada na filosofia de Gestão Lean, diminuindo desperdícios e operações que não adicionam valor.
- Maior competitividade e melhor imagem da empresa.
- Documentação de melhorias e ações corretivas implementadas (muito usado na indústria automóvel e aeroespacial).
- Serve como base para o desenvolvimento de um novo produto ou processo.

Alguns autores (Haq & Lipol, 2011) (Liu et al., 2013) (Gargama & Chaturvedi, 2011) (Sharma & Sharma, 2010) identificam as seguintes limitações de uma FMEA:

- O tempo de aplicação de uma FMEA, que por norma é extenso (o problema tem sido minimizado com a utilização de *software*, para gestão de bases de dados, formulários, registo de falhas, etc.).
- Requer uma equipa com conhecimento profundo do assunto a ser estudado, e discussão com várias pessoas envolvidas desde o projeto até à finalização do produto, contribuindo para a demora do processo de aplicação da FMEA.
- A eficácia da FMEA depende da qualidade e experiência da equipa.
- A FMEA apenas estabelece ações de melhoria, sem aprofundar modos de falha complexos quando usada isoladamente (daí ser frequentemente complementada com a Análise de Árvore de Falhas FTA (*Fault Tree Analysis*)).
- Muitas vezes depende da existência de dados para serem analisados.
- A importância relativa dos índices não é tida em consideração, dado que o produto RPN de uma falha com diferentes características (Severidade, Probabilidade de Ocorrência e Detetabilidade) pode dar o mesmo resultado, ou seja assumindo a mesma importância para os três fatores.

- A possível interdependência entre os modos de falha não é analisada.
- O RPN não tem em consideração fatores externos como os fatores económicos.
- Dificuldade em avaliar com precisão os três índices.

Tendo em consideração a descrição da metodologia, as várias tipologias diferentes e possibilidades de desenvolver uma FMEA, é necessário definir com clareza qual o modelo adotado e a seguir no presente trabalho, por forma a posteriormente ser aplicado ao caso de estudo alvo de análise (Varredoura Compacta Urbana).

Desta forma, na realização do presente trabalho é aplicada a DFMEA (a um produto/projeto), por se pretender analisar os vários sistemas e subsistemas que fazem parte da Varredoura. Assim, nesta perspetiva, serão analisados para esses itens os potenciais modos de falha, suas causas, possíveis consequências e meios de controlo existentes, com o objetivo de identificar quais os modos de falha mais importantes do ponto de vista do seu risco.

Quanto aos fatores inerentes à determinação do risco individual dos modos de falha, nomeadamente “Probabilidade de Ocorrência”, “Severidade” e “Detetabilidade” optou-se por utilizar os níveis apresentados no subcapítulo 2.6, onde para cada factor é possível alocar um valor numa escala de um a dez.

No próximo capítulo far-se-á uma apresentação detalhada da Varredoura Compacta Urbana, com indicação dos sistemas analisados, suas características e modo de funcionamento. Apesar de se tratar de um equipamento que à primeira vista possa parecer simples, constata-se que o mesmo se pode considerar complexo, devido aos imperativos funcionais e operacionais exigidos.

3 Varredoura Compacta Urbana

3.1 O modelo Ravo 540 STH

A Ravo é uma empresa sediada na Holanda produz varredouras desde 1964, sendo um dos principais fabricantes mundiais este tipo de equipamentos, tendo clientes em cidades como, Amesterdão, Dubai, Saint Petersburg, Washington DC, Darmstadt, Barcelona, Porto e Bordeaux. A empresa privada pertence ao grupo francês Fayat, sediado em Bordéus, fundado por Clément Fayat em 1957, inicialmente uma empresa dedicada exclusivamente à construção civil. A empresa conta atualmente com cerca de 19100 colaboradores e está presente em 170 países, é gerida pelos filhos de Clément Fayat, Jean Claude e Laurent desde 2013.

O grupo Fayat produz além da Varredoura uma série de equipamentos, principalmente ligados à construção civil, que vão desde cilindros, pavimentadoras de asfalto, recicladoras de asfalto, guias, tratores para aeroportos até equipamento ligado à construção naval.

A Varredoura fabricada pela Ravo em Alkmaar, está preparada para efetuar a limpeza da via numa só passagem, independentemente da estação do ano. Funciona em ambientes urbanos ou rurais, em situações de calor ou frio extremos, em vias de autoestrada ou mesmo ciclovias.

Do equipamento standard fazem parte:

- Cabine ergonómica (com ajustes na posição de condução).
- Chassis exclusivo em aço Corten de 4mm.
- Ar condicionado.
- Potente Motor Iveco de 4 cilindros diesel.
- Sistemas hidráulicos do grupo Linde.
- Sistema elétrico de 24 Volts.
- Contentor em aço-inox com volume até 5m³.
- Capacidade de carga de 5500Kg.
- Excelente manobrabilidade com raio de viragem de somente 5m (lancil a lancil).

- Suspensão dianteira hidropneumática para elevar a máquina antes de passar por lombas de velocidade e manter constante pressão das escovas ao solo.
- Somente 11 pontos de lubrificação em toda a máquina.
- Sistema de escovas com pouca manutenção (sem lubrificação) e sistema de pressão contínua de água nas escovas, aumentando o ciclo de vida das escovas em +50%.

Os detalhes técnicos da Varredoura Ravo 5-Series Modelo 540 STH (*Standard Tipping High*) encontram-se nas tabelas 6 e 7. A tabela 6 apresenta os detalhes técnicos principais da RAVO 540 STH referentes às dimensões peso e capacidade, bem-estar, AC, sistema de aspiração, sistema de escovas, motor e sistema de transmissão, travões, eletricidade e suspensão, manutenção e equipamento opcional.

Tabela 6: Detalhes Técnicos Gerais da RAVO 5-Series 540 STH (Adaptado de Adeco, 2015 e Ravo, 2015)

Especificações do Modelo 540 STH	
Volume líquido	5 m ³
Altura	2685 mm
Altura de Descarga	850 mm
Peso Total Vazo (Tara)	5950 Kg
Especificações Gerais (Comuns a todas as versões)	
Dimensões, Peso e Capacidades	
Comprimento	4525 mm
Largura com Espelhos	2280 mm
Largura da Varredoura	2200-2400mm
Distância entre eixos	1816mm
Diâmetro de viragem entre passeios	5070 mm
Inclinação	Até 30%
Peso Bruto do Veículo	11400 Kg
Capacidade do depósito de combustível	105 L
Capacidade do depósito de água	600 L
Bem-estar	
Emissão de Ruído LWA (<i>Emission Sound Power Level</i>)	109 dBA à distância de 3 metros
Filtragem de Poeiras	Certificada para PM10 (<i>Particle Matter 10 micrometers</i>)
Ar Condicionado	
Tipo de sistema de arrefecimento	Arrefecimento na cabine
Tipo de gás refrigerante	R134a
Capacidade do refrigerante	1000 gramas
Sistema de Aspiração	

Capacidade da turbina	233m ³ por minuto (aproximadamente 14000m ³ por hora)
Dimensões da boca de aspiração c x l	112 x 630 mm
Material da boca de aspiração	Aço Corten
Diâmetro do tubo de aspiração	225 mm
Material do tubo de aspiração	Aço inoxidável
Sistema de Escovas	
Tipo	Sistema de escovas de baixa manutenção RAVO
Diâmetro disponível das escovas	750 mm – 900 mm (Metálicas)
Velocidade de rotação das escovas	0 – 210 r.p.m
Motor e Sistema de Transmissão	
Tipo de motor	Iveco a diesel de 4 cilindros common rail turbo compressor com intercooler (N45 ENT)
Nível de emissões	Tier 3 / Fase IIIA
Cilindrada	4.5 L (4485cc)
Binário máximo	560 Nm @ 1400 r.p.m
Potência máxima	104 kW (141 Hp) @ 2200 r.p.m
Velocidade (por hora)	25 KM (Em serviço) – 80 KM
Tipo e sistema de transmissão da Ravo	Linde / Hidrostática de variação contínua
Travões (sem sistema ABS(a)), Eletricidade e Suspensão	
Travões dianteiros	Travões de disco de acionamento hidráulico
Travões traseiros	Servofreios de tambor hidrostáticos de acionamento hidráulico
Travão de estacionamento	Acionado nas rodas traseiras. Ativado por uma mola e é libertado hidráulicamente. O travão de estacionamento é aplicado automaticamente quando a máquina está desligada (Após falta de pressão no sistema)
Suspensão dianteira	Suspensão hidropneumática independente (Controlo eletrónico de altura com sensores)
Suspensão traseira	Sinoblocos (<i>Rubber Buffer</i>)
Bateria (V/Ah)	2x12 / 72
Alternador	90 amperes
Tensão (V)	24, com o motor em funcionamento 28
Radio (V)	12, com transformador
Luzes (V)	24
Manutenção	
Material do contentor	Interior em aço inoxidável / Cobertura exterior em ABS(b) (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
Número total de pontos de lubrificação da Varredoura	10
Garantia de Série	2 anos ou 2000 horas, o que ocorrer primeiro

Equipamento Opcional	
Câmara	Câmara traseira
Bomba de água de alta pressão	15 L por min. @ 150 bar

A tabela 7, apresenta os detalhes técnicos dos sistemas hidráulicos, das escovas e reservatório basculante.

Tabela 7: Detalhes Técnicos RAVO 5-Series: Sistemas hidráulicos (Escovas e Reservatório Basculante (Ravo, 2015))

Sistema Hidráulico (<i>Pump delivery at 1000 r.p.m</i>)	
Capacidade da <i>Drive Pump</i>	105 l/min
Pressão de operação da <i>Drive Pump</i>	420 bar
Capacidade da <i>Booster Pump</i>	22 l/min
Pressão regulada, <i>Booster pump</i>	54 bar
Pressão regulada, <i>Boost pump</i>	17.5 bar
Capacidade da Bomba da ventoinha	75 l/min
Pressão de operação, bomba da ventoinha	175 bar
Capacidade da bomba das escovas	19 l/min
Pressão de operação das escovas	175 bar
Capacidade da bomba de direcção	11 l/min
Pressão de operação, bomba de direcção	100 bar
Capacidade da bomba, <i>Accumulator filling system</i> (Suspensão dianteira)	6 l/min
Pressão de operação, motores das escovas	175 bar max.
Pressão de operação, ventoinha do motor	175 bar
Pressão de operação, bocal de sucção <i>flap</i>	175 bar
Pressão de operação, <i>Drive motors</i>	420 bar
Pressão de operação, bocal de sucção, <i>raising</i>	175 bar
Pressão de operação, bocal de sucção, <i>swivelling</i> (giratório)	175 bar
Pressão de operação, cilindro do contentor	175 bar
Pressão de operação, <i>Accumulator filling system</i> (Suspensão dianteira)	185 bar
Pressão de operação, sistema de travagem	140 bar
Contentor, elevação/inclinação manual	Bomba de mão
Tanque de óleo hidráulico	Integrado no chassis
Tipo de óleo hidráulico	Texaco Rando HD-Z-32 / DIN 51524: HLP/3, ISO:VG32-6743/4 HV
Capacidade do tanque de óleo hidráulico	100 litros

3.2 Funcionamento da Varredoura

A operação da Varredoura é exemplificada na figura 5 com os seus itens numerados de um a nove.

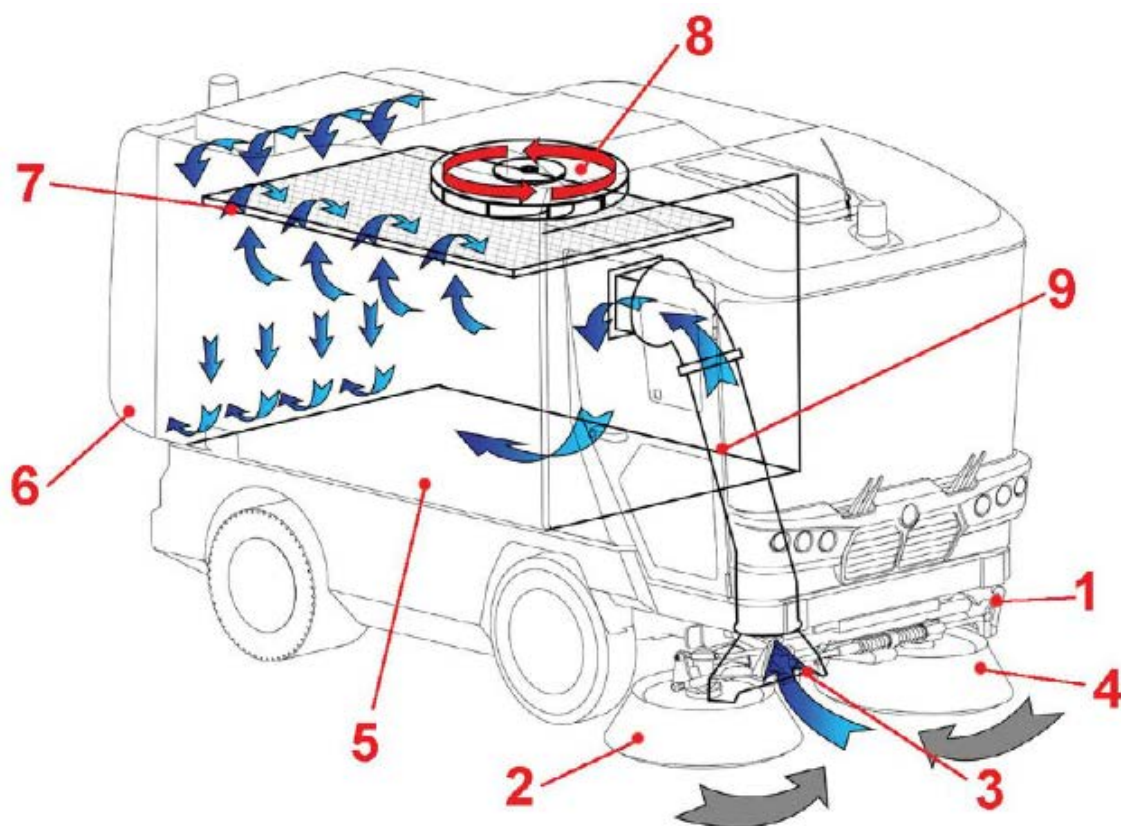


Figura 5: Operação da Varredoura (Ravo, 2015)

Segue-se uma explicação do modo de funcionamento da Varredoura em causa, com referência aos elementos assinalados na figura 5. O bocal de aspiração (3) ajustável em altura, aspira o lixo que foi empurrado pelas escovas (2) e (4) que giram no sentido indicado na figura 5. A ventoinha de sucção (8) assegura que há uma pressão negativa no contentor (5). Este fluxo de ar entra no contentor juntamente com o lixo via bocal de aspiração (3) e tubo de sucção (9).

A água é injetada a alta pressão através de dois tubos junto ao bocal de aspiração (3). A função destes pulverizadores é de juntar o lixo e com isso o lixo é compactado de forma eficiente no contentor (5), lixo muito fino pode ser expelido novamente da máquina. A água tem o objetivo de servir como lubrificante o que reduz a fricção, desgaste e contaminação. A água é também injetada junto às escovas (2) e (4), para

evitar a formação de nuvens de pó em situações de tempo seco. Não sendo necessário água nas escovas (2) e (4) em tempo de chuva.

Como resultado deste tipo de construção e sistema de sucção o lixo é mantido na traseira do contentor de forma compactada (e não lixo por queda, como em alguma concorrência).

As duas grelhas (7) e a ventoinha de sucção (8) que faz a força de sucção estão localizadas no topo do contentor (5). O ar em excesso é expelido pela ventoinha de sucção (8) na zona da porta (6) do contentor (5) (Ravo, 2015).

Acerca da manutenção da Varredoura, é necessário mudar com regularidade os bocais de água das escovas e bocal de aspiração central, escovas, filtro de ar do motor, filtro de óleo do motor e filtros de óleo de outros sistemas (tais como travagem/suspensão dianteira, tração hidrostática, etc.), filtro de combustível, filtro do tanque de água, filtro de ar da cabine, correias (motor, bomba de água e compressor do ar condicionado) e óleos de motor e sistemas hidráulicos.

Uma das vantagens da Varredoura Ravo 540 STH, é possuir poucos pontos de lubrificação. A tabela 8 lista os pontos de lubrificação com a informação da frequência de lubrificações e os respetivos itens (ilustrados na figura 6).

Tabela 8: manual de manutenção da Varredoura – Lubrificação (Ravo, 2015)

Número do item (figura 6)	Nome	Frequência
1	Bocal de aspiração/Roda.	Semanalmente
2	Base dos macacos hidráulicos.	Mensalmente
3	Pinos giratórios do contentor.	Mensalmente
4	Topo dos macacos hidráulicos.	Mensalmente
5	Pinos giratórios da haste de travamento.	Mensalmente
6	Pinos giratórios do veio <i>boomerang</i> .	Mensalmente
7	Cabeças de suspensão	Mensalmente
8	Anel de rotação do tubo de aspiração.	Mensalmente
9	Cilindro basculante (ou cilindro ejetor).	Mensalmente
10	Pontos de articulação dos braços de despejo do contentor.	Mensalmente
11	Articulação da coluna de direção.	A cada 3 meses

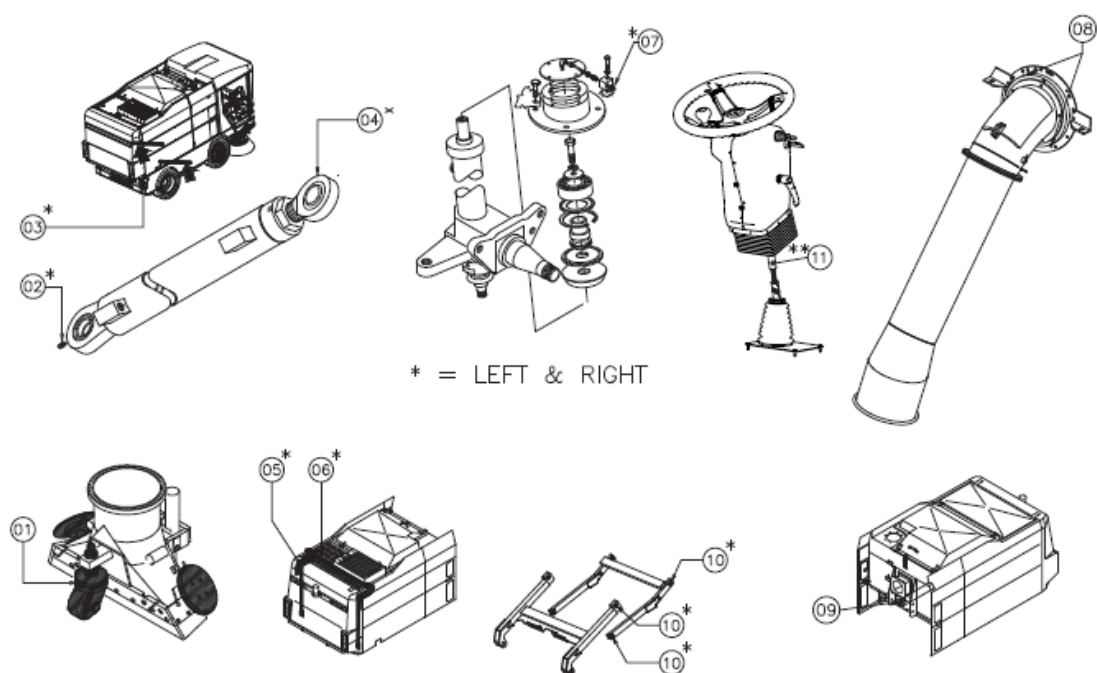


Figura 6: Manual de manutenção da Varredoura – Lubrificação (* PTFE grease, **NLGI grade 2 grease) (Ravo, 2015)

Todos estes pontos são lubrificados a partir de reservatórios de massa ligados a pontos físicos de lubrificação, com a frequência indicada na tabela 8, de modo a evitar modos de falha, principalmente o desgaste por corrosão.

3.3 Localização de Componentes da Varredoura

Nas figuras seguintes são indicados os locais dos principais componentes da Varredoura.

Na figura 7 é possível identificar alguns elementos que se encontram dentro da Cabine da Varredoura, nomeadamente o Painel *iSystem LED Display* (1), a coluna de direcção (2), os pedais (3), o sistema de aquecimento (4) e o *Dashboard* (5).



Figura 7: Localização de componentes na Cabine da Varredoura (Ravo, 2015)

No exterior da Varredoura tem-se, na figura 8, o sistema de escovas (1), a porta do contentor (2), a porta de serviço (3) e por fim o contentor (4).



Figura 8: Localização dos componentes no exterior da Varredoura (Ravo, 2015)

Na figura 9, na zona por debaixo do contentor, encontram-se alguns elementos, nomeadamente, a tampa do combustível (1), a tampa do depósito de óleo hidráulico (2), os descansos de segurança (3) e o depósito de AdBlue (não aplicável ao modelo estudado).

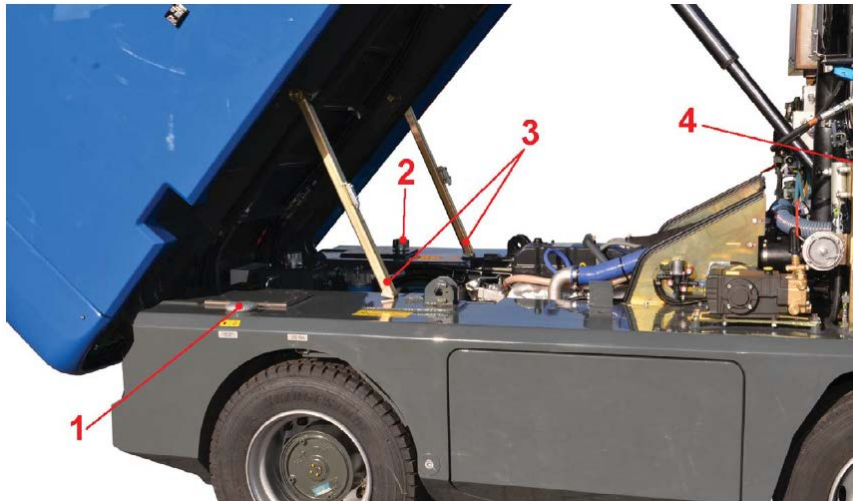


Figura 9: Localização dos componentes debaixo do contentor da Varredoura (Ravo, 2015)

Na figura 10 é possível identificar alguns elementos que se encontram junto à cabine e acessíveis pela porta de serviço, nomeadamente a ligação para enchimento do tanque de água (com capacidade para 500L) e a bomba hidráulica de mão (método alternativo para elevar o contentor).

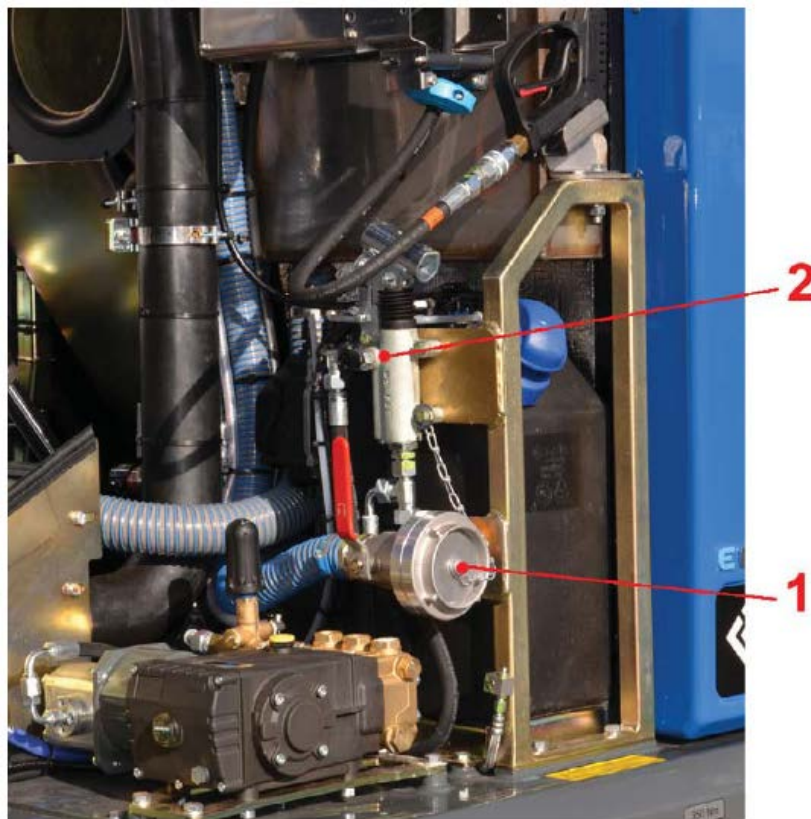


Figura 10: Localização de componentes na porta de serviço da Varredoura (Ravo, 2015)

A figura 11 mostra a zona de acesso à curvatura do tubo de aspiração (que se encontra no interior da cabine), onde estão presentes a porta de inspeção do tubo de aspiração (1) e a porta de inspeção da curvatura do tubo que liga à zona onde está a ventoinha de sucção (2).

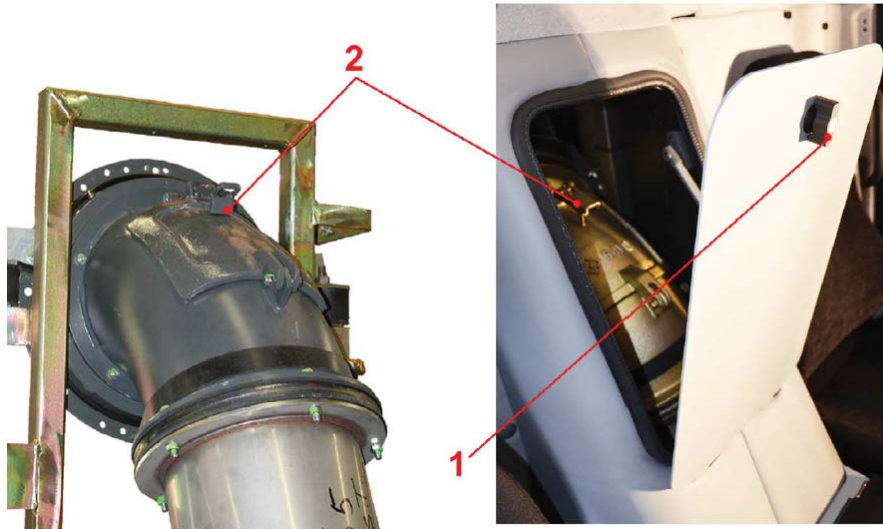


Figura 11: Tubo de aspiração da Varredoura (Ravo, 2015)

A figura 12 mostra a zona de baterias no interior da cabine (no modelo estudado as baterias estão acessíveis via porta de serviço), onde se encontram duas baterias de 12V.



Figura 12: Baterias da Varredoura (Ravo, 2015)

Na figura 13 é possível identificar a bomba de alta pressão (1) que fornece pressão à pistola de água. A bomba de alta pressão está acessível a partir da porta de serviço.



Figura 13: Porta de serviço, bomba de alta pressão da Varredoura (Ravo, 2015)

Na figura 14 é visível a chave para desligar o terminal positivo das baterias (1), usada para isolar o terminal positivo da bateria dos sistemas elétricos da varredoura.

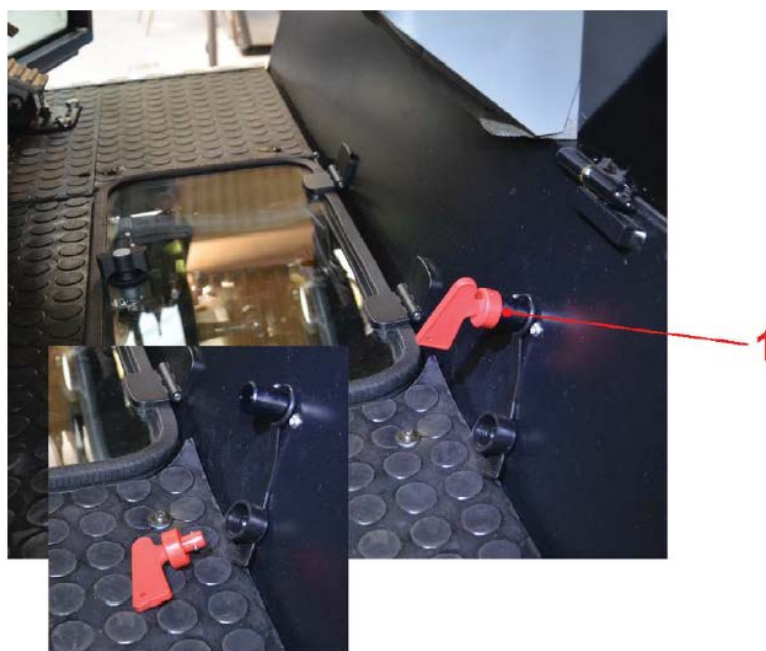


Figura 14: Terminal positivo das baterias da Varredoura (Ravo, 2015)

Na figura 15, é possível identificar o *Vehicle Identification Number* (V.I.N.) na cabine (1) e o *Vehicle Identification Number* (V.I.N.) no chassis (2) próximo da bomba de alta pressão.

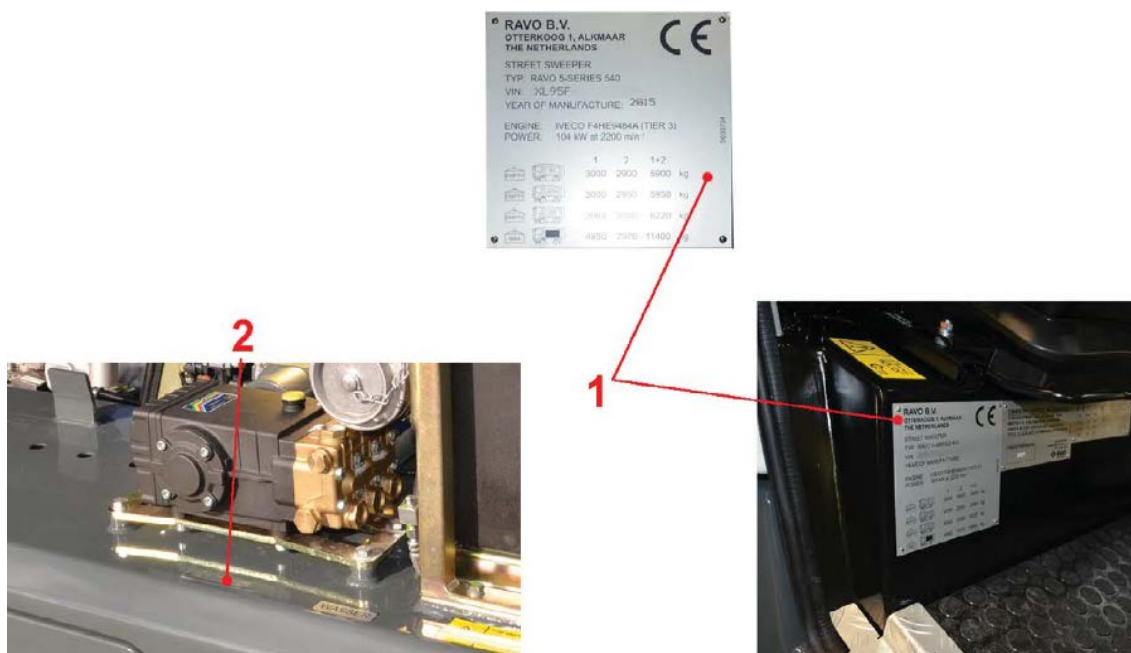


Figura 15: Números de identificação da Varredoura (Ravo, 2015)

3.4 Sistemas da Varredoura

Os sistemas e subsistemas principais da Varredoura foram divididos, de acordo com os componentes mencionados no manual da Ravo (Ravo, 2015), em:

1. Sistema Motor, do qual fazem parte os subsistemas: turbo compressor de geometria varável, acoplamento elástico, suportes de motor, sistema de escape e isolantes, filtro de ar, filtro de combustível, filtro de óleo, correia do motor, correia da bomba de água, bomba de água, bomba de óleo, motor de arranque, alternador, cablagens do subsistema elétrico e tubagens diversas.
2. Sistema Chassis, do qual fazem parte os subsistemas: suspensão traseira (via sinoblocos), motores das rodas traseiras, redutor planetário, rodas da frente e traseiras, tanque de combustível, suportes do tanque de combustível, baterias, suporte das baterias, sensor do contentor, ferragens de conexão do contentor ao chassi e o amortecedor de cabine.
3. Sistema Cabine, do qual fazem parte os subsistemas: portas e janelas, sistema de escovas dos vidros, luzes, placas do chão da cabine, coluna de

direção, extintor, *dashboard* e comandos das escovas, painel de instrumentos, caixa de fusíveis, subsistema de aquecimento, filtro de ar da cabine, controlo remoto da cabine e os espelhos.

4. Sistema Contentor, do qual fazem parte: fechaduras da porta do contentor e portas de serviço, cilindro da porta do contentor, janela de inspeção do contentor, grelha interior para filtrar o lixo, ventoinha de aspiração, filtro de óleo, grelhas do topo do contentor, radiador de óleo, sistema basculante do contentor, extensão do tubo flexível de aspiração, subsistema de lavagem da ventoinha de aspiração, contentor e porta traseira do contentor.
5. Sistema Hidráulico, do qual fazem parte os subsistemas: bomba hidráulica de mão, manómetros e tubagens diversas e ligações ao tanque hidráulico, bomba hidráulica, bomba hidráulica do cilindro basculante, bomba de direção, tanque hidráulico e respetivos filtros, filtro de óleo do subsistema de suspensão hidropneumática.
6. Sistema de Travões, do qual fazem parte os subsistemas: pastilhas de travão, discos de travão, rolamentos, maxilas de travão, sistema de travões de tambor, subsistema de pedal de travão e subsistema de travão de mão.
7. Sistema do Tubo de Aspiração Central, do qual fazem parte os subsistemas: tubo de aspiração e secção de tubo curvo com porta de inspeção.
8. Sistema de Suspensão, do qual fazem parte os subsistemas: suspensão frontal, subsistema de direção e acumuladores.
9. Sistema de Escovas Rotativas, do qual fazem parte os subsistemas: estrutura de suporte, cilindros hidráulicos para movimento horizontal e vertical, escovas PVC, escovas metálicas e motor hidráulico das escovas.
10. Sistema da Bomba de Água de Alta Pressão, do qual fazem parte os subsistemas: pistola de água, enrolador e mangueira e a bomba de alta pressão.
11. Sistema de Água, do qual fazem parte os subsistemas: bomba de água, válvulas e filtro de água, tanque de água e filtro têxtil, tubos de água das escovas e tubo de água do bocal de aspiração central.

12. Sistema de Aspiração de Folhas, do qual fazem parte os subsistemas: tubo de aspiração em metal e secções de tubo de aspiração flexível.
13. Sistema de Aspiração Central, do qual fazem parte os subsistemas: rodas guia laterais, roda de borracha central, aventais de borracha, cilindro hidráulico para nivelar o bocal de aspiração e o bocal central.
14. Sistema de Ar Condicionado (AC), do qual fazem parte os subsistemas: compressor do AC, correias do compressor do AC, subsistema de aquecimento (permutador de calor) e todo o subsistema AC (condensador, filtro secador, ventoinha e tubagens).
15. Sistema de Câmara, do qual fazem parte os subsistemas: câmara e cablagens, visor e respetivo suporte.

Em relação ao sistema motor apresentado na figura 16, trata-se de um motor diesel fabricado pela Iveco Industrial, versão tier 3/Fase IIIA (*Tier 3 NOx emission limits*, sem sistema ABS(a) e AdBlue), de quatro cilindros, 4.5L e 560 Nm @ 1400 r.p.m common-rail com turbo-compressor.

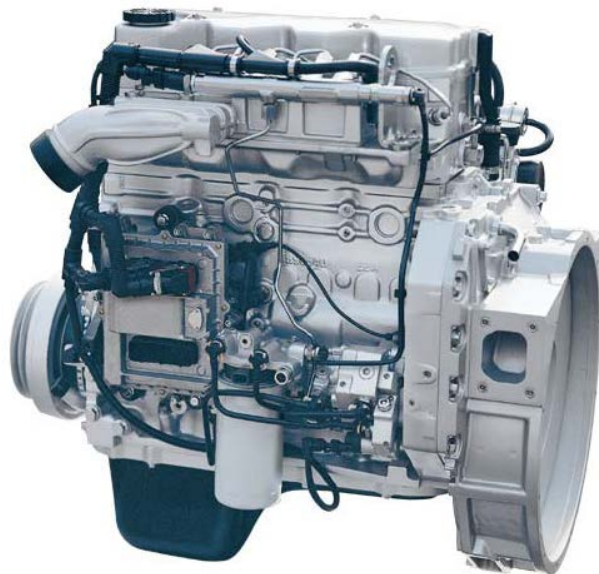


Figura 16: Iveco Tier 3 / Stage III engine N45 ENT (Ravo, 2011)

O motor vai depois alimentar a sistema de tração hidrostática do grupo Linde, as vantagens deste tipo de tração é o de não usar uma transmissão convencional com caixa de velocidades e embraiagens e veio de transmissão tornando o sistema mais simples e

compacto e com pouca manutenção, é normalmente usado em máquinas que operam com velocidades baixas e que necessitam de boa disponibilidade de binário máximo.

O sistema de tração hidrostática é de uma forma geral um circuito fechado de óleo com pouca manutenção, tornando a máquina com uma aceleração e travagem mais suaves, ocupa pouco espaço e é fiável dado que a transmissão é mais simples e por isso não temos as peças de uma transmissão convencional a lidarem com uma carga máxima de cerca de onze toneladas. Na figura 17 apresenta-se uma listagem de algumas das características do sistema hidrostático da Linde (versus empilhadora sem tração hidrostática) onde não há necessidade de um diferencial, conversor de potência e embraiagem, havendo assim um melhor aproveitamento da energia produzida pelo motor de combustão (a máquina em estudo a Ravo 540 STH tem sistema de travões de disco e tambor e desmultiplicadores nas rodas traseiras (*Reduction Gear Box-Planetary Gear*), devido ao peso/força de inércia da máquina).

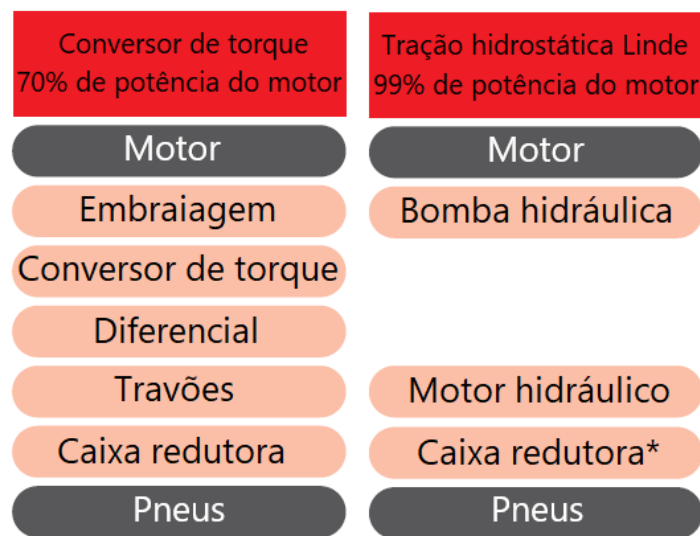


Figura 17: Linde Hydrostatic Drive. *not required on 2 to 3.5 t models (Adaptado (Linde, 2014))

Um sistema de acionamento hidrostático (constituído por um acoplamento que liga o motor diesel ao veio de uma bomba hidráulica) envia energia do motor diesel para a bomba hidráulica da Varredoura. A bomba hidráulica distribui a energia hidráulica pelos dois motores hidráulicos, um para cada roda, havendo assim, uma transformação em energia mecânica quando chega nas rodas. A figura 18 ilustra o funcionamento da tração hidrostática.

Em relação ao chassis, é construído em aço Corten de 4mm, conhecido pela alta resistência à corrosão, abrange uma série de subsistemas como a suspensão traseira, rodas, baterias, etc. O contentor é em aço inox de 5 m³ com uma proteção exterior em plástico ABS(b), abrange vários subsistemas descritos na tabela de sistemas e subsistemas. A cabine é constituída pelos vidros das portas e para-brisa, aço e plástico ABS(b) e todos os itens descritos na tabela de sistemas e subsistemas, tais como direção, controlos remotos, placas em aço do chão da cabine, caixa de fusíveis, etc.

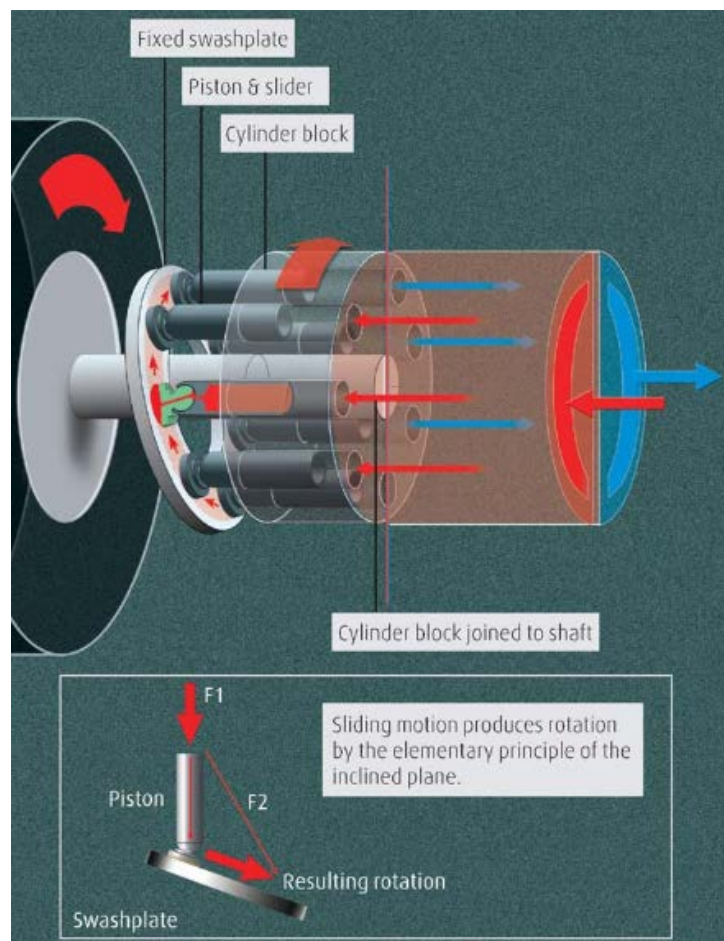


Figura 18: Funcionamento da tração hidrostática (Linde, 2014)

O sistema hidráulico, um dos mais importantes da Varredoura, é constituído pela bomba hidráulica de mão (método alternativo de elevar o contentor), bomba hidráulica de direção, bomba hidráulica da ventoinha de sucção, a *Boost Pump* para elevar o contentor, a bomba que alimenta a tração hidrostática *Drive Pump* e a maioria dos

sistemas hidráulicos (regulados por um compensador ou *Hydraulic Manifold* em mais ou menos 10 Bar, representado na figura 19).



Figura 19: *Hydraulic Manifold* (Compensador +- 10 Bar). Válvulas para controlar os sistemas hidráulicos (Ravo, 2013)

O sistema de travões é composto por um sistema de travões de disco às rodas da frente de duplo pistão e travões de tambor às rodas traseiras, sistema de travão de mão e pedal de travão.

O sistema da estrutura de sucção é constituído por uma conduta de aspiração em aço e um troço em aço com uma porta de inspeção. É um sistema entre o sistema de aspiração central (bocal central de aspiração) e a ventoinha de sucção (dentro do sistema Contentor) situada no topo do contentor. A ventoinha de sucção está representada na figura 20.

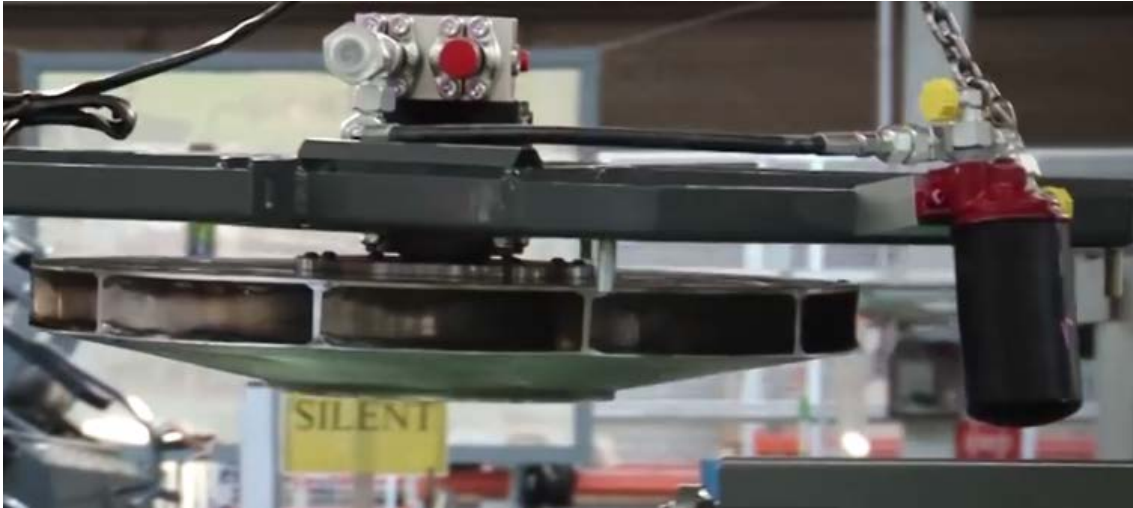


Figura 20: Montagem da Ventoinha de Sucção (Ravo, 2013)

O sistema de suspensão no eixo frontal é constituído por um subsistema de direção, subsistema de suspensão *McPherson* hidropneumática e controlo de altura (sensores eletrónicos) e subsistema de acumuladores ou vasos de expansão (dois tanques) para nivelar com suavidade a altura da frente da máquina.

O sistema de escovas (duas escovas) é constituído pelos subsistemas; estrutura de suporte, circuito hidráulico e braços para movimentar as escovas em várias direções e dois motores hidráulicos do fabricante *Parker*, um para cada escova.

O sistema da bomba de alta pressão, constituído pela pistola de água, enrolador e mangueira e uma bomba de alta pressão situada na zona da porta de serviço.

O sistema de água é constituído por um tanque de seiscentos litros de água e filtro têxtil, bomba de água do fabricante *Tellarini*, válvulas e um segundo filtro de água, dois injetores de águas por cada escova e outros dois junto ao bocal central de aspiração.

O sistema de aspiração de folhas é constituído por um tubo em secções em aço e tubo flexível em *Abraflex* (figura 21), ligado à ventoinha de sucção.



Figura 21: Tubo de aspiração de folhas na porta do contentor

O sistema de aspiração central é constituído por um bocal em aço (que liga ao tubo vertical em aço), duas rodas de suporte, aventais de borracha e cilindro hidráulico para nivelar o bocal de aspiração.

O sistema de ar condicionado é constituído por um compressor, correias, subsistema de aquecimento e condensador, ventoinha e filtro desumidificador localizados no topo da cabine.

Por fim, referência para a existência de um sistema de câmara traseira com os respetivos suportes, visor, câmara e cablagens.

No próximo Capítulo será aplicada a metodologia descrita no Capítulo 2 (FMEA) à Varredoura Compacta Urbana apresentada no presente Capítulo, por forma a consolidar o objetivo proposto para o presente trabalho.

4 Caso de Estudo

O caso de estudo consiste em explorar os riscos e as falhas reportadas no histórico de manutenção da Varredoura Ravo 540 STH. O objetivo é aplicar a metodologia FMEA, após identificação dos sistemas e subsistemas, indicar os respectivos modos de falha, classificar a probabilidade de ocorrência, a severidade das consequências de cada modo de falha e a existência de meios de controlo e determinar o correspondente RPN.

A Varredoura está preparada para trabalhar nas quatro estações do ano, em frio ou calor extremo, em zonas urbanas ou rurais, adequada a qualquer tipo de via. No entanto devido à exposição aos elementos, à força de aspiração com que o lixo embate na Varredoura (pedra, vidro, etc.), às fortes pressões usadas para lavagem, o uso de um complexo sistema hidráulico e os seis dias de operação por semana, fazem com que a Varredoura fique mais sujeita a falhas.

Como base da FMEA foi criada uma tabela, em que para cada sistema e subsistema/item está descrita a sua função, respetivo modo(s) de falha, causas, consequências e meios de deteção. Para cada subsistema/item é calculado o RPN, com a atribuição dos níveis de ocorrência, severidade e detetabilidade de cada modo de falha.

Por fim serão apresentadas sugestões ou recomendações de ações com vista à diminuição do risco associado a cada modo de falha.

4.1 Critério de aceitação

No presente caso de estudo começou-se por definir três níveis de aceitação do risco, tendo em consideração os RPN a determinar. A figura 22 mostra a escala adotada para o critério de aceitação.

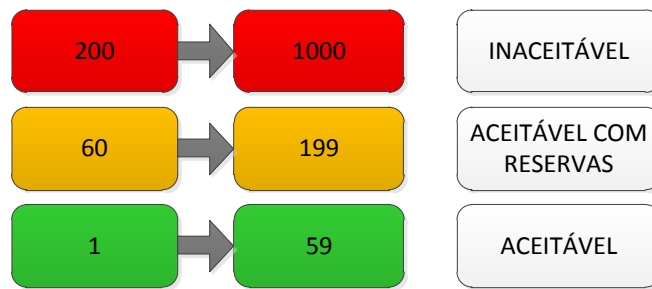


Figura 22: Critério de aceitação do risco

Todos os modos de falhas que sejam classificados como “Aceitável” não necessitam de qualquer ação imediata. Caso os modos de falha se classifiquem como “Inaceitável”, terá de haver uma proposta de melhoria do RPN, ou seja, proposta de ações que conduzam a uma diminuição do respetivo RPN para níveis que se situam pelo menos como “Aceitável com Reservas”. Os modos de falha classificados neste nível intermédio serão analisados numa segunda fase, após serem eliminados todos os modos de falha classificados como “Inaceitável”.

4.2 Análise macro

Os valores atribuídos para as probabilidades de ocorrência (O) e para a severidade das consequências (S) tiveram em consideração um registo histórico do Departamento de Manutenção de uma entidade que possui e gere o tipo de veículo em estudo, no caso uma autarquia local. No Anexo I apresenta-se um extrato do registo histórico das anomalias e intervenções realizadas no veículo em estudo, referente a um período de aproximadamente 3 anos.

Procedeu-se então ao preenchimento da tabela FMEA proposta para este tipo de análise, com vista à determinação do RPN individual dos modos de falha. Tendo em consideração os valores alcançados para este indicador, apresenta-se um gráfico onde se pode constatar a divisão da classificação quanto ao critério de aceitação dos RPN determinados (figura 23).



Figura 23: Dispersão da quantidade de modos de falha pelos critérios

Dos 108 modos de falha identificados para o veículo em estudo em todos os sistemas analisados, e conforme se pode constatar pela figura 23, existem 6 modos de falha (5%) que são considerados como inaceitáveis, 58 modos de falha (54%) que se consideram aceitáveis, mas com reservas por apresentarem RPN elevados. Os restantes 44 modos de falha (41%) são aceitáveis em termos de risco, por possuírem RPN relativamente baixos. No Anexo II apresenta-se a tabela completa correspondente à FMEA realizada sobre a Varredoura Compacta Urbana.

4.3 Análise detalhada

Tendo em consideração aos modos de falha classificados como “Inaceitável” no presente estudo, existe a necessidade de realizar uma análise mais detalhada e profunda dos mesmos. A tabela 9 apresenta um resumo da análise efetuada, onde apenas se apresentam os modos de falha críticos, classificados como inaceitáveis.

Tabela 9: Resumo dos modos de falha com classificação “Inaceitável”

Sistema	Subsistema / Item	Função	Modo de Falha
Contentor	Ventoinha de aspiração.	Aspirar lixo do pavimento e criar pressão negativa dentro do contentor.	Colapso da ventoinha. Desgaste.
Sistema de Água	2 tubos de água em cima dos pratos das escovas (esquerda e direita), metálicos.	Evitar a formação de poeiras durante o processo de lavagem. Preservação das escovas.	Desgaste.
Motor	Turbo compressor de geometria variável.	Aumentar a potência do motor, fornecendo ar comprimido à câmara de combustão, com uma densidade maior. A geometria variável permite mudança de inclinação das palhetas controlando a rotação da turbina, fornecendo mais potência ao motor em diferentes faixas de rotação.	Desgaste do veio. Desequilíbrio das pás do turbo. Quebra de alhetas do turbo.
Sistema de Escovas rotativas	2 motores hidráulicos (um para cada escova).	Criar movimento de rotação nas escovas.	Desgaste. Deformação do veio do motor.
Motor	Bomba de Óleo.	Fazer a lubrificação forçada do motor.	Desgaste das peças móveis. Fuga.
Motor	Bomba de Água.	Fazer circular o líquido refrigerante pelo radiador e bloco de motor.	Fuga. Corrosão. Desgaste do rolamento e veio.

A tabela 10 mostra os valores atribuídos à probabilidade de ocorrência das causas (O), nível de severidade das consequências (S) e detetabilidade dos meios de

deteção (D) para os modos de falha indicados na tabela anterior, onde é possível verificar os RPN alcançados.

Tabela 10: Valorização dos fatores FMEA com RPN individuais

Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
Colapso da ventoinha. Desgaste.	Desiquilíbrio da ventoinha por acumulação de lamas. Desgaste provocado por colisão de detritos que passam através da grelha de proteção.	5	Inoperabilidade do aspirador (função principal da máquina).	8	Não existe.	10	400
Desgaste.	Erosão/Corrosão do bocal devido à alta pressão da água.	5	Inviabilização da lavagem do pavimento (aspersores) e lubrificação das escovas. Formação de poeiras durante o processo de lavagem.	6	Não existe.	10	300
Desgaste do veio. Desiquilíbrio das pás do turbo. Quebra de alhetas do turbo.	Fuga no sistema de lubrificação. Impurezas no fluxo de ar. Degradação na ligação das tubagens. Altas temperaturas.	4	Redução da capacidade de aceleração. Perda de óleo no motor/ Motor danificado.	8	Inspeção visual do turbo e tubagens. Turbo com Ruído Estranho. Cor do fumo de escape.	8	256
Desgaste. Deformação do veio do motor.	Por impacto num passeio. Por detritos na parte superior do disco das escovas. Uso intenso desgastando os anéis de vedação. Óleo hidráulico contaminado.	5	Impossibilita a rotação da escova e consequentemente também impossibilita remoção.	5	Não existe.	10	250
Desgaste das peças móveis. Fuga.	Número de horas de serviço elevadas. Degradação dos vedantes. Óleo com impurezas. Altas temperaturas.	3	Sobreaquecimento do motor. Danos no motor por falta de lubrificação.	8	Não existe.	10	240
Fuga. Corrosão. Desgaste do rolamento e veio.	Alta temperatura. Líquido anticongelante contaminado ou não adequado. Cavitação. Número de horas de serviço elevadas. Correia com tensão não adequada ou desalinhada.	3	Sobreaquecimento do motor.	7	Não existe.	10	210

Tal como se pode constatar, o modo de falha mais crítico (maior RPN) é o desgaste da ventoinha instalada no contentor. Na Tabela anterior apresentam-se as causas deste modo de falha, assim como as potenciais consequências e a constatação de

que não existe atualmente qualquer meio de detecção atempado deste modo de falha. Seguem-se os modos de falha do sistema de água, nomeadamente dos dois tubos de água em cima dos pratos das escovas (esquerdo e direito), onde o modo de falha mais previsível é o desgaste dos mesmos. Em terceiro lugar aparece o desgaste do turbocompressor de geometria variável, seguido do sistema de escovas rotativas, onde o modo de falha mais previsível é o desgaste dos motores hidráulicos. Em quinto lugar aparece a bomba de óleo sujeita a desgaste das peças móveis e a fugas. Por último, aparece a bomba de água, suscetível a fugas, corrosão e desgaste do rolamento e veio.

4.4 Ações recomendadas

De acordo com o descrito na teoria referente ao modelo de análise FMEA, é necessário apresentar propostas para diminuir os RPN dos modos de falha considerados como “Inaceitável”. Estas propostas deverão conduzir os novos RPN, ou RPN revistos (RPN_R), para níveis de aceitação considerados aceitáveis (“Aceitável” ou “Aceitável com Reservas”).

Desta forma, procedeu-se a uma análise mais profunda dos seis modos de falha anteriormente apresentados, no sentido de verificar qual o fator, ou fatores, que mais influencia(m) o RPN individual (O/S/D).

Quanto ao modo de falha referente ao desgaste da ventoinha instalada no contentor verifica-se que todos os fatores são valorizados com números penalizadores (altos), com especial destaque para a severidade das consequências ser “Muito Alta” (8) e para a detetabilidade com “Incerteza Absoluta” de Detecção (10), pese embora a probabilidade de ocorrência também seja também classificada como “Moderada” (5). Para esta situação propõe-se:

1. Promoção de lavagem mais frequente e eficiente do sistema, eliminando material agregado às pás.
2. Instalação de sensor de vibração da ventoinha, com leituras periódicas por parte do pessoal da manutenção, para aferição de desequilíbrio.

Nestas circunstâncias, passava-se a ter uma valorização diferente para a probabilidade de ocorrência, fruto da implementação da primeira medida, baixando o

valor de “O” de 5 para 3. De igual modo, melhorava-se a detetabilidade do modo de falha ao implementar a medida “2”, pois atempadamente havia a percepção do desenvolvimento de um potencial modo de falha. Neste caso, o valor de “D” poderia passar de 10 para 5. Tendo por base esta nova valorização, alcançar-se-ia um RPN_R de 120, o que altera o critério de aceitação de “Inaceitável” para “Aceitável com Reservas”.

Para o modo de falha do sistema de água, nomeadamente no que se refere aos dois tubos de água e respetivos bocais que promovem uma melhor limpeza do pavimento, o modo de falha principal consiste na degradação dos bocais. Verifica-se que os meios de deteção são inexistentes e com uma ocorrência e consequência(s) elevadas, respetivamente, um valor “D” classificado com “Incerteza Absoluta” de Deteção (10), um valor de probabilidade de ocorrência “O” classificada como “Moderada” (5) e um valor de severidade “S” classificada também como “Moderada” (6). Para esta situação propõe-se:

1. Uso de um material diferente (mais resistente ao desgaste) no bocal ou alternativamente proceder-se a um tratamento superficial deste elemento;
2. Realizar uma inspeção mais detalhada e com maior frequência ao bocal.

A valorização, após aplicação destas medidas, passaria para um valor de 3 para “O” e a detetabilidade iria ser melhorada sendo mais fácil prever a ocorrência do referido modo de falha, com a diminuição do valor de “D” para 5. Tendo por base esta nova valorização, alcançar-se-ia um RPN_R de 90, o que alteraria o critério de aceitação do modo de falha de “Inaceitável” para “Aceitável com Reservas”.

Para o modo de falha do turbo de compressor de geometria varável, que consiste no desgaste e desequilíbrio nas pás, verifica-se que os meios de deteção são inexistentes, com uma ocorrência elevada e com uma severidade ou gravidade das consequências considerada alta, respetivamente, uma classificação para “D” de “Remota Capacidade de Deteção” (8), uma classificação para a probabilidade de ocorrência “O” de “Moderada” (4) e uma classificação para “S” de “Muito Alta” (8). Para esta situação propõe-se:

1. Uso de materiais/soluções junto do fabricante mais resistentes ou com tratamentos de superfície e promover um sistema de arrefecimento do turbo mais eficiente;
2. Aplicação de sensores para medição de temperatura, medição da rotação do turbo, medição da pressão de ar do turbo com maior sensibilidade e medição da pressão de óleo no turbo.

Apesar de algumas destas medidas dizerem respeito diretamente ao projeto dos sistemas instalados na Varredoura, passando naturalmente pelo fabricante, considerou-se no presente estudo a aplicação das mesmas na determinação do novo RPN. A valorização, após aplicação destas medidas, passaria por prever para a probabilidade de ocorrência “O” uma valorização de 3 e uma melhoria da detetabilidade, passando esta a ter um valor 6. Tendo por base esta nova valorização, alcançar-se-ia um RPN_R de 144, o que alteraria o critério de aceitação de “Inaceitável” para “Aceitável com Reservas”.

Para o modo de falha inerente aos motores hidráulicos das escovas, que consiste fundamentalmente no desgaste dos vedantes, na contaminação do óleo e nas deformações das peças móveis, o desgaste é agravado pelo facto da sujidade se acumular no topo do prato das escovas na zona onde se encontra o motor hidráulico, assim como devido às cargas sofridas durante a lavagem normal do pavimento ou devido ao eventual impacto num passeio ou muro. Verifica-se que os meios de deteção são inexistentes, com uma ocorrência elevada (tendo em conta a informação junto do representante da RAVO) e com consequência(s) baixas, atribuindo-se respetivamente uma classificação para a detetabilidade “D” de “Incerteza Absoluta” de Deteção (10), uma probabilidade de ocorrência “O” classificada como “Moderada” (5) e uma severidade das consequências “S” classificada como “Baixa” (5). Para melhorar esta situação propõe-se:

1. Propor uma solução de melhoria do projeto junto do fabricante, dando como exemplo prever uma construção mais resiliente a impactos, através de um sistema de amortecimento nos braços das escovas;
2. Promover um isolamento do motor contra líquidos e poeiras;
3. Prever uma inspeção visual da bomba com intervalos mais reduzidos.

Desta forma, assumindo a implementação das medidas anteriores, a valorização da probabilidade de ocorrência “O” passaria para 3 e a detetabilidade “D” iria ser melhorada passando para um valor de 8. Tendo por base esta nova valorização, alcançar-se-ia um RPN_R de 120, o que altera mais uma vez o critério de aceitação, passando este modo de falha de “Inaceitável” para “Aceitável com Reservas”.

O modo de falha inerente à bomba de óleo do motor consiste no desgaste acentuado dos vedantes e peças móveis, devido à contaminação do óleo e a um número elevado de horas de serviço. Este é um bem sujeito a altas temperaturas, possuindo eixos e válvulas em aço tratado termicamente, com engrenagens em ferro sinterizado e corpo em ferro fundido. Verifica-se que os meios de deteção são inexistentes e com uma ocorrência baixa, mas com consequência(s) elevadas, atribuindo-se respetivamente uma classificação para a detetabilidade “D” de “Incerteza Absoluta” de Deteção (10), para a probabilidade de ocorrência “O” de “Baixa” (3) e para a severidade das consequências “S” de “Muito Alta” (8). Para melhorar esta situação propõe-se:

1. Propor o uso de materiais e juntas mais resistentes junto do fabricante;
2. Instalar um sensor de pressão de óleo com maior sensibilidade.

Assim, a valorização alcançada após a aplicação destas medidas, apresentaria um valor de probabilidade de ocorrência “O” de 2 e uma detetabilidade “D” de 7. Tendo por base estas novas valorizações, alcançar-se-ia um RPN_R de 112, o que novamente se traduz numa alteração do critério de aceitação deste modo de falha de “Inaceitável” para “Aceitável com Reservas”.

Por fim, o modo de falha inerente à bomba de água consiste no desgaste dos vedantes e peças móveis devido a impurezas, cavitação, degradação ou falta de líquido anticongelante, assim como a um número elevado de horas de serviço. É um bem também sujeito a altas temperaturas, e cuja operacionalidade está muito dependente do estado da correia (deterioração ou tensão incorreta). Verifica-se que os meios de deteção são inexistentes e com uma probabilidade de ocorrência baixa, mas com uma severidade das consequências elevadas, atribuindo-se respetivamente uma classificação para a detetabilidade “D” de “Incerteza Absoluta” de Deteção (10), para a probabilidade de ocorrência “O” de “Baixa” (3) e uma severidade ou gravidade das consequências “S” de “Alta” (7). Para melhorar esta situação propõe-se:

1. Propor o uso de materiais (rolamentos, veio, pás) mais resistentes junto do fabricante;
2. Propor a implementação de um filtro para o líquido anti-congelante, de modo a reter impurezas provenientes do bloco de motor/radiador;
3. Promover uma mudança mais frequente do líquido anti-congelante;
4. Instalar um sensor de vibração do veio da bomba de água, com leituras periódicas por parte do pessoal da manutenção, para aferição de desequilíbrio.

Desta forma, após aplicação das medidas propostas, passar-se-ia a ter uma valorização da probabilidade de ocorrência “O” de 2 e uma valorização da detetabilidade “D” de 7. Tendo por base esta nova valorização, alcançar-se-ia um RPN_R de 98. Mais uma vez se atingiam os objetivos de eliminação dos modos de falha classificados como “Inaceitável”, também passando neste caso para uma classificação de “Aceitável com Reservas”.

Com base em todas as ações recomendadas, e assumindo a sua implementação e consequente melhoria dos fatores em jogo, com reflexo no RPN_R de cada modo de falha considerado anteriormente como “Inaceitável”, apresentam-se de seguida as tabelas 11 e 12, onde aparecem agora novos itens só com os modos de falha classificados “Aceitável com Reservas” de forma ordenada dos RPN, decrescentemente.

Tabela 11: Valorização dos fatores da FMEA com RPN_R individuais “Aceitável com Reservas” (tabela parcial)

Sistema	Sub-Sistema / Item	Modo de Falha	O	S	D	RPN
Sistema de aspiração de folhas	Secções de tubo de aspiração flexível (em <i>Abraflex</i>).	Fuga. Desgaste.	8	8	3	192
Suction Pipe	Secção de tubo curvo com porta de inspeção.	Desgaste.	8	8	3	192
Motor	Injetores.	Bloqueado.	3	6	10	180
Motor	Filtro de Óleo.	Colmatação.	2	9	10	180
Contentor	Filtro de Óleo (dos cilindros hidráulicos da porta do contentor).	Colmatação.	2	9	10	180
Suspensão	Sistema de direcção.	Desgaste. Fuga.	2	8	10	160
Motor	Velas de incandescência.	Desgaste	5	3	10	150
Motor	Motor de arranque.	Desgaste.	3	5	10	150
Sistema de Água	Dois tubos de água para o bocal do aspirador central (com avental em borracha).	Desgaste.	3	5	10	150

Tem-se agora a tabela 11 como novo ponto de partida para uma análise e melhoria aos novos itens classificados como “Aceitável com Reservas”. O passo seguinte seria estudar estes novos itens, tal como foi feito para os itens com modos de falha classificados como “Inaceitável”.

Resumindo, este tipo de análise será dinâmico, com uma revisão periódica para atualização dos valores atribuídos à ocorrência “O”, detetabilidade “D” e severidade “S” (se aplicável). O impacto das recomendações aos itens de RPN mais elevado poderá ter consequências junto do fabricante, nomeadamente no planeamento da Manutenção ou mesmo implicando a introdução de novos sistemas ou subsistemas na Varredoura (originando uma tabela FMEA diferente da original).

5 Conclusões

Com a aplicação da metodologia FMEA foi possível verificar que se trata de um método de extrema importância na melhoria de fiabilidade de ativos físicos, como é o exemplo da Varredoura Compacta Urbana estudada no presente trabalho. Foi importante usar como base o registo histórico do Departamento de Manutenção de uma entidade que possui e gere o tipo de veículo em estudo (no caso uma autarquia local) para perceber quais os itens a necessitar de recomendações, apesar de não ter sido possível obter o histórico de avarias de todas as Ravo 540 STH a operar em Portugal, o que seria uma mais valia para a FMEA.

Para aplicar a FMEA foi necessário estudar os detalhes técnicos da Varredoura e dividi-la em sistemas e respetivos subsistemas. Como passo seguinte, após identificação dos modos de falha, foi necessário quantificar os índices de ocorrência “O”, severidade “S” e detetabilidade “D”. De seguida ordenou-se por ordem decrescente o número prioritário de risco RPN e analisaram-se os seis primeiros itens (com maior valor de RPN). Esta análise consistiu em analisar o(s) modo(s) de falha reportado(s) pelo Departamento de Manutenção que gere o veículo e efetuar recomendações de manutenção ou até mesmo sugerir alterações de projeto.

Este tipo de análise exigiu um estudo aprofundado do item e pesquisa por soluções, sempre o apoio do histórico de manutenção da Varredoura. No total dos 108 modos de falha, foram identificados 6 modos de falha classificados como inaceitáveis, 58 como aceitável com reservas e 44 como aceitáveis, de acordo com o critério da figura 22.

Para os 6 modos de falha classificados como inaceitáveis, com modos de falha relacionados com desgaste, fuga, colapso, quebra e desequilíbrio no caso da ventoinha de aspiração, foram recomendadas ações de manutenção mais rigorosas, tais como inspeções mais detalhadas e lavagens mais profundas no caso da ventoinha de aspiração, foram recomendadas também ações junto do fabricante, como a instalação de sensores, utilização de materiais mais resistentes ao desgaste e novos sistemas de arrefecimento e proteção contra poeiras, líquidos e impurezas.

Após revisão dos modos de falha com RPN mais elevado (ou seja, aos 6 itens com critério inaceitável), houve uma reavaliação dos índices de ocorrência “O”,

severidade “S” e detetabilidade “D” (para os seis itens avaliados o índice de severidade manteve-se).

Por fim houve nova ordenação decrescente do número prioritário de risco RPN_R , criando deste modo um novo cenário de análise da FMEA, contabilizando as recomendações no plano de manutenção da Varredoura (por exemplo para diminuir o índice de ocorrência “O”) e novos sistemas/subsistemas introduzidos (para melhorar/diminuir o índice de detetabilidade “D”) nos modos de falha mais críticos e considerados como inaceitáveis para o equipamento em estudo. Idealmente esta nova reordenação deveria existir depois de algum tempo de utilização da Varredoura, após aplicação das recomendações inicialmente aplicadas, ajustando deste modo os índices dos RPN de forma mais rigorosa.

Nessa nova ordenação decrescente do número prioritário de risco RPN_R , já sem itens com critério de aceitação do risco inaceitável, encontraram-se novos itens (64 modos de falha, classificados como aceitável com reservas) a necessitar de recomendações, como mostra a tabela 11, por exemplo o tubo de aspiração flexível sujeito a fuga e desgaste, devido à intempérie e desgaste provocado pelo lixo e a secção de tubo curvo onde o lixo colide antes de entrar no contentor, sujeita a desgaste.

Resumindo, a FMEA é um método essencial para otimização de um Produto/Projeto no caso da DFMEA ou de um Processo no caso de um PFMEA, sempre com a necessidade de verificar a informação existente nos registos do Departamento de Manutenção ou testes resultantes, ou mesmo com base na informação proveniente do cliente final, havendo assim uma realimentação da FMEA.

Referências bibliográficas

Adeco (2015). Adeco Emirates, Ravo 540 Technical Description, Dubai. <http://adeco.ae/wp-content/uploads/2015/07/RAVO-540-Technical-Description-2015.pdf>

AIAG (1995). Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Reference Manual. 2a. Edição QS9000.

Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming – AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 839-848.

Costa, D. (2010). Estudo dos Componentes, Mecanismos de Controlo e Modelos Probabilísticos de Fiabilidade de Sistemas de Energia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletromecânica. Universidade da Beira Interior (UBI).

Fattahi & Khalilzadeh (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*, Vol. 102, pp. 290-300.

Gargama, H., & Chaturvedi, S. K. (2011). Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis Using fuzzy logic. *Reliability, IEEE Transactions on*, 60(1), p. 102-110.

Haq, J., Lipol, L. S. (2011). Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. *IJBAS/IJENS*, 74-82.

Hirayama, M., Shinozaki, F., Kasai, N. and Otaki, T. (2018), Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, pp. 12584-12594

Ho, C. & Chen, M. (2018), Risk assessment and quality improvement of liquid waste management in Taiwan University chemical laboratories. *Waste Management*, Vol. 71, pp. 578-588

IATF (2016). International Automotive Task Force IATF 16949 Standard, Quality management system for organizations in the automotive industry (IATF 16949:2016). Retrieved from <http://www.aiag.org/quality/iatf16949/iatf-16949-2016>

IPQ (2007). NP EN 13306, Norma Portuguesa para terminologia de manutenção. Instituto Português da Qualidade, Almada.

ISO (2002). International Organization for Standardization, Quality management systems - Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations (ISO/TS Standard No. 16949). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/36155.html>

ISO (2009). International Organization for Standardization, Quality management systems - Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations (ISO/TS Standard No. 16949). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/52844.html>

Kang, J., Sun, L. Sun, H. and Wu, C. (2017). Risk assessment off floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA. Ocean Engineering, Vol. 129, pp. 382-388

Linde (2014). Linde Hydrostatic Brochure Efficiency. Retrieved from <http://linde-imhx.com/wp-content/uploads/2016/09/Hydrostatic-brochure-Efficiency.pdf>

Liu, H. C., Liu, I., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: a literature review, Expert systems with applications, 40(2), p. 828-838.

Moura, C. (2000). Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial (FMEA) Manual de Referência SAE J-1739. Instituto da Qualidade Automotiva, Brasil.

NPD Solutions (2016). Retrieved from <http://www.npd-solutions.com/fmea.html>

Pariazar, M., Shahrabi, J., Zaeri, M. S., & Parhizi, S. (2008). A Combined Approach for Maintenance Strategy Selection. Journal of applied sciences, 8, 4321-4329.

Pedrosa, B. M. (2014). Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL).

Ramos, Eliani F (2006). A gestão de Riscos usando FMEA. Revista Mundo PM número 10, 2006. Páginas 71 a 74.

Ravo (2011). Ravo 5-Series Option Book, Emaresa Chile. http://www.emaresa.cl/aseo/images/pdf/ravo/ravo_libro.pdf

Ravo (2013). Ravo Street Sweeping Machine – How its made. <https://www.youtube.com/watch?v=LgHRjivzBeQ>

Ravo (2015). Ravo 5-Series User Manual. <http://www.ravo-fayat.com>

ReliaSoft Corporation (2014). Applications and Benefits of FME and XFMEA. Retrieved from ReliaSoft Corporation for Reliability Software, Training and Consulting Services: <http://reliasoft.com/xfmea/benefits.htm>

Reliasoft Corporation (2018). Reliability Hotwire. Basic Concepts of FMEA and FMECA: <http://www.weibull.com/hotwire/issue46/relbasics46.htm>

Sharma, R. K., & Sharma, P. (2010). System failure behavior and maintenance decision making using, rca, fmea and fm. Journal of quality in maintenance engineering, 16(1), p. 64-88.

Smith, M. T. (2014). History of the FMEA. Retrieved from Elsmar: <http://elsmar.com/FMEA/sld011.htm>

Sobral, J., & Abreu, A. (2013). Manutenção Produtiva Total e Gestão Lean. Folhas de apoio à unidade curricular. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL).

Spreafico, C., Russo, D., & Rizzi, C. (2017). Review article: A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. Computer Science Review, 25 OP-In, 19. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.05.002>

Stamatis, D. H. (2003). Failure Mode Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. Milwaukee: American Society for Quality, Quality Press.

USA Department of Defense (1980). USA Department of Defense – Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, MIL-STD-1629A,

Washington, DC, November 24th, 1980. Retrieved from: https://www.weibull.com/mil_std/mil_std_1629a.pdf

Wang, W, Liu, X. Qin, Y. & Fu, Y. (2018). A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral, Safety Science, Vol. 110, pp. 152-163.

Wikipedia (2014). Failure Mode and Effects Analysis: https://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode_and_effects_analysis

ANEXOS

Anexo I - Histórico de Manutenção da Varredoura

Data da Intervenção	H. Motor / H. Serviço	Relatório
05.08.2015	175/101	Efetuar revisão das cem horas com substituição do óleo do motor, filtro de óleo, gasóleo e sistema hidráulico. Esticar correias bomba de água e ar condicionado.
02.09.2015	291/177	Substituição de pirilampo, dos fechos da grelha de proteção saída de água contentor, jato das escovas colagem da forra da porta. Verificação braço do tubo de aspiração.
22.09.2015	369/230	Deslocação da máquina para carregamento do ar condicionado, verificação da linha do ar condicionado.
28.10.2015	521/330	Fazer revisão do motor, mudar óleo e filtros. Substituir óleo dos cubos. Verificar níveis e fazer atestos. Afinar correias do motor. Verificar e reparar anomalias.
23.12.2015	760/480	Reaperto dos parafusos das electroválvulas do bloco hidráulico, efetuar revisão das 750 horas com verificação de níveis.
15.01.2016	842/541	Verificação do problema com central automática de lubrificação, desmontar a mesma para verificação do motor da bomba. Ensaio do motor da bomba.
19.02.2016	980/629	Substituição da central automática de lubrificação e respetivo comando temporizador. Ensaio da central para verificação geral e deteção fugas.
08.03.2016	1046/673	Revisão das 1000 horas. Fazer revisão do motor. Mudar óleo, filtros e óleo dos cubos. Verificar níveis e fazer atestos. Verificar correias do motor.
18.03.2016	1093/706	Troca extintor da varredora.
22.06.2016	1542/1003	Revisão das 1500 horas do motor com substituição óleo motor, filtros óleo, gasóleo e ar. Verificação fugas óleo. Substituição do óleo dos cubos.
15.07.2016	1644/1070	Verificar fuga de óleo hidráulico. Reapertar veio da electroválvula do bloco de tração e reapertar tubagem. Substituir filtro de ar da cabine. Ensaio e verificação.
17.08.2016	1780/1157	Substituição de automático de piscas. Verificar tubos de aspiração da varredora (sem anomalias, à exceção do tubo do mangote que está ressequido e amolgado).
06.09.2016	1885/1223	Verificar luzes traseiras. Substituir farolim stop e mínimos.
19.09.2016	1947/1264	Aguardar a chegada da Varredora. Montagem tubo flexível do mangote. Refazer instalação elétrica dos mínimos, stop e marcha atrás do lado direito traseiro.
27.09.2016	1980/1288	Verificação dos travões de parque. Afiinação dos cilindros do travão de parque. Verificação do sistema de lubrificação automática.
20.10.2016	2103/1367	Fazer revisão das 2000 horas. Verificações. Substituição Pirilampo Farol Marcha Atrás.
26.10.2016	2128/1385	Substituição do pirilampo traseiro. Substituição lâmpadas do quadrante instrumentos. Verificação luzes trabalho.
10.11.2016	2202/1436	Substituição buzina.
22.12.2016	2413/1570	Substituir tubo aspiração. Soldar tubo de aspiração do mangote. Verificar pirilampo. Verificar porque os jatos de água deitavam com pouca pressão.
17.01.2017	2526/1644	Revisão das 2500 h. Substituir cabo de aço (Que segura/limita abertura a porta de serviço) e aplicar pirilampo frente.
05.04.2017	2908/1894	Substituir aspirador. Substituir borrachas laterais do aspirador. Verificar ruído na escova. Afinar carro escova. Fixar tubo que suporta o mangote.
21.04.2017	2974/1932	Substituir bomba de água (<i>Tellarini</i>) dos jatos das escovas e bocal. Substituir jatos de água. Afinar aspirador.
03.05.2017	3023/1965	Revisão 3000 horas. Substituir tubo do mangote Verificações.

07.06.2017	3193/2064	Verificar aquecimento. Retirar <i>intercooler</i> para lavar. Lavar radiador de água. Desobstrução de tubo de respiro.
28.06.2017	3297/2127	Substituir tampa do radiador. Substituir curvo de aspiração.
24.07.2017	3430/2205	Desmontar radiador do <i>intercooler</i> para lavagem do mesmo e do radiador do líquido de arrefecimento. Montagem e ensaio.
29.08.2017	3618/2312	Revisão das 3500 horas. Substituir roda do aspirador. Fixar forra lateral. Reparar pirilampo.
21.09.2017	3715/2367	Substituição da turbina e do pirilampo traseiro. Fixar forra lateral no suporte de baixo. Efetuar revisão das 3750 horas. Vedar tubo do sensor filtro sujo.
04.10.2017	3776/2406	Substituição do motor hidráulico da escova lateral direita.
13.10.2017	3805/2425	Substituir motor hidráulico escova esquerdo. Testar.
09.02.2018	4368/2766	Verificação da cablagem elétrica do motor, verificação dos sensores e tubos de ligação do turbo.
28.02.2018	4460/2820	Revisão das quinhentas horas, substituir correia de bomba de água, verificar falha com “motor frio” (Possível falha do injetor).
01.03.2018	4461/2820	Falha de injetor: Desmontar injetor, montar injetor, montar martelo de válvulas e afinar, por massa na central de lubrificação e testar máquina.
16.03.2018	4528/2858	Falha fuga de gasóleo: Reparação da fuga de gasóleo (O-ring).
21.03.2018	4542/2866	Falha motor hidráulico direito das escovas: Desmontar e montar motor hidráulico de escovas para reparar e testar.
09.05.2018	4779/2999	Pneu e rosca de apoio da roda do bocal central e joystick de 4 posições substituídos.
16.05.2018	4803/3013	Verificar aquecimento. Retirar <i>intercooler</i> para lavar. Lavar radiador (Anticongelante). Desobstrução de tubo de retorno do radiador (Anticongelante). Carga do AC gás R134a.

Anexo II - FMEA da Varredoura

Nota: “Anexo II – FMEA da Varredoura” para os quinze sistemas e respectivos cento e oito subsistemas, com os valores de RPN iniciais.

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
Motor	Velas de incandescência	Dispositivo de aquecimento para iniciar o funcionamento do motor diesel (as velas de incandescência fornecem o calor adicional necessário para aumentar a temperatura do ar de admissão, por forma a iniciar o ciclo de combustão).	Desgaste.	Diversas ligações com o motor a frio	5	Inoperacionalidade da vela	3	Não existe.	10	150
	Injetores	Pulverizar o combustível na câmara de combustão, injetando-o de forma gradual durante um curto espaço.	Bloqueado.	Por defeito anómalo inicial ou por desgaste após longos períodos de utilização. Também inerente a qualidade do combustível utilizado e impurezas	3	Incapacidade de injectar combustível na câmara de combustão	6	Não existe.	10	180
	Bloco Motor	É uma estrutura em ferro fundido que tem como função alojar os cilindros/partes móveis do motor e permitir a passagem de anti-congelante para arrefecimento do bloco.	Fissuras/Fractura.	Anomalia no sistema de arrefecimento motor	1	Inoperacionalidade do motor	8	Não existe.	10	80
	Peças móveis do motor (Pistões, Bielas, Cambota e árvore de cames)	Transformar a energia produzida pela queima do combustível em força motriz.	Desgaste.	Elevadas pressões e temperaturas. Falha no sistema de lubrificação.	2	Rendimento do motor afectado	5	Verificação do nível de óleo.	7	70
	Cobertura de ventilador e Ventoinha	A cobertura tem a função de direccionar o ar, alojar e proteger a ventoinha. A ventoinha tem a função de forçar o ar a passar no radiador e no intercooler de modo a arrefecer o anticongelante do radiador e o ar quente (ar de entrada à temp/ ambiente) do intercooler.	Falha no sistema de ventilação. Desiquilíbrio.	Falha no termostato. Rolamento bloqueado. Quebra de pás da ventoinha.	2	Aquecimento do motor. Dano no rolamento.	4	Não existe	10	80
	Radiador (Anticongelante)	Arrefecer o liquido refrigerante (anticongelante) que passa no bloco do motor	Corrosão. Colmatação.	Não utilização do anticongelante indicado. Ausência de anticongelante.	4	Inoperacionalidade do radiador com consequências no sistema de arrefecimento do motor.	4	Inspeção visual do reservatório e do radiador	4	64
	Radiador (Intercooler)	Arrefecer o ar vindo do turbo (faz com que haja "mais Oxigénio", "mais denso" e a combustão acontece mais tarde, quando o ar entra na câmara de combustão).	Fuga. Corrosão.	Colisão de pedras/partículas. Degradação na ligação das tubagens.	3	Perda de pressão do turbo.	2	Inspeção visual do intercooler e tubagens.	4	24
	Turbo compressor de geometria variável	Aumentar a potência do motor, fornecendo ar comprimido à câmara de combustão, com uma densidade maior. A geometria variável permite mudança de inclinação das palhetas controlando a rotação da turbina, fornecendo mais potência ao motor em diferentes faixas de rotação.	Desgaste do veio. Desiquilíbrio das pás do turbo. Quebra de alhetas do turbo.	Fuga no sistema de lubrificação. Impurezas no fluxo de ar. Degradação na ligação das tubagens. Altas temperaturas.	4	Redução da capacidade de aceleração. Perda de óleo no motor/ Motor danificado.	8	Inspeção visual do turbo e tubagens. Turbo com Ruído Estranho. Cor do fumo de escape.	8	256

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Acoplamento elástico (<i>Elastic coupling and mounting plate</i> (Vai comandar a tracção hidroestática))	Transmite a força motriz proveniente do motor diesel para o sistemas de tracção hidroestática	Desgaste. Corrosão.	Degradação das borrachas. Número de horas de serviço elevadas.	1	Inoperabilidade da máquina, tracção/ sistemas hidráulicos.	10	Não existe.	10	100
	Suportes de motor	Apoiar o motor e absorver as vibrações do motor produzidas pelas peças móveis.	Desgaste. Degradação da borracha.	Carga e impacto. Temperatura e intempérie.	4	Condução instável. Vibrações.	2	Inspeção visual.	5	40
	Sistema de Escape (E isolantes)	Retirar do motor os gases produzidos na combustão, diminuir o ruído provocados pelo motor e reduzir as emissões. O isolante tem função de impedir que o calor de escape danifique componentes.	Degradação do isolante. Corrosão.	(Isolante danificado com a mangueira da pistola de alta pressão) Intempérie. Altas temperaturas.	4	Vibrações. Ruído. Perda de performance. Aumento do consumo de combustível. Deterioração da mangueira da pistola de alta pressão	4	Inspeção visual (fácil acesso).	3	48
	Filtro de Ar	Filtrar as impurezas presentes na atmosfera, impedindo que entrem na admissão do motor para mistura da combustão.	Colmatação.	Impurezas.	3	Perda de performance. Aumentos do consumo de combustível.	3	Inspeção visual.	3	27
	Filtro de Combustível	Filtrar as impurezas presentes no combustível, impedindo que entrem na admissão do motor para mistura da combustão.	Colmatação.	Impurezas.	2	Desgaste da bomba de combustível. Dificuldades na ignição. Desempenho irregular.	4	Não existe.	10	80
	Filtro de Óleo	Retirar as impurezas existentes no circuito de lubrificação geradas pelo uso do motor, tais como oxidantes e partículas de metal.	Colmatação.	Impurezas.	2	Desgaste dos componentes do motor. Sobreaquecimento do motor. Perda de performance. Aumento do consumo de combustível.	9	Não existe.	10	180
	Correia do Motor	Sincronizar a rotação da árvore de cames e da cambota.	Ruptura da correia.	Degradação da borracha. Intempérie.	3	Possível destruição do motor.	10	Inspeção visual.	2	60
	Correia da Bomba de água	Transmitir o movimento da polia da cambota à bomba de água.	Ruptura da correia.	Degradação da borracha. Intempérie.	3	Sobreaquecimento do motor.	7	Inspeção visual.	2	42

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Bomba de Água	Fazer circular o líquido refrigerante pelo radiador e bloco de motor.	Fuga. Corrosão. Desgaste do rolamento e veio.	Alta temperatura. Líquido anticongelante contaminado ou não adequado. Cavitação. Número de horas de serviço elevadas. Correia com tensão não adequada	3	Sobreaquecimento do motor.	7	Não existe.	10	210
	Bomba de Óleo	Fazer a lubrificação forçada do motor.	Desgaste das peças móveis. Fuga.	Número de horas de serviço elevadas. Degradação dos vedantes. Óleo com impurezas. Altas temperaturas.	3	Sobreaquecimento do motor. Danos no motor por falta de lubrificação.	7	Não existe.	10	210
	Motor de arranque	Accionar o motor do automóvel até que tenha condições de funcionar sozinho.	Desgaste.	Número elevado de ignições.	3	Dificuldades/Falha na ignição.	5	Não existe.	10	150
	Alternador	Transformar energia mecânica em energia elétrica.	Desgaste.	Degradação da borracha. Intempérie. Número de horas de serviço elevadas.	3	Manobrabilidade condicionada por falha na direção assistida. Falta de energia nos sistemas elétricos.	5	Inspeção visual da correia. Escovas de carbono e rolamentos sem meios de detecção.	9	135
	Cablagens do sistema elétrico	Distribuir energia elétrica pelos vários sistemas elétricos da varredoura.	Degradação dos isolantes. Corrosão nos contactos. Fusível danificado.	Intempérie. Curto circuito.	2	Falha num ou vários sistemas elétricos	3	Inspeção visual.	7	42
	Tubagens diversas	Ramificar/transportar fluidos hidráulicos, ar, água, anticongelante, pelos vários sistemas da varredoura.	Fugas. Corrosão nas cravações.	Não utilização do anticongelante/Óleos indicados. Intempérie. Altas temperaturas dos líquidos.	2	No pior caso, inoperabilidade da máquina.	5	Inspeção visual.	7	70
Chassis	Suspensão Traseira (via Sinoblocos)	Suavizar impactos da estrada, reduzir ruídos.	Desgaste. Degradação da borracha.	Carga e impacto. Intempérie.	4	Condução instável. Vibrações.	2	Inspeção visual.	5	40
	Motores das rodas traseiras (movimento via tração hidroestática)	Criar movimento na roda traseira através da tração hidroestática.	Desgaste das peças móveis, principalmente na conexão do pistão ao prato. Fuga. Fadiga do metal.	Óleo hidráulico contaminado. Degradação de vedante. Elevadas cargas sobre os pistões.	1	Condução instável. Vibrações.	4	Não existe.	10	40

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Reduction Gear-Box (Fabricante Brevini modelo RF-46 Redutor planetário)	Redutor planetário à roda traseira, combinado à tração hidroestática.	Desgaste das peças móveis, principalmente na conexão do pistão ao prato. Fuga. Fadiga do metal.	Óleo hidráulico contaminado. Degradação de vedante. Elevadas cargas sobre as engrenagens.	1	Condução instável. Vibrações. Perda de tração.	5	Não existe.	10	50
	Rodas da frente	Suportar peso, transmitir potência, amortecer irregularidades da estrada.	Furo, desgaste, corte, golpes nos passeios	Percurso irregulares. Pneus com data de fabrico antiga (considera-se antiga se superior a 5 anos). Intempérie.	5	Condução instável. Vibrações. Distância de travagem superior. Perda de manobrabilidade da máquina, no caso de furo/rebentamento de pneu.	5	Inspeção visual.	1	25
	Rodas Traseiras	Suportar peso, transmitir potência, amortecer irregularidades da estrada	Furo, desgaste, corte, golpes nos passeios	Percurso irregulares. Pneus com data de fabrico antiga (considera-se antiga se superior a 5 anos). Intempérie.	5	Condução instável. Vibrações. Distância de travagem superior. Perda de manobrabilidade da máquina, no caso de furo/rebentamento de pneu.	5	Inspeção visual.	1	25
	Tanque de combustível/Transmissor do nível do tanque (Bóia)	Armazenar e transmitir o nível de combustível	Falha nos contactos do sensor. Quebra do plástico da bóia. Fuga no tanque de combustível.	Idade elevada da bóia. Oxidação do metal do sensor. Perfuração do tanque de combustível devido a colisão com detritos. Corrosão no tanque de combustível.	1	Imobilização da máquina devido a falta de combustível.	2	Não existe.	10	20
	Suportes do tanque de combustível (Ferragens, O-Ring, Porca)	Suportar o tanque de combustível e permitir escoamento do combustível.	Desgaste.	Vibrações provocadas pelo funcionamento da máquina	1	Fuga de combustível	2	Inspeção visual.	2	4
	Baterias	Alimentar motor de arranque e auxiliar o sistema elétrico quanto o motor diesel não está em funcionamento.	Desgaste. Falta de carga. Oxidação dos contactos.	Pouco uso da máquina ou por períodos curtos de tempo. Falha do alternador. Atingido o ciclo de vida da bateria.	1	Dificuldades na ignição. Manobrabilidade condicionada por falha na direcção assistida. Falta de energia nos sistemas eléctricos.	4	Teste à bateria	3	12
	Suporte das Baterias	Suportar baterias.	Desgaste. Corrosão.	Vibrações provocadas pelo funcionamento da máquina. Intempérie.	1	Bateria solta podendo levar à sua desconexão.	1	Inspeção visual.	1	1
	Sensor do Contentor (Nível de lixo)	Informar o nível de lixo do contentor.	Falha no transmissor em caso de descalibração metrologica	Oxidação no sensor.	1	Operador sem informação do nível de carga.	1	Não existe.	10	10

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Ferragens de conexão do contentor ao chassi	Fixar contentor ao chassi e permitir movimento de rotação para despejar o lixo.	Desgaste.	Por fadiga devido às elevadas cargas. Vibrações devido a piso irregular.	1	O contentor pode-se soltar do chassi, podendo causar um acidente.	8	Inspeção visual.	5	40
	Amortecedores de cabine	Absorver vibrações do chassi transmitidas à cabine.	Desgaste. Degradação da borracha.	Devido a cargas e ou impactos.	2	Condução instável. Vibrações.	2	Não existe.	10	40
Cabine	Portas e Janelas	Isolar e proteger a cabine.	Falta de estanquidade. Quebra de vidros. Falha no elevador dos vidros.	Colisão. Vibrações durante a operação da máquina.	2	Pouco isolamento acústico e falta de protecção contra a intempérie. Falha na protecção da cabine.	3	Inspeção visual.	5	30
	Sistema de escovas dos vidros (Motor das escovas, Reservatório com bomba do líquido de limpeza)	Permitir boa visibilidade em condições de chuva.	Desgaste. Falha eléctrica.	Não substituição periódica das escovas. Intempérie. Falha nas Baterias e/ou alternador. Falha na bomba do líquido de limpeza e/ou motor das escovas limpa vidros.	2	Má visibilidade em condições de chuva.	2	Não existe.	10	40
	Luzes (Traseiras+Pirilampo e luzes frontais)	Iluminar e sinalizar a varredoura.	Desgaste (filamento fundido).	Humidade, altas temperaturas, . Atingido o ciclo de vida da lâmpada.	3	Má visibilidade em condições de pouca luminosidade.	4	Não existe.	10	120
	Placas do Chão da cabine	Visualizar lixo, durante a operação da máquina.	Desgaste.	Erosão das placas devido à utilização.	1	Falta de protecção na cabine.	4	Inspeção visual.	1	4
	Coluna de Direção	Transmitir os movimentos do volante à caixa de direcção.	Desgaste (rolamentos).	Eventuais desalinhamentos motivado pelas utilizações, embates e ultrapassar obstáculos como por exemplo passeios ou zonas sinuosas	2	Manobrabilidade condicionada.	3	Não existe.	10	60
	Extintor	Controlar ou eliminar um fogo de um local ou objecto.	Pó químico ineficiente. Perda de pressão do extintor.	Atingido o ciclo de vida do pó químico. Corrosão.	1	Pode causar morte e/ou perda total da máquina no caso de incêndio.	6	Não existe.	10	60

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Dashboard e comandos das escovas	Informar o operador do estado dos sistemas/sub-sistemas e operar a varredoura (Comandar escovas, injectores de água, suspensão hidropneumática, bomba da alta pressão, luzes, limpa vidros, etc.).	Desgaste. Falha eléctrica.	Anomalia no sistema eléctrico. Uso intenso dos botões causando desgaste nos contactos.	3	Manobrabilidade condicionada.	4	Não existe.	10	120
	Panel de Instrumentos (Isystem e rádio, no topo da cabine)	Visualizar a telemetria e diagnósticos.	Desgaste. Falha eléctrica.	Anomalia no sistema eléctrico. Avaria no painel informativo (ex: desgaste painel LCD)	1	Informação incompleta durante o funcionamento da máquina.	4	Não existe.	10	40
	Caixa de fusíveis	Proteger o sistema eléctrico de picos eléctricos ou de mau funcionamento.	Desgaste do filamento.	Pico eléctrico	1	Falha de um ou mais sistemas eléctricos.	4	Não existe.	10	40
	Aquecimento (Motor de aquecimento e radiador)	Aquecer cabine.	Fuga. Desgaste (ventoinha).	Falha no ventilador. Fuga no radiador de aquecimento.	2	Perda de conforto na cabine em clima frio.	2	Não existe.	10	40
	Filtro de ar da cabine	Filtrar as impurezas presentes na atmosfera, impedindo que entrem na cabine.	Colmatação.	Impurezas.	3	Diminuição da qualidade do ar dentro da cabine, podendo originar problemas de saúde ao operador.	4	Não existe.	10	120
	Controlo remoto da cabine (abre/fecha porta e despeja contentor)	Controlar o contentor, inclinação e abertura da porta do contentor.	Desgaste (botões). Falha do sistema eléctrico.	Uso intenso ou por falha do sistema eléctrico.	2	Inoperabilidade do contentor. Impossibilidade de despejar a carga (excepto via bomba hidráulica manual).	3	Não existe.	10	60
	Espelhos (retrovisores e espelho de pavimento)	Aumentar a visibilidade para o operador.	Caso danificados pode impedir visibilidade. Corrosão	Colisão de pedras/partículas, ou com outra viatura. Degradação do espelho (camada de prata metálica).	2	Má visibilidade	4	Inspeção visual.	1	8
Contentor	Fechadura da porta do contentor e Portas de Serviço	Evitar abertura de portas sem controlo do operador.	Corrosão. Desgaste.	Uso intenso. Intempérie.	1	Falta de segurança na cabine	2	Não existe.	10	20

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Cilindro da porta do contentor, <i>Rear Door Cylinder</i> (abertura da porta pela botoneira, sistema hidráulico)	Abrir porta do contentor.	Fuga. Desgaste (pistão).	Degradação nos conectores, defeito no pino do pistão ou desgaste no pistão (anel) do cilindro hidráulico.	2	Inoperabilidade da porta do contentor.	5	Inspeção visual.	4	40
	<i>Inspection Hatch</i> (Janela de inspeção do contentor)	Inspecionar contentor sem abrir a porta do contentor.	Corrosão. Desgaste.	Uso intenso. Intempérie.	2	Dificuldade em fazer inspeção visual do contentor.	1	Inspeção visual.	1	2
	Grelha interior para filtrar lixo (esgoto)	Evitar entupimento do esgoto.	Corrosão. Desgaste. Entupimento.	Degradação por colisão de lixo. Falta de limpeza durante as descargas, pode entupir a grelha/esgoto.	2	Esgoto entupido.	2	Inspeção visual.	1	4
	Ventoinha de aspiração (Aço)	Aspirar lixo do pavimento e criar pressão negativa dentro do contentor	Colapso da ventoinha. Desgaste.	Desequilíbrio da ventoinha por acumulação de lamas. Desgaste provocado por colisão de detritos que passam através da grelha de protecção.	5	Inoperabilidade do aspirador (função principal da máquina).	8	Não existe.	10	400
	Filtro de Óleo (dos cilindros hidráulicos da porta do contentor)	Retter as impurezas existentes no circuito de lubrificação dos macacos hidráulicos, tais como oxidantes e partículas de metal.	Colmatação.	Impurezas.	2	Desgaste dos componentes sobreaquecimento. Contaminação do óleo hidráulico.	9	Não existe.	10	180
	Grelhas do topo do contentor	Proteger o topo do contentor e deixar expelir o lixo fino.	Colmatação.	Impurezas.	5	Perda de performance na aspiração.	5	Inspeção visual.	1	25
	Radiador de óleo, <i>Oil cooler</i> (Ventoinha e radiador no Topo do contentor)	Arrefecer o óleo do sistema hidráulico da varredoura.	Fuga no radiador. Desgaste (ventoinha).	Corrosão, degradação nos conectores do radiador. Falha na ventoinha devido ao número elevado de horas de serviço.	2	Aumento de temperatura leva à degradação dos vedantes e propriedades do óleo não conforme com as especificações.	6	Inspeção visual.	5	60
	Sistema basculante do contentor (Cilindro ejetor)	Inclinar o contentor para descarga ou acesso ao motor.	Fuga. Desgaste (pistão).	Degradação nos conectores, defeito no pino do pistão ou desgaste no pistão (anel) do cilindro hidráulico.	2	Inoperabilidade do cilindro, máquina sem função basculante. Descarga e inspeção ao motor, dificultada (o operador de de usar a bomba hidráulica manual).	5	Inspeção visual.	4	40

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Extensão do tubo flexível de aspiração, <i>Suction Tube extension</i> (No topo do contentor)	Direcionar o lixo para o interior do contentor e evitar que o lixo colida com a ventoinha de aspiração.	Desgaste.	Secção de tubo em metal curva, onde o lixo vindo do tubo flexível <i>Abraflex</i> colide, causando erosão.	1	Inoperabilidade da funcionalidade de aspiração manual de folhas (via tubo flexível <i>Abraflex</i>).	5	Inspeção visual.	5	25
	Sistema de lavagem da ventoinha de aspiração, <i>Fan Cleaning System</i>	Lavar a ventoinha de aspiração.	Corrosão.	Passagem de água que pode criar calcário e corrosão no tubo.	1	Falta de manutenção na ventoinha de sucção, que pode causar desequilíbrio na ventoinha e respectivo dano.	8	Não existe.	10	80
	Contentor em aço inoxidável	Armazenar o lixo.	Desgaste.	Erosão causada por detritos.	2	Fuga no contentor.	10	Inspeção visual.	1	20
	Porta traseira do contentor em aço inoxidável	Descarga do lixo e expelimento de lixo fino e ar proveninete da ventinha de aspiração.	Desgaste.	Erosão causada por detritos.	3	Não retenção das partículas de maior dimensão.	10	Inspeção visual.	1	30
Hidráulico	Bomba hidráulica de mão	Bomba manual para inclinação do contentor.	Fuga. Desgaste (pistão).	Degradação nos conectores, defeito no pino do pistão ou desgaste no pistão (anel) do cilindro hidráulico.	1	Inoperabilidade do cilindro, sem possibilidade de descarga e inspeção ao motor, caso o sistema basculante do contentor (Cilindro ejetor) não funcione.	7	Inspeção visual.	4	28
	Manómetros e tubagens diversas e ligações ao tanque hidráulico	Distribuir o óleo hidráulico pelos sistemas hidráulicos.	Fuga.	Degradação nos conectores (anéis de vedação) devido à temperatura/pressão do óleo.	1	Inoperabilidade ou funcionamento incorrecto de um ou mais sistemas hidráulicos.	8	Inspeção visual.	4	32
	Bomba hidráulica, <i>Drive Pump</i> redistribuí pelos varios circuitos" / Transmissão hidroestática ligado ao "Elastic coupling and mounting plate"	Bombear o óleo hidráulico usando energia do motor.	Desgaste das peças móveis, principalmente na conexão do pistão ao prato. Fuga. Fadiga do metal.	Óleo hidráulico contaminado. Degradação de vedante. Elevadas cargas sobre os pistões.	1	Em caso de falha o sistema geral hidráulico fica inoperacional, inclusive imobilização da viatura.	10	Não existe.	10	100
	Bomba Hidráulica da ventoinha de aspiração	Colocar em funcionamento a ventoinha de aspiração.	Desgaste das peças móveis, principalmente na conexão do pistão ao prato. Fuga. Fadiga do metal.	Óleo hidráulico contaminado. Degradação de vedante. Elevadas cargas sobre os pistões.	1	Em caso de falha o sistema de aspiração fica inoperacional, sem possibilidade de recolha de lixo.	8	Não existe.	10	80

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Bomba hidráulica do cilindro basculante, <i>Boost Pump</i>	Colocar em funcionamento o cilindro ejetor/Sistema basculante do contentor	Desgaste das peças móveis, Fuga. Fadiga do metal.	Por desgaste no pistão (anel) do cilindro hidráulico, ou nas conexões devido à temperatura/pressões do óleo ou de óleo contaminado.	1	Máquina sem função basculante. Descarga e inspeção ao motor, dificultada (o operador de de usar a bomba hidráulica manual).	5	Não existe.	10	50
	Bomba de direcção (Direcção assistida hidráulica)	Auxiliar a direcção.	Fuga.	Desgaste de vedações e conexões.	2	A direcção torna-se demasiado pesada e desconfortável para o manobrador.	3	Não existe.	10	60
	Tanque hidráulico + Filtro Óleo + Aerating Filter(remove bolhas de ar "de air")+ Filtros de sucção (no interior do tanque)	Armazenar o óleo hidráulico e assegurar a sua qualidade.	Colmatação. Fuga.	Corrosão. Degradação das conexões devido à temperatura/pressões do óleo ou de óleo contaminado.	1	Funcionamento anómalo dos sistemas hidráulicos (ex: pressões incorrectas). Contaminação (ar) do óleo.	9	Não existe.	10	90
	Filtro de óleo do sistema de suspensão hidropneumática, <i>Filter Front Axle Level Control</i> (filtro de óleo do circuito usado para nivelar o eixo da frente (para o bocal ir nivelado))	Filtrar o óleo do sistema de suspensão hidropneumática.	Colmatação. Fuga.	Degradação das conexões devido à temperatura/pressões do óleo ou de óleo contaminado.	2	Falha na compensação do eixo dianteiro, podendo causar danos no bocal de aspiração e escovas. Aspiração/Limpeza ineficiente.	7	Não existe.	10	140
	Compensador, <i>Manifold block</i> (Regulador de pressão +-10Bar)	Ajustar pressão dos sistemas hidráulicos em +- 10 Bar.	Fuga.	Degradação das conexões devido à temperatura/pressões do óleo ou de óleo contaminado.	1	Sem possibilidade de ajuste de pressão. Funcionamento anómalo dos sistemas hidráulicos (ex: pressões incorrectas).	9	Inspeção visual.	7	63
Travões	Pastilhas de travão (Rodas da frente)	Imobilizar ou reduzir a velocidade da varredoura.	Desgaste.	Consumo de material devido à fricção entre a pastilha de travão e o disco de travão.	4	Perda de eficiência na travagem.	7	Inspeção visual.	3	84
	Discos de travão ventilados (Rodas da frente)	Imobilizar ou reduzir a velocidade da varredoura.	Desgaste. Empenamento.	Consumo de material devido à fricção entre a pastilha de travão e o disco de travão. Sobreaquecimento e mudanças bruscas de temperatura.	3	Perda de eficiência na travagem. Quebra ou empenamento do disco de travão. Vibração no pedal de travão e volante.	7	Inspeção visual.	3	63
	Rolamentos da (Roda da frente)	Permitir que a roda gire livremente com o menor atrito possível.	Desgaste.	Piso irregular. Conduzir em carga máxima.	2	Ruído metálico vindo das rodas. Atrito em marcha. Aumento de consumo de combustível.	4	Não existe.	10	80

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Maxilas de travão da (Rodas da frente)	Imobilizar ou reduzir a velocidade da varredoura.	Desgaste. Fuga. Bloqueamento do movimento do Pistão.	Detritos, corrosão entre o pistão e a maxila (<i>brake caliper</i>) podem bloquear o pistão e a degradação nas conexões (juntas) podem levar a uma fuga do líquido de travão.	1	Luz de travão ligada (sem travagem). Barulhos e vibração vindos da roda. Manobrabilidade comprometida. Contaminação/perda do líquido de travão	6	Não existe.	10	60
	Sistema de Travões de tambor (Rodas traseiras, calços de travão)	Imobilizar ou reduzir a velocidade da varredoura.	Desgaste. Fuga. Corrosão.	Consumo de material devido à fricção entre o calço de travão e o tambor. A degradação nas conexões (juntas) podem levar a uma fuga do líquido de travão. Corrosão (ex: nas molas).	2	Perda de eficiência na travagem (O 2 e S 6, dado que a força de travagem está maioritariamente nas rodas da frente).	6	Não existe.	10	120
	Pedal de travão + válvula (ar - <i>brake booster</i>) + Cilindro principal do travão (hidráulico/ Líquido dos travões)	Imobilizar ou reduzir a velocidade da varredoura.	Desgaste. Fuga.	A degradação nas conexões (juntas) podem levar a uma fuga de ar na válvula do travão. Desgaste das molas, pistões, anéis de vedação no cilindro principal de travão. Desgaste da capa de pedal.	2	Perda total ou parcial de eficiência na travagem.	7	Não existe.	10	140
	Sistema travão de mão (cilindro, ligações)	Imobilizar a varredoura.	Desgaste.	A degradação nas conexões (juntas) podem levar a uma fuga de líquido dos travões na válvula do travão. Falha nos tambores.	2	Impossibilidade de imobilizar com segurança a máquina.	6	Não existe.	10	120
Suction Pipe	Tubo de aspiração (Aço)	Direcionar o lixo para o interior do contentor.	Desgaste.	Erosão devido à colisão do lixo	3	Inoperabilidade da função de aspiração da máquina.	7	Inspeção visual.	5	105
	Secção de tubo curvo com porta de inspeção	Direcionar o lixo para o interior do contentor e inspecionar o tubo.	Desgaste.	Erosão devido À colisão do lixo na curva de 60 graus.	8	Inoperabilidade da função de aspiração da máquina.	8	Inspeção visual.	3	192
Suspensão	Suspensão frontal	Absorver irregularidades do pavimento e nivelar automaticamente ou manualmente a varredoura para o bocal central estar perto do pavimento.	Desgaste. Fuga.	Por falha no SubSistema <i>Filter Front Axle Level Control</i> . Degradação do pistão, juntas do cilindro de suspensão devido a uso intenso em piso irregular e devido à carga e impacto.	2	Falha na compensação do eixo dianteiro, podendo causar danos no bocal de aspiração e escovas. Aspiração/Limpeza ineficiente. Aumenta a distância de travagem.	7	Não existe.	10	140
	Sistema de direcção	Direcionar as rodas da frente.	Desgaste. Fuga.	Degradação do pistão, juntas do cilindro de suspensão devido a uso intenso em piso irregular e devido à carga e impacto.	2	Em caso de falha impossibilita o direcionamento das rodas	8	Não existe.	10	160

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Acumuladores (ou vasos de expansão / Suspensão hidropneumática)	Controlar o nívelamento do eixo dianteiro da varredoura.	Fuga.	Por falha no SubSistema Filter Front Axle Level Control ou da Suspensão frontal. Degradação do tanque acumulador devido a intempérie (em borracha), fuga de óleo hidráulico nas conexões.	2	Falha na compensação do eixo dianteiro, podendo causar danos no bocal de aspiração e escovas. Aspiração/Limpeza ineficiente.	7	Inspeção visual.	5	70
Sistema de Escovas rotativas	Estrutura de suporte	Suportar as escovas.	Deformação.	Por impacto num passeio.	2	Em caso de dano provocado por impacto poderá direcionar os aspersores em zonas distintas do pretendido minimizando a eficiência do sistema de varredura.	4	Inspeção visual.	1	8
	Cilindro hidráulico (para movimento horizontal)	Movimentar as escovas.	Desgaste. Fuga. Deformação.	Por impacto num passeio. Degradação do pistão, juntas do cilindro.	2	Em caso de falha impossibilita deslocamento horizontal e aumentar a zona de atuação inacessível à viatura.	4	Inspeção visual.	3	24
	Braço para levantar as escovas (Cilindro hidráulico para movimento vertical da escova)	Movimentar as escovas.	Desgaste. Fuga. Deformação.	Por impacto num passeio. Degradação do pistão, juntas do cilindro.	2	Em caso de falha não permite ajustar a altura das escovas ao solo (zona de limpeza).	4	Inspeção visual.	3	24
	Escovas PVC	Limpar pavimento.	Desgaste.	Fricção da escova PVC com o pavimento.	6	Limpeza ineficiente.	5	Inspeção visual.	1	30
	Escovas Metálicas	Limpar pavimento.	Desgaste.	Fricção da escova metálica com o pavimento.	3	Limpeza ineficiente.	5	Inspeção visual.	1	15
	Motor Hidráulico (Fabricante Parker) das escovas.	Criar movimento de rotação nas escovas.	Desgaste. Deformação do veio do motor. Desgaste das peças móveis, principalmente na conexão do pistão ao prato. Fuga. Fadiga do metal	Por impacto num passeio. Por detritos na parte superior do disco das escovas. Uso intenso desgastando os anéis de vedação. Óleo contaminado.	5	Impossibilita a rotação da escova e consequentemente também impossibilita remoção.	5	Não existe.	10	250
	Bomba de alta pressão	Pistola de água	Limpar pavimento.	Entupimento. Degradação do metal do bocal da pistola de alta pressão.	Calcário. Impurezas na água. Erosão/Corrosão do bocal devido à alta pressão da água.	2	Em caso de falha impossibilita utilização da lavadora de alta pressão. Por exemplo para lavar a via ou o contentor.	4	Não existe.	10

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Enrolador e mangueira	Estender o alcance da pistola de água.	Por norma falha com o desgaste acentuado da mola de recuperação de enrolamento	Desgaste. Fuga.	2	Intempérie. Deformação da mola do enrolador devido ao uso intensivo.	4	Não existe.	10	80
	Bomba de alta pressão	Pressurizar a água para a pistola de água.	Desgaste. Fuga.	Calcário. Impurezas na água causando falhas nos rolamentos, pistões, molas, válvulas (de sucção e pressão) ou juntas. Ar no depósito de água.	2	Sem pressão, inviabiliza o funcionamento da lavadora de alta pressão.	4	Não existe.	10	80
Sistema de Água	Bomba de água (Fabricante Tellarini)	Bombear água do tanque.	Desgaste. Fuga.	Devido ao uso intenso, pode causar desgaste no veio e turbina. Juntas degradada.	2	Inviabiliza o funcionamento da lavadora de alta pressão e da lavagem do pavimento (aspersores) e lubrificação das escovas.	7	Não existe.	10	140
	Válvulas e filtro de água	Distribuir e filtrar impurezas da água.	Colmatação.	Calcário. Impurezas na água.	2	Entupimento dos bocais da lavadora e aspersores.	7	Não existe.	10	140
	Tanque de água (600L) e filtro de água em material textil	Armazenar e filtrar água.	Colmatação. Fuga.	Calcário. Impurezas na água. Corrosão do tanque.	2	Entupimento dos bocais da lavadora e aspersores. Fuga, inviabilizando o funcionamento da lavadora de alta pressão e da lavagem do pavimento (aspersores) e lubrificação das escovas.	6	Não existe.	10	120
	Dois tubos de água em cima dos pratos das escovas (esq e dir) - metálicos	Evitar a formação de poeiras durante o processo de lavagem. Lubrificar as escovas.	Desgaste.	Erosão/Corrosão do bocal devido à alta pressão da água.	5	Inviabilização da lavagem do pavimento (aspersores) e lubrificação das escovas. Formação de poeiras durante o processo de lavagem.	6	Não existe.	10	300
	Dois tubos de água para o bocal do aspirador central - borracha	Evitar poeiras durante o processo de lavagem e lubrificar o contacto entre o pavimento e o avental de borracha.	Desgaste.	Erosão/Corrosão do bocal devido à alta pressão da água.	3	Formação de poeiras durante o processo de lavagem e dentro do contentor, não havendo uma compactação de lixo eficaz.	5	Não existe.	10	150
Sistema de aspiração de folhas	Tubo de aspiração em metal (Aço)	Direcionar o lixo para o contentor.	Oxidação. Deformação.	Danos provocado por impacto do lixo. Tubo exposto à intempérie.	2	Em caso de falha impossibilita deslocamento horizontal e aumentar a zona de atuação inacessível à viatura	3	Inspeção visual.	5	30

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Secções de Tubo de aspiração flexível (Abraflex)	Facilitar os movimentos de aspiração ao operador.	Fuga. Desgaste.	Desgaste provocado pelo lixo e tubo exposto à intempérie	8	Perda de poder de aspiração.	8	Inspeção visual.	3	192
Sistema de aspiração central	Rodas guia laterais	Evitar atrito entre o bocal e o pavimento, movendo o cilindro (braço hidráulico).	Desgaste.	Por desgaste dos rolamentos devido a impactos e/ou por avaria do sistema de auto nivelação (Suspensão hidropneumática)	2	Maior atrito entre o bocal e o pavimento, tirando sensibilidade ao sistema de auto nivelação (Suspensão hidropneumática)	4	Não existe.	10	80
	Roda de borracha central	Rodar sobre o pavimento movendo o cilindro (braço hidráulico).	Desgaste.	Degradação da borracha da roda e por desgaste dos rolamentos devido a impactos e/ou por avaria do sistema de auto nivelação (Suspensão hidropneumática)	2	Maior atrito entre o bocal e o pavimento, tirando sensibilidade ao sistema de auto nivelação (Suspensão hidropneumática)	4	Não existe.	10	80
	Aventais de borracha	Proteger o bocal e direcionar o fluxo de aspiração.	Desgaste.	Degradação da borracha por colisão com o lixo e pavimento.	2	Perda de poder de aspiração e maior atrito entre o bocal e o pavimento.	2	Não existe.	10	40
	Cilindro (braço hidráulico) para subir ou baixar o bocal central de aspiração	Comandar o sistema de nivelamento automático da suspensão frontal, para o bocal estar à altura ideal do pavimento.	Desgaste. Fuga.	Degradação do pistão, juntas do cilindro de suspensão devido a uso intenso em piso irregular e devido à carga e impacto.	2	Pode danificar o bocal central, escovas e respectivos motores hidráulicos. Aspiração ineficiente.	6	Não existe.	10	120
	Bocal central (em aço que liga ao tubo de aspiração)	Guiar o lixo do pavimento ao tubo de aspiração principal.	Desgaste.	Erosão causada por detritos.	2	Aspiração ineficiente.	6	Não existe.	10	120
	Sistema de Ar Condicionado	Compressor do AC	Comprimir o gás refrigerador e enviá-lo para o condensador.	Desgaste.	Falha nas peças móveis e juntas do compressor, fuga nas tubagens.	2	Perda de A/C ou ineficiência no arrefecimento da cabine.	3	Não existe.	10
Correia do compressor do AC (Kit trás 2 correias)		Transmitir energia ao compressor rotativo, através da polia da cambota.	Desgaste.	Degradação da borracha devido à intempérie, altas temperaturas e uso intensivo.	2	Perda de A/C ou ineficiência no arrefecimento da cabine.	3	Não existe.	10	60

FMEA

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

EQUIPAMENTO:
PREPARADO POR:
DATA:

VARREDOURA URBANA COMPACTA
VASCO ALEXANDRE LOURENÇO CATARINO
OUTUBRO / 2018



Sistema	Sub-Sistema / Item	Função	Modo de Falha	Causas	O	Consequências	S	Meios de Detecção	D	RPN
	Sistema de aquecimento (Permutador de calor) (Diferente do outro sistema da cabine)	Aquecer a cabine a partir do calor gerado pelo motor.	Fuga.	Degradação de juntas ou corrosão nas conexões ou radiador de aquecimento.	2	Perda de eficiência no aquecimento da cabine.	3	Não existe.	10	60
	A/C no topo da cabine (Condensador para arrefecer o ar, ventoinha e filtro secador, <i>Dryer filter</i> para retirar humidade)	Arrefecer a cabine.	Fuga.	Fuga no condensador/tubagens por degradação ou corrosão.	3	Perda de A/C ou ineficiência no arrefecimento da cabine.	3	Não existe.	10	90
Sistema de Câmara	Câmara traseira, suporte cablagens	Visualizar a traseira da varredoura e suportar câmara.	Avaria de componente electrónico. Degradação da cablagem.	Húmidade ou anomalia do circuito eléctrico compromete funcionamento.	2	Perda manobralidade da varredoura, por falta de visibilidade.	3	Não existe.	10	60
	Visor, suporte do visor	Suportar o visor e visualizar a traseira da varredoura.	Corrosão. Deformação.	Dano por impacto ou corrosão (intempérie).	2	Perda manobralidade da varredoura, por falta de visibilidade.	3	Não existe.	10	60