

**PEDRO HENRIQUE NUNES MENDES**

**DESENVOLVIMENTO DO PFEMA PARA UMA LINHA DE MONTAGEM DE  
MOTORES.**

Guaratinguetá  
2014

PEDRO HENRIQUE NUNES MENDES

DESENVOLVIMENTO DO PFMEA PARA UMA LINHA DE MONTAGEM DE  
MOTORES.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

Guaratinguetá  
2014

- Mendes, Pedro Henrique Nunes  
M538d Desenvolvimento do PFMEA para uma linha de montagem de motores  
/ Pedro Henrique Nunes Mendes – Guaratinguetá, 2014.  
82 f : il.  
Bibliografia: f. 71-74
- Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.  
Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva
1. Controle de qualidade 2. Confiabilidade (Engenharia) I. Título
- CDU 658.56

**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**PEDRO HENRIQUE NUNES MENDES**

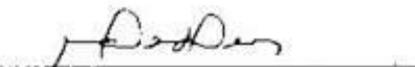
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES  
UNESP-FEG

  
Eng. Mr. ATÍLIO FRAZO VALLE  
Membro Externo

**Dezembro de 2014**

**DADOS CURRICULARES****PEDRO HENRIQUE NUNES MENDES**

NASCIMENTO	12.05.1989 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Ricardo Zimmermann Mendes Maria Regina Nunes Mendes
2010/2014	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais *Ricardo e Regina*, que me deram o suporte necessário para minha graduação e foram a base para a construção dos meus valores.

Ao meu irmão *Tiago*, que me auxiliou e esteve comigo em todos momentos.

Ao meu orientador *Prof. Dr. Messias Borges Silva*, pelo acompanhamento do meu trabalho, dedicação e atenção.

A república *Cevada & Kana*, dona *Hercília* e amigos que me proporcionaram aprendizado e momentos que levarei para o resto da vida.

Aos irmãos de Guaratinguetá *Ricardo, Lucas e Guilherme*, pela parceria durante os anos da minha graduação.

Aos engenheiros *Rogério e Zago*, pelos ensinamentos e conselhos dados durante o desenvolvimento do meu trabalho.

*" A mente que se abre a uma nova  
ideia jamais voltará ao seu tamanho  
original".*

Albert Einstein

MENDES, P. H. N. **DESENVOLVIMENTO DO FMEA PARA UMA LINHA DE MONTAGEM DE MOTORES**. 2014. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

## RESUMO

Em tempos modernos não é viável vincular produtividade e lucratividade sem associar qualidade ao produto que será manufaturado. É de extrema importância, principalmente se a companhia procura se “*Global Class*”, que tanto o produto quanto o processo em que ele é fabricado atenda a altos requisitos de qualidade. O objetivo deste trabalho é definir todos passos necessários para implementação de um novo projeto, acolhendo as etapas desde o estudo inicial de viabilidade, em seguida a aprovação, desenvolvimento das ferramentas necessárias para realização do projeto, contratação de serviços para a fabricação, até a fase final de implementação, focando na qualidade do processo de fabricação. Será exaltado uma ferramenta de qualidade que visa diminuir os riscos do processo e conseqüentemente aumentar sua confiabilidade depois de implementado.

**Palavras-chaves:** FMEA, Qualidade, Confiabilidade, AHP.

MENDES, P. H. N. **FMEA DEVELOPMENT FOR AN ENGINE ASSEMBLY LINE**. 2014. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

### **ABSTRACT**

In modern days is not practicable to link productivity and profitability without discuss the manufactured products quality. It is of great importance, mainly if the company is looking for a “Global Class” title, both the product and the process in what it is been fabricated, to attend all the high level quality requirements. This work aims to define the necessary steps for implementing a new project, including the initial viability studies, and then the staff approval, passing through the development of tools and documents necessary to its fabrication, purchasing goods and services to build the installation, and the final stage of implementation, focused on the manufacturing process quality. It will be highlighted a quality tool that helps do decrease the process risks and thereafter increase its reliability after the implementation.

**Keywords:** FMEA, Quality, Reliability, AHP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição das classes hierárquicas do AHP .....	27
Figura 2 - <i>Software Stature 4.3</i> ; gerenciador do desenvolvimento de PFMEA. ....	37
Figura 3 – Exemplo de um formulário PFMEA. ....	39
Figura 4 – Exemplo do formulário PFMEA preenchido .....	40
Figura 5 - <i>Software Stature 4.3</i> , aba para organização das reuniões de PFMEA. ....	47
Figura 6 – a) Operações que com risco nível um; b) Colunas referentes as ações recomendadas e também para os valores finais recalculados. ....	52
Figura 7 - a) Peça com alto nível de simetria; b) Peça com baixo nível de simetria. ....	54
Figura 8 - – Principais informações da ferramenta Plano de Controle de Processo. ....	57
Figura 9 - Classes hierárquicas do formulário PFMEA. ....	63
Figura 10 – Gráfico das prioridades mais elevadas e a quantidade de erros encontrados em cada fase. ....	68
Figura 11 - Gráfico das prioridades mais baixas e a quantidade de erros encontrados em cada fase. ....	68
Figura 12 – Representação do Gráfico de Gantt para a nova linha de montagem de motores. ....	75
Figura 13 – Formulário PFMEA da operação 2010 (Carregar Bloco no Pedestal) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	76
Figura 14 - Formulário PFMEA da operação 2020 (Instalar (4) injetores de óleo) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	77
Figura 15 - Formulário PFMEA da operação 2030 (Separar a base do bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	78
Figura 16 - Formulário PFMEA da operação 2040 (Limpar excesso de cola do bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	79
Figura 17 - Formulário PFMEA da operação 2050 (Verificar a montagem da capa do mancal) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	80
Figura 18 - Formulário PFMEA da operação 2060 (Instalar base no bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	81
Figura 19 - Formulário PFMEA da operação 2070 (Instalar base no bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas. ....	82

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Lista das principais normas inclusas na ISO 9000.....	22
Quadro 2 - Escala fundamental para comparação par a par. ....	28
Quadro 3 - Comparação entre as alternativas através da matriz.....	29
Quadro 4 - Sugestão para classificação da severidade do efeito para PFMEA.....	41
Quadro 5 - Sugestão para classificação da ocorrência para PFMEA .....	43
Quadro 6 - Sugestão para classificação da detecção da falha para PFMEA .....	45
Quadro 7 - Severidade sobre ocorrência.....	50
Quadro 8 - Severidade sobre detecção. ....	51
Quadro 9 –Severidade sobre ocorrência e severidade sobre detecção. ....	51
Quadro 10 - Empresas que terão o documento PFMEA analisado. ....	60

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Recomendação da média do índice de consistência aleatória (RI).....	30
Tabela 2 - Erros encontradas na 1ª fase de construção dos PFMEAs. ....	61
Tabela 3 - Erros encontradas na 2ª fase de construção dos PFMEAs. ....	61
Tabela 4 - Erros encontradas na 3ª fase de construção dos PFMEAs. ....	62
Tabela 5 - Erros encontradas na 4ª fase de construção dos PFMEAs. ....	62
Tabela 6 - Matriz de comparação da 1ª fase de construção do PFMEA. ....	64
Tabela 7 - Matriz normalizada da 1ª fase. ....	64
Tabela 8 - Matriz de comparação da 2ª fase de construção do PFMEA. ....	65
Tabela 9 - Matriz normalizada da 2ª fase. ....	65
Tabela 10 - Matriz de comparação da 3ª fase de construção do PFMEA. ....	66
Tabela 11 - Matriz normalizada da 3ª fase. ....	66
Tabela 12 - Matriz de comparação da 4ª fase de construção do PFMEA. ....	66
Tabela 13 - Matriz normalizada da 4ª fase. ....	67

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
APQP	<i>Advanced Product Quality Planning</i>
ASQC	<i>American Society for Quality Control</i>
AV	Agrega Valor
BIQ III	<i>Built in Quality 3</i>
BOP	<i>Bill of Process</i>
cGMP	<i>current Good Manufacturing Practices</i>
DFMEA	<i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>
EDRA	<i>Ergonomics Design Requirements and Assessment</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FP	Fluxo de Processo
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
NAV	Não Agrega Valor
MPC	<i>Machine Purchase Comparison</i>
MSA	<i>Measurement Systems Analysis</i>
PCP	<i>Process Plan Control</i>
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i>
PPAP	<i>Production Part Approval Process</i>
QMS	<i>Quality Management System</i>
QS	<i>Quality System</i>
RPL	<i>Risk Priority Level</i>
SAE	<i>Sociedade de Engenheiros Automotivos</i>
SOP	<i>Start of Production</i>

**LISTA DE SIMBOLOS E VARIÁVEIS**

$CR$	<i>Consistency Ratio</i>
$RI$	Índice de erro aleatório
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
$\lambda_{máx}$	Autovalor máximo
$n$	Número da ordem da matriz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	A IMPORTÂNCIA DO PFMEA EM UM CENÁRIO GLOBAL .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	18
1.4	DELIMITAÇÃO DO ESCOPO .....	21
1.5	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	21
<b>2</b>	<b>EXIGÊNCIAS GLOBAIS DE QUALIDADE</b> .....	22
2.1	A SÉRIE ISO 9000 .....	22
2.2	NORMA ISO/TS 16949:2009 .....	23
2.3	NORMAS SAE.....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Norma SAE AS9145</b> .....	24
<b>2.3.2</b>	<b>Norma SAE J1739</b> .....	25
2.4	ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS (FMEA).....	25
2.5	EXIGÊNCIA DO FMEA NOS SISTEMAS DE QUALIDADE .....	26
2.6	ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP).....	27
2.7	ETAPAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO PROJETO EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	30
<b>2.7.1</b>	<b>Estudo inicial de viabilidade e aprovação</b> .....	30
<b>2.7.2</b>	<b>Desenvolvimento do projeto</b> .....	31
<b>2.7.3</b>	<b>Escolha do fornecedor</b> .....	32
<b>2.7.4</b>	<b>Reunião de <i>Kickoff</i> e Engenharia Contínua</b> .....	33
<b>2.7.5</b>	<b><i>Tryout</i></b> .....	34
<b>3</b>	<b>PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO PFMEA</b> .....	36
3.1	DEFINIÇÃO DO PROCESSO.....	37
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PFMEA.....	38
3.3	(PRIMEIRA FASE) ANÁLISE DO MODO DE FALHA .....	39
<b>3.3.1</b>	<b>Dificuldades na implementação da primeira fase</b> .....	40
3.4	(SEGUNDA FASE) ANÁLISE DO POTENCIAL EFEITO DA FALHA .....	41
<b>3.4.1</b>	<b>Dificuldades na implementação da segunda fase</b> .....	42
3.5	(TERCEIRA FASE) ANÁLISE DA CAUSA OU MECANISMO.....	42
<b>3.5.1</b>	<b>Dificuldades na implementação da terceira fase</b> .....	44

3.6	(QUARTA FASE) - ANÁLISE DO CONTROLE DE PROCESSO .....	44
3.6.1	Dificuldades na implementação da quarta fase .....	46
3.7	(QUINTA FASE) - REVISÃO COM O TIME MULTIFUNCIONAL .....	46
3.7.1	Dificuldades na implementação da quinta fase.....	48
3.8	DEFINIÇÃO DOS RISCOS CRITICOS DO PROCESSO.....	48
3.8.1	<i>Risk Limiting</i> .....	49
3.9	PLANO DE AÇÃO .....	53
3.9.1	Eliminando erros .....	54
3.9.2	Prevenindo defeitos.....	55
3.9.3	Detectando defeitos.....	56
3.9.4	Controle das perdas.....	56
3.9.5	<i>Process Plan Control</i> (Plano de Controle de Processo).....	57
4	UTILIZAÇÃO DA AHP PARA AVALIAÇÃO DO PFMEA .....	59
4.1	ESCOLHA DA EMPRESA.....	59
4.1	DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS ERROS DAS ETAPAS DO PFMEA .....	60
4.2	APLICAÇÃO DO AHP PARA AUXÍLIO NA TOMADA DE DECISÃO .....	62
4.2.1	Decomposição Hierárquica das Classes.....	63
4.2.3	Construção da matriz de comparação, cálculos e tomada de decisão .....	64
5	COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS .....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	ANEXOS.....	75

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 A IMPORTÂNCIA DO PFMEA EM UM CENÁRIO GLOBAL

Diante de um cenário onde a competitividade torna-se um elemento crucial para o desenvolvimento de uma empresa, e onde os clientes exigem produtos cada vez mais complexos e com excelente qualidade, os fornecedores se veem sujeitos a modernizar e inovar os meios em que seus produtos são manufaturados.

Para que tais modernizações possam ser aplicadas eficientemente elas devem ser suportadas por ferramentas que, com dados qualitativos traduzidos para quantitativos, sejam capazes de otimizar a utilização e a manutenção destes novos meios de produção e indiretamente melhorar a qualidade do produto.

Segundo as empresas General Motors Corp., Ford Motors Company e Chrysler LLC (2008) o FMEA é uma ferramenta que objetiva prever e evitar falhas, tanto de processo quanto de produto, através da análise de possíveis falhas que possa vir a ocorrer, explorando também a ação necessária para preveni-las. Logo, esta ferramenta detecta possíveis falhas antes mesmo que ocorram, inviabilizando que elas afetem o processo ou o produto. Portanto, esta metodologia diminui o risco da ocorrência de falhas visando aumentar a confiabilidade do processo ou produto,

A qualidade, sendo vista pelo aspecto de confiabilidade, torna-se cada vez mais importante para o consumidor, uma vez que, caso o produto apresente algum defeito, mesmo que seja rapidamente reparado, o cliente ficará privado da sua utilização gerando insatisfação. Também, está em alta a demanda de produtos que afetam a segurança do consumidor em escala vital, como carros, aviões e equipamentos hospitalares. Ainda é importante frisar que, tais conceitos devem ser tomados de forma prioritária em uma empresa que trabalha com produtos relacionados com a segurança do cliente, caso contrário, como vem acontecendo nos últimos anos, se faz necessária a medida corretiva mais extrema chamada de “Recall”, onde a falha foi descoberta depois da produção de vários lotes do produto, o que pode colocar em risco a vida de muitas pessoas. Portanto, é de suma importância que um produto não falhe durante sua utilização, ou que o processo de produção pare, gerando perda de produtividade para a empresa e insatisfação no cliente.

A norma ISO/TS 16949:2009 cita o FMEA como um dos documentos necessários para que a fabricação de uma peça ou produto seja aprovada pela montadora. No entanto, esta ferramenta deve ser usada para prevenir falhas antes que as mesmas ocorram, e não para atender aos requisitos de qualidade da empresa.

A ferramenta FMEA é importante para a montadora pois ela: proporciona uma forma sistemática de capturar falhas do processo ou produto trazendo ganhos significativos para a empresa; seu desenvolvimento resulta implicitamente num conhecimento mais aprofundado do processo; ela exalta onde deve ser a ação de melhoria no projeto do processo, uma vez que, sendo uma ferramenta viva, ela deve ser constantemente atualizada e modificada caso haja alguma modificação no processo, visando sempre a melhoria contínua; ela agrega à empresa a atitude e a cultura de prevenção de falhas, de trabalho em equipe e de preocupação com o cliente.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi definir todos passos necessários para a implementação da ferramenta PFMEA em uma linha nova de montagem de motores, salientando as dificuldades encontradas. Para que fosse possível, algumas metas foram estabelecidas:

- i. Descrever os passos necessários para a construção da ferramenta PFMEA;
- ii. Decompor o processo de desenvolvimento do formulário PFMEA em suas fases de construção;
- iii. Investigar as dificuldades e expor possíveis erros cometidos no preenchimento do formulário PFMEA;
- iv. Identificar, através da metodologia AHP, quais os erros de construção são mais significantes e com isso estabelecer os formulários que possuem menor chance de atender sua função;

## 1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

De acordo com a descrição de Silva e Menezes (2004), as pesquisas podem ser classificadas segundo sua natureza, a forma de abordagem do problema, conforme o objetivo do trabalho ou tendo em vista os procedimentos técnicos.

Com relação a natureza a pesquisa pode ser básica ou aplicada, sendo que este trabalho é mais próximo da básica, uma vez que não há aplicação prática prevista.

Com relação a abordagem do problema, que pode ser do tipo qualitativo ou quantitativo, esta pesquisa se enquadra no perfil qualitativo, onde existe interpretação dos fenômenos para atribuição dos resultados sem utilizar métodos estatísticos. A análise é feita indutivamente.

Com relação ao objetivo, uma pesquisa pode ser do tipo exploratória, descritiva ou explicativa. Neste trabalho foi utilizado a abordagem exploratória, em vista de que houve o levantamento bibliográfico e o estudo de exemplos. (GIL, 1991).

Como explica Gil (1991), levando em consideração os procedimentos técnicos, uma pesquisa pode ser bibliográfica, documental, experimental, por levantamento, estudo de caso, pesquisa *expost-facto*, pesquisa-ação ou pesquisa participante. Esta pesquisa se caracteriza como **estudo de caso**, uma vez que nela é trabalhado poucos ou somente um objeto de estudo o que permite sua análise mais profunda.

Einsenhadst (1989) explica que a utilização de diversas fontes de dados e o vínculo delas com os conceitos teóricos desenvolvidos durante o trabalho resulta no alcance de uma maior validade da pesquisa. Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) ressaltam que é possível, utilizando o mesmo objeto de uma única empresa, analisa-lo sob diferentes perspectivas. Tendo em vista tais argumentos, é possível justificar a escolha desta metodologia de pesquisa, uma vez que foi estudado vários casos de uma única empresa.

Como explica Gil (1991), não há um consenso na determinação das etapas da pesquisa de estudo de caso, mas com base no estudo de alguns pesquisadores como Robert K. Yin (2001) e Robert E. Stake (2000) foram recomendadas as etapas para realização da pesquisa de estudo de caso. Assim sendo, este trabalho foi baseado em tais recomendações, como segue abaixo:

#### **i. Escolha do Tema**

O tema da pesquisa, segundo Silva e Menezes (2004), deve ser algo relacionado com a área de interesse do pesquisador. Deve ser levado em conta a importância do tema nos tempos atuais, os conhecimentos do pesquisador a respeito e logicamente a preferência do pesquisador em desenvolver o tema, e assim foi escolhido o tema deste trabalho.

## **ii. Formulação do Problema**

De acordo com Gil (1991), esta etapa é uma das primeiras e muito complexa, pois só é possível a formulação do problema se houver previamente um longo processo de ponderação e estudos bibliográficos sobre o tema. Esta etapa é diretamente relacionada com a escolha do tema e com a preferência do pesquisador, uma vez que durante este trabalho a ferramenta PFMEA foi desenvolvida, e foi identificado falhas e dificuldades para sua formulação, houve a motivação para analisar tais incoerências.

## **iii. Estudo de Bibliografias**

As bibliografias estudadas durante o desenvolvimento deste trabalho têm como base livros dos autores principais no assunto, artigos publicados em congressos científicos, publicações em periódicos e manuais técnicos.

## **iv. Determinação do Número de Casos**

Como cita Einsenhadst (1989), não é recomendado que estipule o número de casos previamente, sendo mais adequado o incremento de casos de acordo com o desenvolvimento da pesquisa e seus resultados. Porém existe uma faixa de casos que costuma-se utilizar, que fica entre quatro e dez casos. Deste modo foi definido inicialmente para este trabalho sete casos, tomando cuidado a não tornar as informações muito complexas e difíceis de lidar mas também sem simplifica-las demasiadamente.

## **v. Coleta de Dados**

De acordo com Gil (1991), o estudo de caso é o modo de pesquisa mais completo, se tratando de coleta de dados, pois pode-se recolher dados de pessoas e também de documentos. Os dados podem ser provenientes de documentos, entrevistas, depoimentos pessoais, observações espontâneas, observação participante e análise de artefato físico. Para este trabalho, a coleta de dados foi realizada na obtenção de documentações da empresa de manufatura de motores, mais especificamente do processo de fabricação de motor, e também através de alguns depoimentos pessoais.

## **vi. Análise dos Dados**

Como explica Gill (1991), a análise dos dados pode ser feita de diversas formas, uma vez que a etapa de coleta de dados é pouco restritiva. Neste trabalho foi utilizado a análise qualitativa dos dados, o que é natural admitir segundo Gil (1991)

## **vii. Conclusão**

Nesta fase o pesquisador deve ter autonomia suficiente para chegar a uma conclusão, explicitando se os objetivos foram atingidos e deve também explicitar a contribuição do trabalho. Nesta dissertação, os resultados estão expressos no capítulo 5.

### **1.4 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO**

Este trabalho é focado no desenvolvimento do processo de uma linha de produção de motores, ou seja, programação de todo o processo de montagem do motor. Não serão estudados os processos de fabricação dos componentes envolvidos na montagem, bem como a usinagem de peças do motor ou sub montagem de partes.

Será tomado como referência a planta de uma subsidiária brasileira de uma montadora de veículos, localizada em São José dos Campos no Estado de São Paulo. As áreas da fábrica que estão envolvidas neste estudo são as áreas de Engenharia de Manufatura de motores, a parte que é responsável pelos novos e principais projetos instalados na América do Sul e seus fornecedores de Equipamentos de Montagem.

### **1.5 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo explica o motivo da escolha do tema, resume brevemente o conteúdo abordado e cita a metodologia aplicada para desenvolvimento do tema.

O capítulo dois abrange toda a fundamentação teórica necessária para o estudo de caso e para aplicação do método utilizado.

O capítulo três explica o todas as etapas do processo de desenvolvimento da ferramenta PFMEA citando um exemplo prático para melhor entendimento.

O capítulo quatro mostra a aplicação do método escolhido (AHP) para análise dos formulários PFMEAs.

O capítulo cinco tem o objetivo conclusivo deste trabalho, analisando a metodologia aplicada anteriormente e conferido se os objetivos foram cumpridos.

## 2 EXIGÊNCIAS GLOBAIS DE QUALIDADE

Neste capítulo será exposto algumas normas de sistemas de qualidade utilizadas na área automobilística, aeroespacial e qualquer outro setor de manufatura. O intuito é vincular os requerimentos para Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) e o Plano de Controle de Processo (PCP) nestes sistemas de qualidade.

### 2.1 A SÉRIE ISO 9000

**Quadro 1 - Lista das principais normas incluídas na ISO 9000.**

<b>Título da Norma</b>	<b>Descrição</b>
<b>9000:2005, Sistema de gerenciamento de qualidade – Conceitos Fundamentais e Vocabulário.</b>	Estabelece um ponto inicial para o entendimento das normas e define os termos principais utilizados na família de normas ISO 9000 para que seja evitado o mal entendimento dos principais conceitos.
<b>ISO 9001:2008, Sistema de gerenciamento de qualidade – Requerimentos.</b>	Esta é a norma que será utilizada para ajudar a empresa a atender o consumidor e aplicar normas regulamentais que finalmente possam focar na satisfação do cliente.
<b>9004:2009, Sistema de gerenciamento de qualidade – Instruções para implementação de melhorias.</b>	Esta norma visa suportar e guiar a empresa para o processo de melhoria contínua de seu sistema de gerenciamento de qualidade, beneficiando todas as áreas envolvidas através da satisfação do cliente.
<b>ISO 19011:2011, Guia para a auditoria dos sistemas de gerenciamento de qualidade e/ou ambientais</b>	Esta norma providencia suporte para auditores de sistemas de gerenciamento. Ela é aplicável para toda organização que necessita conduzir auditorias internas e externas dos sistemas de gerenciamento.

Fonte: (ISO, 2014. Modificado pelo autor).

A família de normas de gerenciamento internacional de qualidade ISO 9000 tem o objetivo de estabelecer a base para o gerenciamento de sistemas de qualidade e vem ganhando espaço global nesta área. O grupo de normas formado pelo ISO 9000 especifica

os requerimentos de um sistema de gestão de qualidade necessários para providenciar produtos que atendam às necessidades dos consumidores afim de aumentar a satisfação do cliente. Esta norma também é usada para certificação de qualidade, se a empresa procura ser reconhecida internacionalmente pela qualidade de seus produtos. (ISO, 2008).

Afim da empresa atingir seu objetivo com eficiência, é recomendado pela Dyadem Press (2003) que a implementação da ISO 9000 seja iniciada com a ISO 9000:2005, para que então seja adotada a ISO 9001:2008, e finalmente, para tornar o sistema de gestão de qualidade altamente efetivo tendo em vista a melhoria contínua, a norma ISO 9004:2009.

As duas principais normas ISO 9000:2005 e ISO 9004:2009 foram desenvolvidas como um par consistente, afim de facilitar seu uso. Deste modo, se a implementação for realizada como sugerido, ela permitirá o vínculo com outros sistemas de qualidade, inclusive as de setores específicos, e assim a empresa poderá ganhar reconhecimento através de programas de premiação nacionais.

O Quadro 1 cita algumas das principais normas da família ISO 9000 e o objetivo de cada uma delas.

## 2.2 NORMA ISO/TS 16949:2009

A família de normas ISO 9000 providencia uma orientação geral para sistemas de gerenciamento de qualidade e pode ser aplicada em qualquer tipo de indústria, porém muitas empresas acham esta definição muito abrangente e preferem uma abordagem mais aplicada a sua área de atuação.

Os fabricantes de carro chamadas de “*Big Three*”, formada pela General Motors Corp., Ford Motors Company e Chrysler LLC, decidiram juntamente com a *Automotive Division of the American Society for Quality Control (ASQC)* fundar a *Supplier Quality Requirements Task Force* afim de estudar e entender tópicos específicos relacionados a qualidade da área automobilística. (PALADY, 2004)

O autor Paul Palady 1997 afirma que desde 1990 a *Task Force* lançou através da *Automotive Industry Action Group (AIAG)* manuais que são amplamente utilizados na indústria automobilística, como o *Measurement Systems Analysis: Reference Manual (MSA)* e o *Advanced Product Quality Planning (APQP)*. Finalmente a Task Force decidiu equalizar o sistema de gerenciamento de qualidade e ferramentas de avaliação utilizados pelos fornecedores, resultando no desenvolvimento do *Quality System*

*Requirements*: QS-9000 que visa harmonizar os requisitos de qualidade de toda indústria automotiva.

Porém, atualmente, a norma QS-9000 se tornou obsoleta e foi substituída pela norma ISO/TS 16949:2009, que é uma complementação da norma ISO 9001:2008.

Esta norma foi preparada pela *International Automotive Task Force* (IATF), com suporte da ISO/TC 176, *Quality management* e *Quality assurance*. (ISO, 2013). Ela teve como objetivo acabar com a ambiguidade gerada pelas diferentes normas criadas desde 1990, focalizando-as em um único ponto e criando uma norma internacional QMS harmonizada e global para as indústrias automobilísticas. (DAS, p 123, 2014).

ISO/TS 16949:2009 em conjunto com a ISO 9001:2008 definem os requerimentos do *Quality Management System* (QMS) para criação e desenvolvimento, produção e, se necessário, instalação e serviços para produtos automotivos ou relacionados. Esta norma é aplicada para qualquer área da organização que manufature partes especificadas por clientes. (ISO 2013).

## 2.3 NORMAS SAE

As normas da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), referentes a qualidade de produtos manufaturados, são internacionalmente reconhecidas por tratarem de assegurar a qualidade, eficácia e segurança dos produtos e serviços disponíveis nas indústrias de automação. Para o estudo deste trabalho, se destacam as normas SAE AS9145 e SAE J1739.

### 2.3.1 Norma SAE AS9145

Segundo a SAR (2014) esta norma faz referência a ferramenta APQP (*Advanced Product Quality Planning*) que é uma variável de saída da ferramenta PPAP (*Production Part Approval Process*). Ela exige que os fornecedores comprovem a existência de um processo produtivo que atenderá aos requisitos de qualidade do consumidor e apliquem as ferramentas necessárias para que o produto seja fruto de um processo seguro e sob controle, com variações mínimas de processo. (SAE, 2014, tradução nossa)

### 2.3.2 Norma SAE J1739

Esta norma refere-se a Análise dos Modos de Falha e Efeitos em processos de montagem (PFMEA) e a Análise dos Modos de Falha Efeitos no design de peças (DFMEA). Segundo a SAE (2014) ela auxilia o engenheiro responsável pelo projeto na identificação e redução dos riscos de processo e produto fornecendo os termos apropriados, requerimentos, tabelas e gráficos que classifiquem o nível dos riscos e formulários referentes a este processo. Como qualquer norma, há itens que devem ser cumpridos e outros que são apenas recomendados para auxiliar o responsável pelo desenvolvimento do FMEA.

### 2.4 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS (FMEA)

Neste item será abordado rapidamente o conceito de FMEA e algumas recomendações básicas para o desenvolvimento dele, mas as etapas de construção da ferramenta serão explicadas mais detalhadamente no próximo capítulo.

A ferramenta FMEA é uma técnica utilizada por engenheiros que visa identificar e entender possíveis falhas de processo ou de produto antes mesmo que elas ocorram, para que assim possam ser evitadas impossibilitando que atinjam o cliente, sendo ele o consumidor final ou mesmo o processo seguinte. (OMDAHL 1988, ASQC 1983).

A análise das falhas pode ser feita de diversas formas, mas o modo mais eficaz é a combinação deles para que o resultado final além de satisfatório seja também economicamente viável, aqui vale apenas frisar que uma das vantagens desta ferramenta é o baixo custo de seu desenvolvimento, se for realizado da maneira correta. Assim, se ela for superdimensionada em alguma das etapas, perderá a exequibilidade.

A abordagem mais comum e econômica, segundo Palady (2004), é se basear nas experiências e lições aprendidas do time responsável pelo desenvolvimento do FMEA, tendo como base projetos de processos similares ao que será estudado. Caso haja divergência das informações dos integrantes do time em alguma operação ou elemento, deve-se então levar a discussão para o segundo nível e verificar dados estatísticos para que haja certeza da informação. Se não for possível, caso não haja nenhum outro estudo similar para comparação, utiliza-se modelos matemáticos, simulações ou engenharia de confiabilidade para identificar e definir as falhas.

Empresas utilizam o FMEA como uma das ferramentas de mais significância afim de prevenir falhas e erros de acontecer e conseqüentemente atingir o consumidor final. (KECECIOGLU, 1991).

O FMEA é, então, uma técnica preventiva que disponibiliza ao engenheiro responsável pelo projeto meios analíticos e metódicos de identificar previamente falhas no processo ou produto, reduzindo o risco de elas ocorrerem. Para cada potencial falha será estudado qual a seriedade caso ela venha a ocorrer, qual é a probabilidade que ela ocorra (com qual frequência) e quais são seus meios de detecção no processo.

Como explica Palady (2004), o FMEA devidamente desenvolvido deve:

- i. Identificar as possíveis falhas do processo ou produto;
- ii. Identificar as causas de cada falha e também os efeitos gerados por ela;
- iii. Definir quais são os defeitos críticos e que devem ser corrigidos prioritariamente;
- iv. Providenciar um plano de controle como também ações de correção para cada falha;
- v. Providenciar frequente acompanhamento das principais falhas.

## 2.5 EXIGÊNCIA DO FMEA NOS SISTEMAS DE QUALIDADE

Como mencionado acima, o FMEA é uma exigência para todos sistemas de qualidade e também para todas empresas. Esta poderosa ferramenta não aparecerá necessariamente com o nome FMEA, mas sim como uma exigência e um trabalho de equipe contínuo, de todas as partes envolvidas no projeto, de tentar prevenir eventuais problemas tomando ações preventivas para que eles não aconteçam. Este tipo de pensamento deve acompanhar o engenheiro durante todas etapas de projeto evitando falhas e maximizando seus resultados.

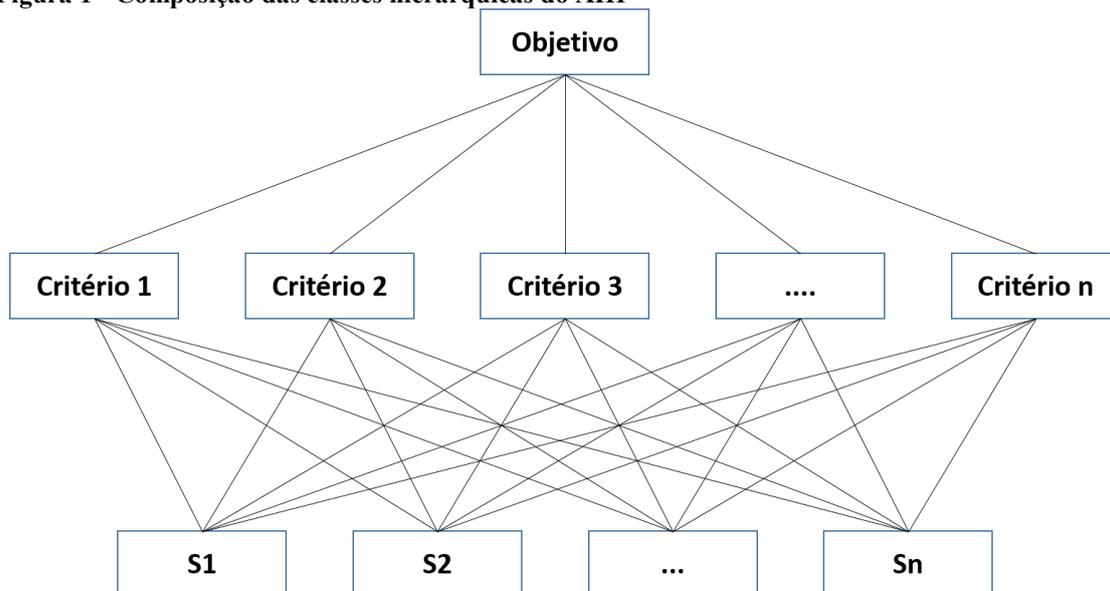
Não há dúvidas que a preocupação em prevenir falhas e analisar minuciosamente os riscos de um novo projeto é muito importante. Porém, para muitas empresas, a ferramenta FMEA não é considerada como uma técnica de avaliação. Para Palady (2004) o FMEA será considerado, no futuro, como exigência universal para as companhias e sistemas de qualidade. Atualmente algumas organizações exigem para seus fornecedores, e também para projetos internos, a aplicação do FMEA. Como foi citado acima, alguns exemplos de sistemas de qualidade que aplicam o FMEA são o sistema de qualidade ISO/TS 16949:2009, a Norma do Departamento de Defesa 1629, a Sociedade de

Engenheiros Automobilísticos SAE J1739. Segundo Palady (2004) algumas normas referentes a outros setores utilizam a ferramenta não sendo uma exigência, mas sim como conduto, por exemplo a *current Good Manufacturing Practices* (cGMP) da *Food and Drug Administration* e também a família de normas da ISO 9000.

## 2.6 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

O método de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) foi inicialmente proposta por Saaty nos anos 70s (SAATY 1979, 1980). AHP é um método para auxílio em tomada de decisões quando existe vários critérios a serem avaliados. No AHP um problema de tomada de decisão complicado pode ser decomposto em diversas classes hierárquicas, como mostra a estrutura do AHP na Figura 1. (KOU et al, 2012).

**Figura 1 - Composição das classes hierárquicas do AHP**



Fonte: (Kou; Ergu; Peng; Shi , 2012. Modificado pelo autor)

O diagrama mostrado na Figura 1 é baseado em três níveis hierárquicos sendo o primeiro o objetivo, o segundo os critérios e por último as alternativas.

A metodologia AHP deve ser usada para auxiliar em uma decisão, mas primeiramente um problema de decisão deve ser reconhecido e estruturado mostrando a relação entre os níveis hierárquicos como mostra a Figura 1. Normalmente é utilizado as cinco etapas mencionadas abaixo para a análise AHP: (KOU et al, 2012).

1. Definir e decompor o problema nos níveis hierárquicos;
2. Estruturar um conjunto de matrizes para que seja feita uma comparação par a par;
3. Calcular os autovalores e auto vetores através do Método do Auto vetor (EM);
4. Verificar a coerência dos resultados das matrizes;
5. Escolher as alternativas para tomada de decisão.

Como cita Larrubia (2010) depois que os problemas foram decompostos eles devem ser analisados. Esta análise é feita tendo como base a comparação par a par dos problemas estruturados em forma de matriz, e deve ser levado em consideração características concretas e subjetivas. É através desta etapa que será atribuído pesos diferentes para cada alternativa.

**Quadro 2 - Escala fundamental para comparação par a par.**

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Importâncias iguais	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraca	Experiência e julgamento favorece levemente uma atividade do que a outra
3	Importância moderada	
4	Moderada forte	Experiência e julgamento favorece fortemente uma atividade do que a outra
5	Importância forte	
6	Muito forte	A atividade é favorecida fortemente em relação a outra, sua dominância é demonstrada na prática.
7	Importância demonstrada	
8	Muito forte <i>plus</i>	A evidencia favorecendo uma atividade do que a outra é da mais alta ordem de afirmação
9	Extrema importância	
<b>Reciprocidade</b>	Quando <i>a</i> atividade <i>a</i> é caracterizada com algum dos números acima sobre outra atividade <i>b</i> , então <i>b</i> tem o valor recíproco se comparado com <i>a</i> .	Uma suposição válida
<b>Números racionais</b>	Para valores fora de escala	Para forçar a coerência

Fonte: (Saaty; Vargas, 2012. Modificado pelo autor, tradução nossa).

Após a atribuição dos pesos para cada alternativa é montado a matriz de comparação entre os critérios como mostra o Quadro 3. Sendo  $w$  os valores das alternativas e  $C$  cada critério.

**Quadro 3 - Comparação entre as alternativas através da matriz.**

Critérios	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	...	C <sub>n</sub>
C <sub>1</sub>	$w_1/w_1$	$w_1/w_2$	$w_1/w_3$	...	$w_1/w_n$
C <sub>2</sub>	$w_2/w_1$	$w_2/w_2$	$w_2/w_3$	...	$w_2/w_n$
C <sub>3</sub>	$w_3/w_1$	$w_3/w_2$	$w_3/w_3$	...	$w_3/w_n$
...	...	...	...	...	...
C <sub>n</sub>	$w_n/w_1$	$w_n/w_2$	$w_n/w_3$	...	$w_n/w_n$

Fonte: (Salomon; Marins; Duduch, 2009. Modificada pelo autor).

Segundo Larrubia (2012) é importante que a matriz, depois de montada, seja normalizada, ou seja, cada elemento será dividido pela soma dos elementos das respectivas colunas, de modo que a soma dos valores normalizados de cada coluna será um. Também deve ser calculado a média das linhas, o que significa a prioridade de cada critério, dividindo a soma dos valores de cada linha pelo número de alternativas da linha.

Depois do cálculo e normalização da matriz, determinação das prioridades, assim como Salomon (2004) sugere, é calculado a coerência dos elementos.

CR (*Consistency Ratio* – Razão de Consistência) explicita a coerência dos resultados obtidos através da Equação 1, proposta por Saaty. No cálculo da CR está considerado um índice de erro aleatório (RI) associado a matriz de julgamento.

$$CR = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n-1) \cdot RI} \quad (1)$$

Sendo que  $\lambda_{\text{máx}}$  é o autovalor que considera a consistência dos julgamentos, e é obtido através da multiplicação do vetor das prioridades pela coluna de cada critério. Somando os valores das linhas obtém-se o peso de cada julgamento. Finalmente dividindo cada peso pela sua respectiva prioridade relativa tem-se o vetor de coerência. A média do vetor de coerência será o próprio  $\lambda_{\text{máx}}$ .

O índice de consistência aleatória (RI) é obtido através amostras aleatórias geradas por matrizes recíprocas. (SAATY; VARGAS, 2012).

Os valores recomendados de RI por Saaty e Vargas (2012) estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1 – Recomendação da média do índice de consistência aleatória (RI).**

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Fonte: (Saaty; Vargas, 2012. Modificado pelo autor).

Saaty (2001) afirma ainda que o valor de CR não deve ser maior do que 20%, e caso seja, os julgamentos feitos anteriormente devem ser revistos afim de reduzir a inconsistência, pois resultados com alto nível de inconsistência pode invalidar os resultados do AHP.

A última etapa deste método é verificar sua sensibilidade. Segundo Larrubia (2012) deve-se alterar as variáveis envolvidas afim de reconhecer qual delas é mais sensível a mudanças. Então, altera-se os pesos dos critérios, o que pode mudar a ordem das prioridades e, dependendo do resultado, o julgamento prioritário será substituído por outro.

## 2.7 ETAPAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO PROJETO EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.

O intuito deste item é explicar, de forma sucinta, todas as etapas necessárias para implementação de um novo projeto em uma indústria automobilística, contemplando desde o estudo inicial de viabilidade do projeto, até a implementação no local de destino. A ideia é deixar claro em qual etapa deve-se iniciar o estudo do PFMEA e até quando deve-se investir em seu desenvolvimento.

### 2.7.1 Estudo inicial de viabilidade e aprovação

Antes do projeto ser aprovado pela gerência, deve ser feito um estudo que mostrará a viabilidade e exequibilidade deste projeto. No caso de uma linha nova de produção, por exemplo, fatores decisivos devem ser levados em consideração como: o local onde será instalada; a grade salarial e acordo com sindicato de leis trabalhistas do local; quantidade da produção anual; gastos médios com equipamentos, maquinários,

instalações prediais e posteriormente com mão de obra; a lucratividade que o projeto acarretará depois de implementado; etc.

É muito importante que este primeiro estudo seja feito levando em consideração possíveis oportunidades de expansão da produção, no caso da demanda aumentar.

A ideia é apresentar as informações necessárias afim de convencer todos níveis de gerencia que o projeto é exequível e que o investimento para sua realização retornará lucratividade para a empresa.

Se há dados eloquentes para implementação do projeto, este estudo será analisado por uma banca de gestores, e se necessário, pelo próprio presidente da empresa, para que então seja aprovado por eles. A aprovação do projeto significa literalmente a liberação da verba necessária para sua realização, sendo assim, esta é a etapa mais importante de todo o desenvolvimento do projeto.

### **2.7.2 Desenvolvimento do projeto**

Após o a devida aprovação, inicia-se a fase de desenvolvimento das partes que irão compor o projeto como um todo, como linha de montagem principal, linhas de sub montagem, centros de usinagem, etc.

Neste ponto, no caso da linha de montagem, o processo de produção deve ser atentiosamente estudado e desenvolvido, a fim de minimizar os desperdícios da produção e maximizar a lucratividade da empresa. Aqui, todos os conceitos de produção enxuta e eliminação de desperdícios devem ser aplicados, evitando elementos Não Agrega Valor (NAV).

É a partir deste desenvolvimento inicial que ferramentas necessárias para a elaboração do projeto são aplicadas. Uma ferramenta de análise muito utilizada é o Fluxo de Processo (FP), onde será detalhada cada operação que compõe o processo apresentando informações como tempo de ciclo de cada uma delas, ferramentas utilizadas, peças utilizadas, cada movimento que o operário fará para completar a operação, todos movimentos Agrega Valor (AV) e também os NAVs, o tempo de ciclo total do processo. O FP auxiliará o engenheiro ao longo do projeto para entender melhor a funcionalidade da linha de produção, e também o fornecedor que ficará responsável em desenvolver o maquinário necessário para produção. Esta ferramenta deve ser finalizada logo no começo do desenvolvimento do projeto, pois servirá como base para escrever outras documentações cruciais.

Outra ferramenta importante é a Lista de Materiais, onde todas as peças que compõe o produto são listadas, incluindo os diferentes níveis desde a peça fundida, até sub montagens de conjuntos. Proliferações, caso exista, devem ser listadas também.

Nesta etapa é iniciado também o desenvolvimento do *Ergonomics Design Requirements and Assessment* (EDRA), que visa limitar a movimentação e esforço dos operários para evitar que eles desenvolvam qualquer doença ergonômica. É uma exigência que para cada processo com operações manuais exista o EDRA afim de proteger o trabalhador. Este documento começa a se escrito logo após o FP e será finalizado e validado, pelo responsável em ergonomia do projeto, somente depois que o processo estiver implementado e funcionando corretamente.

Finalmente, é aqui que se dá início ao PFMEA, que, suportado pelo FP é escrito de forma analítica e metódica para todas operações do processo. O PFMEA deve ser previamente escrito pelo responsável do processo, para que posteriormente a validação dos elementos do PFMEA seja feita com mais facilidade pelo time multifuncional de PFMEA. Assim como o EDRA, o PFMEA começa a ser escrito logo após o FP e acompanhará a vida útil do projeto, pois o PFMEA é uma ferramenta viva e deve ser constantemente atualizada até que o processo inicial seja substituído por outro.

### **2.7.3 Escolha do fornecedor**

Para projetos de grande porte, que gerará elevado custo a empresa, normalmente na escala de milhões, a escolha do fornecedor deve ser feita rigorosamente baseando-se apenas em critérios técnicos, financeiros e levando em consideração o tempo de execução.

Para projetos deste tipo, a empresa deve ter em vista ao menos três fornecedores para cotação inicial, mas o ideal é que exista entre três e cinco. Tal exigência é justificada pois, se algum fornecedor for desqualificado por não atender aos critérios técnicas, ou ao prazo, ou mesmo em caso de desistência, sempre existirá a segurança extra das outras opções, diminuindo as chances do projeto ser cancelado por falta de fornecedor.

Os fornecedores prioritários devem ser escolhidos com base em suas experiências anteriores, o que é fundamental para saber se seu trabalho atende a expectativa do cliente ou não e se o fornecedor tem capacidade de suportar o cliente com assistência técnica qualificada e fornecimento de peças extras (*Spare Parts*) por exemplo. Lembrando que este item engloba apenas a parte técnica da escolha do fornecedor. Enquanto ao prazo, caberá ao próprio fornecedor dizer se tem tempo disponível para desenvolver e

implementar o projeto, ou se já está saturado de pedidos, mas logicamente esta informação é dada logo que o convite ao fornecedor é colocado.

Para a qualificação técnica do fornecedor, é enviado a ele toda documentação necessária para que ele possa fazer um estudo preliminar do projeto. Dentre estes documentos inclui o FP, lista de materiais, desenhos modelados em 3D e em 2D do produto entre outras. Assim, após um prazo determinado, o fornecedor envia a proposta técnica do projeto para o engenheiro responsável para que ela possa ser analisada. Neste ponto, é gerado um documento chamado *Machine Purchase Comparison* (MPC) que analisa detalhadamente a proposta criada pelo fornecedor, alinha e corrige as informações para que fiquem o mais próximo do projeto inicial. A ideia do MPC é fazer com que todos fornecedores desenvolvam projetos iguais e com equipamentos compatíveis, para que assim a divergência no preço da cotação seja pelo seu serviço e não por oferecerem equipamentos ou soluções diferentes uns dos outros. É nesta etapa que o fornecedor pode ser desqualificado tecnicamente por não atender as exigências do engenheiro.

Após a aprovação do MPC dos fornecedores, é realizado reuniões pessoalmente para que todos detalhes e dúvidas geradas no MPC sejam sanadas e esclarecidas. É a partir destas reuniões que o fornecedor vai finalmente cotar o preço do seu serviço com base nos requerimentos do engenheiro, e é durante estas reuniões que novas soluções poderão surgir.

Com todas as cotações em mãos, dos fornecedores que atendem tecnicamente o projeto, o fornecedor final é escolhido. Nesta etapa é avaliado somente o valor dos orçamentos, independentemente do nível técnico de conhecimento de cada fornecedor, e logicamente o fornecedor que ofereceu menor custo será escolhido.

Para que haja imparcialidade na escolha e ética nas negociações, o engenheiro responsável pelo projeto não tem permissão de saber o orçamento antes que o fornecedor seja escolhido. Caso contrário o engenheiro poderia guiar o fornecedor para que ele gerasse o menor orçamento, dando preferência a ele.

#### **2.7.4 Reunião de *Kickoff* e Engenharia Contínua**

Exatamente como a tradução da palavra, a reunião de *kickoff* é o chute inicial para começar a construção do projeto. É a primeira reunião com o time do projeto e o fornecedor escolhido, onde são ajustados os últimos detalhes, como datas e locais das próximas etapas, ou também as funções que cada membro do time assumirá a partir

daquele ponto. Esta reunião é de extrema importância para evitar que erros sejam cometidos por conta de má interpretação ou de falha na comunicação entre cliente e fornecedor, lembrando que um pequeno erro pode acarretar em enorme prejuízo para companhia, uma vez que está sendo desenvolvido um projeto de milhões de reais.

A comunicação eficaz com o fornecedor é fundamental para o sucesso do projeto, comunicação esta que é estabelecida desde o primeiro contato antes da escolha do fornecedor final e se estende até a fase de implementação. Esta troca de informações chama-se Engenharia Contínua e conta como uma etapa do projeto. O objetivo, assim como a reunião de *kickoff*, é evitar que falhas sejam cometidas ao longo do desenvolvimento do projeto e que fornecedor e cliente estejam sempre alinhados perante informações relevantes a implementação, como prazos a cumprir, itens técnicos pendentes, data de pagamento, local e modo de entrega dos equipamentos, quando será gerada e entregue a nota fiscal para liberação do pagamento, legislações de envio da mercadoria, etc.

Toda esta ideia e sinergia necessária para o andamento do projeto e para evitar que erros sejam cometidos, principalmente por falta de comunicação, é uma aplicação indireta e eficaz do FMEA, não como uma ferramenta de processo estruturada em tabelas, mas sim como a atitude de todo time envolvido no projeto e também do fornecedor para prevenir falhas. Este é um esforço mutuo para minimizar ou anular o efeito que possíveis falhas poderiam causar no resultado final.

### **2.7.5 Tryout**

O *tryout* é uma das últimas etapas no desenvolvimento de um projeto, é neste item que é feita uma prévia da aprovação e validação do processo. Para o *tryout*, o fornecedor deve apresentar o processo já desenvolvido e capaz de produzir. O engenheiro deve validar o projeto antes que ele seja enviado e efetivado no local de destino, para isto o fornecedor deve disponibilizar o processo inteiro montado, e se não houver disponibilidade física para montagem, pelo menos em seções e com total funcionalidade.

Esta ação é altamente recomendada pelo fornecedor, pois durante o *tryout* o engenheiro pode observar se todos os itens descritos por ele estão sendo corretamente elaborados, e caso ainda haja alguma divergência, será mais fácil tomar uma ação corretiva. O *tryout* não é uma exigência mas sim uma recomendação, e se não for realizado, e por algum motivo haja falhas de projeto no processo, os custos para reparar

estes erros serão muito maiores depois do processo implementado do que se fossem detectados durante o *tryout*. O custo de transporte de retorno de equipamentos que não deveriam ser enviados ou que foram erroneamente projetados é um exemplo do dano que a empresa pode sofrer pelo motivo do não cumprimento desta etapa, e com isto, será afetado também o prazo de entrega do projeto.

Mais uma vez o conceito de FMEA aparece, onde a finalidade da ação é novamente prevenir que possíveis falhas aconteçam, tomando uma atitude preventiva para que o projeto não sofra um impacto negativo no final.

É muito importante também que, durante o *tryout*, o engenheiro revise o PFMEA que já foi escrito durante a primeira etapa do projeto e valide todas as operações, revendo informações pendentes e fazendo as devidas correções. As operações críticas devem ser analisadas mais profundamente revendo cada tipo de modo de falha, o que causou o modo de falha e o efeito que isso vai gerar para o cliente.

### 3 PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO PFMEA

Durante este estudo foi visto o conceito de sistemas de qualidade, foi exemplificado de forma breve alguns dos sistemas mais utilizados atualmente pelas empresas de manufatura, foi explicado as principais etapas para o desenvolvimento de um novo projeto de uma linha de montagem e dito em qual etapa o PFMEA deve começar a ser desenvolvido, também foi apresentado o conceito de PFMEA e exaltado sua importância no cenário global das empresas de manufatura, principalmente automobilística.

Neste capítulo será explicado detalhadamente como é realizado o processo de construção da ferramenta PFMEA para uma linha nova de produção de motores.

Devido às limitações da empresa em que este trabalho foi desenvolvido é necessário realizar algumas considerações:

- i. O projeto foi desenvolvido juntamente com o time de Engenharia de Manufatura de uma empresa automotiva localizada em São José dos Campos no estado de São Paulo;
- ii. Algumas decisões tomadas durante o desenvolvimento não são exigências da ferramenta PFMA mas sim o modo como a empresa prefere agir com relação a análise de riscos;
- iii. Como especificação global da empresa, as informações do PFMEA, PCP (*Process Control Plan*), PF (*Process Flow*) e outras ferramentas associadas ao controle do processo são armazenadas no *software* de gerenciamento de PFMEA *Stature* versão 4.3.(Figura 2).

Segundo a empresa, a construção do PFMEA pode ser feita sob três diferentes níveis, que serão explicados abaixo, referentes a qualidade de informação de manufatura disponível para o responsável pelo PFMEA.

No primeiro nível o PFMEA é desenvolvido de uma maneira generalizada, pois ainda não há um produto definido ou específico para o processo, por exemplo o processo para usinagem de blocos de motor sem especificação de modelo ou tipo de bloco, sabe-se simplesmente que será produzido blocos de motores. (GM – GMS OPERATING TOOLS, 2000).

O segundo nível refere-se ao PFMEA para um processo cujo qual existe um produto definido e específico, porém ainda não foi estabelecido informações e

características finais de manufatura, como o local onde a fábrica será instalada, o volume de produção anual do processo, quantos postos de trabalho o processo terá e o nível de automatização do processo. (GM – GMS OPERATING TOOLS, 2000).

O desenvolvimento do PFMEA deste trabalho, para a linha de montagem de motores, foi escrito sob o nível três, onde as principais características de manufatura do projeto, que foram citadas acima, estão definidas e todas informações necessárias para construção do processo específico do produto estão disponíveis.

**Figura 2 - Software Stature 4.3; gerenciador do desenvolvimento de PFMEA.**

Ranking	Effect	Criteria: Severity of Effect on Product (Customer Effect)	Effect
10	Failure to Meet Safety and/or Regulatory Requirements	Potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation without warning.	Failure to Meet Safety and/or Regulatory Requirements
9	Failure to Meet Safety and/or Regulatory Requirements	Potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation with warning.	Failure to Meet Safety and/or Regulatory Requirements
8	Loss or Degradation of Primary Function	Loss of primary function (vehicle inoperable, does not affect safe vehicle operation).	Major Disruption
7	Loss or Degradation of Primary Function	Degradation of primary function (vehicle operable, but at reduced level of performance).	Significant Disruption

Fonte: (Stature 4.3, 2014. Modificado pelo autor).

### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROCESSO

Como foi dito no item 2.7.2, logo depois da aprovação do projeto o engenheiro começa a desenvolver o fluxo de processo, que será a base para que o PFMEA possa ser composto. O PFMEA começou a ser escrito durante a fase de revisão do FP, onde todas as operações do processo já haviam sido determinadas, bem como o nível de automação que seria colocado no processo. Posteriormente, com modificações e atualizações de alguns postos de trabalho, naturalmente o PFMEA foi atualizado para se adequar a realidade do processo. O alinhamento com o engenheiro responsável pelo processo é fundamental neste ponto, pois é ele que possui alto conhecimento de todos os detalhes e todas operações do processo.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO PFMEA

De acordo com as diretrizes da empresa, o PFMEA sob nível três pode ser desenvolvido de algumas maneiras diferentes, porém, para este projeto, foi utilizado a combinação delas e não um método isolado.

É recomendado pela companhia, primeiramente, que o PFMEA seja baseado em outros processos, que já foram implementados em qualquer outra planta da empresa e que sejam similares ao que está sendo desenvolvido, de modo que, facilite o trabalho do responsável pelo PFMEA economizando tempo e verba da empresa. De qualquer modo, nunca existirá dois processos exatamente iguais, então deve ser feito um estudo de similaridade ente os processos para verificar em até que ponto os PFMEAs podem ser comparados. Nesta primeira etapa somente as operações que divergirem do processo que está sendo comparado, no caso de operações manuais e automáticas por exemplo, deverão ser estudadas uma a uma para chegar a conclusão do nível de risco que ela representa.

O PFMEA pode ainda ser baseado em uma documentação padronizada da empresa chamada de *Bill of Process* (BOP), que guia de uma forma generalizada a construção de todos os processos utilizados internacionalmente na fábrica. O intuito do BOP é nivelar os processos, do mesmo produto, da companhia de modo que, independentemente do local em que os projetos são instalados, todos devem ter o maior nível de similaridade possível. O BOP é aplicado para auxiliar o engenheiro a desenvolver o processo economizando tempo e recursos da empresa, pois como já existe uma diretriz a ser seguida, o engenheiro deve apenas enquadrar o novo processo dentro dos parâmetros do BOP. Este tipo de documento é também utilizado para a construção da ferramenta de análise de riscos, que no caso é chamado de BOP de PFMEA, e tem a mesma finalidade do BOP para processo.

A última maneira e a mais ampla é a construção completa do PFMEA, onde todas operações são estudadas e, inicialmente, as informações são obtidas através de estudos estatísticos e também pelas experiências do engenheiro com projetos anteriores.

Lembrando que, como dito no item 2.5, o autor Palady (2004) recomenda que o PFMEA seja escrito primeiramente com base nas experiências e lições aprendidas do engenheiro e do time multifuncional de PFMEA, e em caso de divergência de informações entre os membros do time, ou em operações de alto risco, as estatísticas da operação em questão devem ser levadas em consideração. E é deste modo que a empresa atua com relação a construção do PFMEA. Caso contrário, o estudo estatístico de todas

as operações do processo demandaria muito tempo, não só do engenheiro responsável mas também de todo o time de PFMEA e das áreas envolvidas, e isto torna a implementação da ferramenta financeiramente inviável, sendo que os benefícios de sua aplicação não compensariam o alto investimento inicial. Reforçando, segundo Palady (2004) o PFMEA deve ser uma ferramenta de baixo custo para que a empresa obtenha ganhos com ela e não enfrente prejuízos.

O PFMEA da nova linha de montagem de motores foi baseado no PFMEA de um projeto do mesmo motor que já havia sido implementado na cidade de Flint, nos Estados Unidos da América. Também foi utilizado como base o BOP de PFMEA do motor que será produzido, afim de sanar algumas dúvidas decorrentes durante o desenvolvimento da ferramenta. Enfim, 80% do PFMEA do novo projeto foi escrito sendo suportado pelo PFMEA do site de Flint e também pelo BOP de PFMEA. O restante das operações, que não puderam ser comparadas aos dois documentos citados acima, fora analisado seguindo a ordem descrita nos próximos itens.

### 3.3 (PRIMEIRA FASE) ANÁLISE DO MODO DE FALHA

**Figura 3 – Exemplo de um formulário PFMEA.**

Operação	Nº. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc c	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN	Ações Recomendadas	Responsável
#a		#b	#c	#d	#e		#f	#g		#h	#i		#j		

Fonte: (Stature 4.3, 2014. Modificado pelo autor).

A Figura 3 mostra um formulário em branco do PFMEA, e a Figura 4 mostra um exemplo de aplicação do PFMEA utilizando as mesmas colunas de identificação. Na coluna #a é colocado a identificação da operação em questão. Na coluna #b é detalhado a função de cada elemento dentro da operação. Observando agora a coluna #c, ela lista todos os possíveis modos de falha que pode ocorrer naquele elemento, ou seja, quais são os potenciais tipos de defeito que pode vir a ocorrer naquele elemento. Na operação da Figura 4 o elemento é “Levantar o bloco de motor do suporte” e a potencial falha é “Bloco

danificado durante o processo”. Lembrando que em um elemento há a possibilidade de existir diversos modos de falha.

**Figura 4 – Exemplo do formulário PFMEA preenchido**

Operação	N. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN
2010/2020	A4-01-003	Levantar bloco de motor do suporte	Danificado durante o processo	Produção interrompida na estação	3		Material manuseado incorretamente pelo operador	3	Manutenção Preventiva	Inspeção visual de 100% na estação	7		84
				Vazamentos	7					Equipamento de teste a frio	6		
				Problemas de montagem nas operações seguintes	4					Equipamento de teste de vazamento – não em 100%	4		
										Apertadeira com monitoramento de ângulo	4		
				Material danificado pelo Lift assist	3		Equipamento de teste a frio	6		84			
							Equipamento de teste de vazamento – não em 100%	4					

Fonte: (Stature 4.3, 2014. Modificado pelo autor).

Uma atitude que ajuda a determinar os modos de falha do elemento é fazer a seguinte pergunta: o que pode ocorrer para que o elemento deixe de desempenhar sua função adequadamente? Para que esta abordagem funcione é importante manter a pergunta e a resposta o mais simples possível, caso contrário acarretará em exageros na avaliação do modo de falha. De acordo com Paul Palady (1997, p.57, grifo do autor) *“Mantenha a simplicidade o suficiente para obter a resposta e então pare. Planeje e implemente ferramentas mais complexas e mais avançadas somente se a resposta não for viável usando ferramentas mais baratas e que economize tempo.”*

### 3.3.1 Dificuldades na implementação da primeira fase

O desenvolvimento do PFMEA deve ser feito de uma forma analítica e concisa, de modo que não seja generalizada e aborde profundamente cada elemento das operações. Frequentemente, para facilitar a construção do PFMEA, os modos de falha são descritos de uma forma geral o que pode gerar ambiguidade, assim como explica Hirayama (2005), a identificação dos modos de falha deve ser escrita de maneira específica, abordando um nível significativo de detalhes da função. Uma dúvida frequente também é com relação a

quantidade de informação que deve ser abordada, assim como recomenda Palady (2004), não deve ser incluso todos os modos de falha possíveis e sim aqueles que possam ser tratados de forma prática, para isso utiliza-se o bom senso do time de PFMEA. Hirayama (2005) também explicita a necessidade de escrever os modos de falha em termos técnicos e físicos.

### 3.4 (SEGUNDA FASE) ANÁLISE DO POTENCIAL EFEITO DA FALHA

**Quadro 4 - Sugestão para classificação da severidade do efeito para PFMEA**

<b>Efeito</b>	<b>Grau de Severidade</b>	<b>Severidade ou Efeito no Processo (Efeito na Manufatura ou Linha de Montagem)</b>
<b>Severidade atinge segurança ou exigências regulatórias</b>	10	Podem colocar o operador em risco (usinagem ou montagem) sem aviso prévio.
	9	Podem colocar o operador em risco (usinagem ou montagem) com aviso prévio.
<b>Grande interrupção</b>	8	100% da produção pode ser perdida. Parada da produção ou do envio da mercadoria.
<b>Interrupção significativa</b>	7	Parte da produção pode ser perdida. Desvio do processo principal, redução da velocidade da linha de produção, ou mão de obra adicional pode ser requerida.
<b>Interrupção moderada</b>	6	100% da produção pode requerer retrabalho fora da linha antes da aprovação.
	5	Parte da produção pode requerer retrabalho fora da linha antes da aprovação.
	4	100% da produção pode requerer retrabalho dentro da estação de trabalho antes de ser processada.
	3	Parte da produção pode requerer retrabalho dentro da estação de trabalho antes de ser processada.
<b>Pouca interrupção</b>	2	Pequena inconveniência para o processo, operação ou operador.
<b>Sem efeito</b>	1	Sem efeito reconhecível.

Fonte: (AIAG, 2008. Modificado pelo autor).

A coluna #d descreve qual será a consequência e o impacto que o modo de falha causará no cliente. É importante devotar atenção máxima neste item, principalmente se estiver envolvido com a segurança pessoal do cliente.

A coluna #e mostra o nível da severidade do modo de falha. É um número que, na escala de 1 a 10, sendo 1 o menos crítico e 10 o modo de falha mais severo, representa qual será a consequência do modo de falha caso ele ocorra.

De acordo com AIAG (2008) a severidade pode ser ranqueada de acordo com o Quadro 4.

No caso da operação estudada, na Figura 4, os potenciais efeitos serão “Produção interrompida na estação”, “Vazamento” e “Problemas de montagem nas operações seguintes”, e para eles, segundo o Quadro 4, foi determinado os valores de severidade 3, 7 e 4 respectivamente.

### **3.4.1 Dificuldades na implementação da segunda fase**

O efeito do modo de falha deve refletir as consequências que o modo de falhar trará para o cliente, expondo indiretamente o nível de insatisfação do consumidor com relação aquele defeito. (PALAY, 1997). Um erro bastante comum é não adotar a visão do cliente o que resulta em uma análise superficial dos efeitos, e provavelmente será necessário reanalisar esses pontos.

Palay (1997) também afirma que existe uma certa confusão entre a utilização de efeitos globais ou locais. Este requisito dependerá de como o efeito afeta o cliente e quem é o cliente daquele modo de falha (Próxima operação, próximo processo, cliente final, etc.).

### **3.5 (TERCEIRA FASE) ANÁLISE DA CAUSA OU MECANISMO**

Como é mostrado na Figura 3, a coluna #f deve conter a descrição dos possíveis motivos que provocaram o modo de falha. Uma pergunta chave, mas não a única, que pode ser feita para conseguir esta descrição é: O que provocou o modo de falha a ocorrer? (PALADY, 2004).

No caso do elemento da operação 2010/2020 da Figura 4, o modo de falha é “Bloco danificado durante o processo” e as causas ou os mecanismos da falha são “Material manuseado incorretamente pelo operador” e “Material danificado pela talha”. Logo se tal modo de falha pudesse ser evitado, a probabilidade do defeito oriundo dos modos de falha mencionados acima acontecer seria nula. Neste ponto fica evidente a ideia

de prevenção de falhas e como a análise delas pode diminuir consideravelmente a probabilidade de produção de defeitos em um processo.

**Quadro 5 - Sugestão para classificação da ocorrência para PFMEA**

Probabilidade da Ocorrência	Grau de Ocorrência	Ocorrência das Causas (Incidentes por item ou por veículo)
<b>Muito Alta</b>	10	>100 por 1000 >1 por 10
<b>Alta</b>	9	50 por 1000 1 em 20
	8	20 por 1000 1 em 50
	7	10 por 1000 1 em 100
<b>Moderada</b>	6	2 por 1000 1 em 500
	5	0.5 por 1000 1 em 2000
	4	0.1 por 10000 1 em 10,000
<b>Baixa</b>	3	0.01 por 1000 1 em 100,000
	2	< 0.001 por 1000 1 em 1,000,000
<b>Muito Baixa</b>	1	Falha Eliminada por controle preventivo

Fonte: (AIAG, 2008. Modificado pelo autor).

Assim como o efeito do modo de falha pode ser classificado de acordo com sua severidade, a causa será classificada segundo a probabilidade de ela ocorrer. (STAMATIS, 2003). Este parâmetro é chamado de ocorrência e é mostrado na coluna #g, sendo que, numa escala de 1 a 10, a falha de maior incidência será classificada como 10 e a de menor probabilidade será 1. A quarta edição do manual de FMEA da AIAG (2008) sugere que a ocorrência seja classificada segundo o Quadro 5.

Com dados estatísticos de processos similares ao que está sendo desenvolvido, e também com a experiência do engenheiro responsável pelo processo, para ambas as

causas do modo de falha acima mencionado foi adotado o valor da ocorrência de 3, como mostra a coluna #g da Figura 4.

### 3.5.1 Dificuldades na implementação da terceira fase

Um erro comum no momento da identificação das causas dos modos de falha é não expandir a pesquisa para fora do processo. Deve-se incluir causas que tem origem no processo e também as outras vertentes, como causas oriundas do fornecedor, do cliente ou do ambiente. (PALADY, 2004). Segundo Hirayama (2005) é importante escrever todas as possíveis causas daquele modo de falha. Porém deve-se atentar para não introduzir causas que não são relevantes, ou que tem pouquíssima contribuição para o respectivo modo de falha, como cita Palady (2004).

### 3.6 (QUARTA FASE) - ANÁLISE DO CONTROLE DE PROCESSO

Após a identificação das causas de cada modo de falha é descrito na próxima coluna, #h na Figura 3, quais serão as medidas preventivas a serem tomadas a fim de identificar a falha e evitar sua ocorrência. Este item se chama Atual Controle de Processo. Alguns exemplos de controle de processo são: inspeção visual pelo operador; inspeção através de medidores pelo operador; inspeção automática por câmeras; marcação em determinada peça para confirmação da montagem; sistemas automáticos a prova de erro; etc.

O controle do processo, assim como o efeito e a causa, será classificado com uma numeração. Esta será a detecção, que traduz de forma quantitativa o poder de detecção que o específico método de controle possui. O grau de detecção também varia de um a dez, sendo dez a ausência de controle no elemento do processo, e se o elemento é a prova de erros será atribuído um. A AIAG (2008) recomenda que a detecção seja classificada seguindo o Quadro 6.

Continuando com o elemento em estudo, para a causa da falha “Material manuseado incorretamente pelo operador” foi atribuído os meios de detecção “Inspeção visual de 100% na estação”, “Equipamento de teste a frio”, “Equipamento de teste de vazamento” e “Apertadeira com monitoramento de ângulo”. E de acordo com a classificação recomendada pela AIAG (2008) foi atribuído a estes controles de processo respectivamente os seguintes valores de detecção 7, 6, 4, 4.

**Quadro 6 - Sugestão para classificação da detecção da falha para PFMEA**

Probabilidade da Detecção	Grau de Detecção	Detecção por Controle de Processo	Oportunidade de detecção
<b>Quase impossível</b>	10	Sem controle de processo atual; não se pode detectar; não é analisado.	Sem capacidade de detecção
<b>Muito remoto</b>	9	Falhas e erros não são fáceis de detectar (ex. auditorias do processo aleatórias)	Não provável de ser detectado
<b>Remoto</b>	8	Detecção do modo de falha pós processo pelo operador por meio visual, tátil ou sonoro.	Problema detectado após o processo
<b>Muito baixa</b>	7	Detecção do modo de falha no processo pelo operador por meio visual, tátil, sonoro ou gages.	Problema detectado na origem
<b>Baixa</b>	6	Detecção do modo de falha pós processo pelo operador através de gages variável ou no processo pelo operador usando gages atributivos.	Problema detectado após o processo
<b>Moderada</b>	5	Detecção da falha na estação pelo operador via gages variáveis ou por controle automatizado na estação que notifica o operador. Também medição na configuração; inspeção da primeira peça.	Problema detectado na origem
<b>Altamente moderada</b>	4	Detecção do modo de falha pós processo por controle automático que detecta partes não conformes e previne o processo posterior.	Problema detectado após o processo
<b>Alta</b>	3	Detecção do modo de falha na estação por controle automático que detecta partes não conformes e previne o processo posterior nelas.	Problema detectado na origem
<b>Muito alta</b>	2	Detecção de falhas na estação por controle automático que detectam o erro e previnem partes não conformes de serem produzidas.	Detecção da falha com prevenção do problema
<b>Quase certa</b>	1	Prevenção de erro via design do dispositivo, design da máquina, ou design do produto. Partes não conformes não podem ser produzidas; produto e processo a prova de erro.	Não se aplica- Prevenção da Falha

Fonte: (AIAG, 2008. Modificado pelo autor).

Respectivamente, para a causa “Material danificado pela talha” foi identificado as seguintes detecções e sua numeração: “Equipamento de teste a frio” e 4, “Equipamento de teste de vazamento” e 4.

### 3.6.1 Dificuldades na implementação da quarta fase

Nesta fase é importante não só a determinação dos métodos de detecção iniciais como também os meios de detecção depois das ações recomendadas, que serão discutidas no item 3.9. Uma das dificuldades desta fase é estabelecer o responsável pela ação recomendada, e também manter com o prazo de sua implementação por exemplo.

Esta análise é muito importante, principalmente nos métodos de detecção após as ações recomendadas, porque elas que previnem a falha de acontecer e de chegar ao cliente, sendo ele o cliente final, o fornecedor, a manufatura ou o operador do processo posterior.

### 3.7 (QUINTA FASE) - REVISÃO COM O TIME MULTIFUNCIONAL

Após o processo ter sido definido, todas operações serem estudadas, os modos de falha de cada elemento serem identificados, as possíveis causas dos modos de falha serem reconhecidos e os métodos de controle da falha se detectado, por fim o PFMEA como um todo ser previamente escrito pelo responsável, é agora necessário o refino das informações.

Nesta etapa do desenvolvimento do PFMEA, o responsável pelo processo deve reunir profissionais competentes a fim de montar um time multifuncional para discussão dos elementos de todas operações do processo. O time de PFMEA deve ser composto por profissionais de todas as áreas envolvidas no projeto como Engenharia de Qualidade, Engenharia de Processo, Engenharia de Manufatura, Assistência Técnica e Manutenção. Sendo assim, o time será formado por um representante de cada área e o facilitador do time, que é o engenheiro responsável pelo PFMEA.

Como o projeto de montagem do motor estudado neste trabalho será alocado na Argentina, o time multifuncional é composto pelos representantes da Engenharia de Manufatura, três profissionais da Manufatura, Manutenção e Qualidade da planta de Rosário – Argentina, o facilitador do time, que é o engenheiro responsável pelo desenvolvimento do processo, faz parte do time de Engenharia de Manufatura situada em São José dos Campos, em alguns momentos, também um profissional do Suporte Técnico deve auxiliar nas reuniões.

O *software Stature 4.3* utilizado pela empresa, como mostrado na Figura 5, disponibiliza uma aba para organizar as reuniões de PFMEA, onde fica disponível

informações pertinentes ao encontro, como os membros do time que estavam presentes, o que foi discutido durante a reunião, quais modificações serão feitas, quando será a próxima reunião, etc. É importante que esta ata da reunião seja escrita para que haja um histórico das discussões sobre itens relevantes do PFMEA.

**Figura 5** - *Software Stature 4.3*, aba para organização das reuniões de PFMEA.

PFMEA Meetings/Sessions			
Session Date	Duration of Session (hrs)	Agenda of Session	Comments in Session
07-out-2014	4	PFMEA Review	
14-out-2014	4	PFMEA Review	
28-out-2014	4	PFMEA Review	
04-nov-2014	3	PFMEA Review	
11-nov-2014	4	PFMEA Review	

Fonte: (Stature 4.3, 2014. Modificado pelo autor).

Como citado anteriormente, se o PFMEA já foi escrito de antemão será mais fácil conduzir a análise das operações pois elas deverão ser apenas confirmadas pelo restante do time. Esta ação economiza expressivamente o tempo utilizado para finalizar esta etapa, e consequentemente diminui os custos envolvidos durante o desenvolvimento do PFMEA. Durante as reuniões é importante que todos os membros do time se expressem caso haja discordância de algum item que foi escrito previamente ou caso haja alguma dúvida em um dos elementos e precise ser confirmado por métodos de análise avançada.

Portanto, na reunião é absorvido todos os dados de entrada dos membros do time, como lições aprendidas, informações de experiências anteriores, sugestões de melhoria, etc., para que possam ser discutidas e utilizadas no refinamento do PFMEA.

Após o término das reuniões e, consequentemente a finalização da primeira validação do PFMEA, o documento deve estar completo. Caso haja posteriormente alguma alteração no processo o documento pré validado deve ser atualizado de acordo com as mudanças feitas de modo que PFMEA e processo estejam sempre apresentando informações coerentes. Se alguma operação exibir risco muito elevado, deverá ser

atribuído a este defeito um plano de contenção de falhas mais eficaz afim de diminuir o nível do risco da falha, e logicamente esta mudança deve ser expressa no PFMEA.

### 3.7.1 Dificuldades na implementação da quinta fase

É importante para que a condução das reuniões de PFMEA seja feita de modo eficaz, sem demandar muito tempo e conseqüentemente sem desperdiçar recursos, todos os membros do time multifuncional devem estar alinhados tecnicamente com relação ao processo e também ao produto.

Uma vez que este o grupo tem conhecimento sobre todas etapas do processo e também todos elementos do produto, as reuniões serão concentradas somente nas informações referentes ao PFMEA, e não em dúvidas sobre o processo ou sobre o funcionamento do produto.

Esta falta de informação por parte de algum membro do time pode gerar incerteza nas informações de entrada, o que ocasiona dúvidas desnecessárias nos outros membros do time.

## 3.8 DEFINIÇÃO DOS RISCOS CRITICOS DO PROCESSO

A definição das operações com risco elevado é fundamental para aplicação do PFMEA, pois se esta análise não for realizada todos recursos investidos no desenvolvimento da ferramenta até este ponto seriam desperdiçados. Como a ideia do PFMEA é diminuir os riscos do processo, é nesta etapa que é estabelecido em quais elementos esta ação preventiva deverá ser realizada, tendo em vista que, depois de decidir quais são as operações, será trabalhado em cima delas maneiras de diminuir o risco por meios de diversas ações recomendadas.

O cálculo do *Risk Priority Number* (RPN) é o passo inicial para esta análise, ele é calculado automaticamente pelo software *Stature 4.3* através da Equação 2 e é exibido na coluna #j do formulário de PFMEA, como mostra a Figura 3. O RPN representa o nível de severidade em conjunto com ocorrência e detecção de cada elemento, sendo que, para níveis altos destes parâmetros, retornará um valor elevado de RPN o que evidencia a necessidade de um estudo mais aprofundado do elemento em questão. (STAMATIS, 2003).

O Manual do FMEA, da AIAG (2008) recomenda que não seja estabelecido um valor limite de RPN afim de determinar quais operações deverão ter ações corretiva, pois o valor do RPN pode representar certa ambiguidade de interpretação para algumas operações, e portanto não representa de fato o quão crítica a operação é. Por exemplo, um elemento com número de RPN igual a 160 e um segundo elemento com 135. O primeiro elemento é mais crítico que o segundo, portanto deve ser o primeiro a ser implementado medidas corretivas? Não necessariamente. Se os dois elementos apresentarem o mesmo nível de detecção, 5 por exemplo, mas o primeiro obteve um RPN elevado por conta da ocorrência (8) ser elevada e a severidade (4) ser baixa, em contrapartida o segundo elemento, com RPN menor, possui ocorrência bem baixa (3) porém altíssima severidade (9), o item mais crítico portanto, será o que possui menor RPN, e é neste elemento que a ação de controle deve ser prioritária. Se fosse estipulado um valor limite de RPN para tomada de decisão, e este valor fosse maior que 135, apenas o elemento com RPN 160 seria analisado, sendo que, não é o que representa maior risco para o processo.

Atualmente a empresa não utiliza o RPN isoladamente como parâmetro de escolha para tomada de decisão. Para o estudo deste trabalho foi utilizado um novo método chamado *Risk Limiting*, que será explicado no próximo item. Este método classifica os elementos das operações em três níveis, sendo o primeiro atribuído a elementos mais críticos, e o terceiro para elementos com criticidade pouco relevante. De acordo com a empresa, é exigido que todos elementos que apresentarem nível um, portanto os mais críticos, deverão ter um plano de controle para que diminua o nível de risco, o que, no caso representa passar de nível um para nível dois. (GM – GMS OPERATING TOOLS, 2000). Os elementos de prioritários de nível um neste caso serão os que apresentarem maior RPN ou maior severidade.

$$RPN = Severidade \times Ocorrência \times Detecção \quad (2)$$

### **3.8.1 Risk Limiting**

Este novo método de classificação de riscos, como comentado acima, divide os elementos do processo em três níveis de criticidade, sendo o nível um o mais crítico e três o menos crítico. O *Risk Limiting* já é utilizado pelos sites da empresa na Europa por dois anos e providencia um meio mais significativo de avaliar os riscos. (GM – GMS

OPERATING TOOLS, 2000). A classificação dos elementos, assim como o cálculo do RPN, é feita automaticamente pelo software *Stature 4.3*.

Os elementos que apresentam nível um são considerados de alto risco e deverão ser prioritários para tomada de ação afim da redução do risco. Segundo o certificado de qualidade *Built in Quality 3 (BIQ III)*<sup>1</sup>, deve ser atribuído uma ação recomendada à todos os modos de falha que forem classificados como nível um visando a redução do nível do risco. (GM – GMS OPERATING TOOLS, 2000).

As falhas classificadas como nível dois são considerados de risco moderados e são os próximos elementos a serem estudados para estabelecer planos de controle, logo depois dos elementos com nível um.

Para os elementos de nível três não há necessidade de implementação de ações de redução de risco, sendo que este nível de risco não representa grande criticidade para o processo.

O primeiro passo deste método é a comparação isolada da severidade com a ocorrência, através do Quadro 7.

**Quadro 7 - Severidade sobre ocorrência.**

<b>Ocorrência</b>	<b>10</b>	3	1	1	1	1	1	1	1	1	
	<b>9</b>	3	1	1	1	1	1	1	1	1	
	<b>8</b>	3	2	1	1	1	1	1	1	1	
	<b>7</b>	3	2	2	2	1	1	1	1	1	
	<b>6</b>	3	2	2	2	1	1	1	1	1	
	<b>5</b>	3	3	2	2	2	2	1	1	1	
	<b>4</b>	3	3	3	3	2	2	1	1	1	
	<b>3</b>	3	3	3	3	3	3	2	2	1	
	<b>2</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
	<b>1</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
		<b>Severidade</b>									

Fonte: (GM-GMS Operating Tools, 2013. Modificado pelo autor).

<sup>1</sup> BIQ III – Certificado de qualidade internacional conferido pela empresa global a todos os sites da empresa do mundo que atenderem os requisitos de qualidade descritos no certificado. O nível III deste certificado corresponde ao processo que possui meios de detecção de falhas para que os defeitos não ultrapassem o posto posterior ao da sua criação.

A comparação é feita tendo como valores de entrada o número referente a severidade e o número referente a ocorrência do modo de falha. O valor de saída é o nível desta comparação, que pode ser um, dois ou três.

O segundo passo é a comparação entre a severidade e a detecção, que é feita de acordo com o Quadro 8.

**Quadro 8 - Severidade sobre detecção.**

<b>Detecção</b>	<b>10</b>	3	2	1	1	1	1	1	1	1	
	<b>9</b>	3	2	1	1	1	1	1	1	1	
	<b>8</b>	3	2	2	2	2	2	1	1	1	
	<b>7</b>	3	3	3	3	2	2	2	2	1	
	<b>6</b>	3	3	3	3	3	3	2	2	1	
	<b>5</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
	<b>4</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
	<b>3</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	<b>2</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	<b>1</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	
		<b>Severidade</b>									

Fonte: (GM-GMS Operating Tools, 2013. Modificado pelo autor).

A comparação é feita analogamente ao primeiro passo, e a resposta de saída será o nível da severidade sobre a detecção que pode ser de um, dois ou três.

Finalmente, o terceiro passo é comparar os dois últimos dados retirados do Quadro 7 e do Quadro 8. Esta comparação é realizada através do Quadro 9.

**Quadro 9 –Severidade sobre ocorrência e severidade sobre detecção.**

<b>Severidade sobre Detecção</b>		<b>Nível de Prioridade</b>		
	<b>3</b>	2	2	3
	<b>2</b>	1	2	3
	<b>1</b>	1	1	2
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
		<b>Severidade sobre Ocorrência</b>		

Fonte: (GM-GMS Operating Tools, 2013. Modificado pelo autor).

Esta comparação final resultará no nível de risco do elemento em estudo, sendo ele um, dois ou três, como detalhado no início deste tópico.

Para evidenciar que a informação gerada por este novo método é real será reavaliado o mesmo exemplo citado no tópico anterior, onde um elemento com detecção 5, severidade 4 e ocorrência 8, e por fim RPN igual a 160, é comparado com outro elemento de detecção 5, severidade 9, ocorrência 3 e RPN 135, porém será utilizado o método de *Risk Limiting* para verificar sua criticidade.

Para o primeiro elemento, de severidade 4 e ocorrência 8, com ajuda do Quadro 7, é retornado o valor 1. A comparação da severidade (4) com a detecção (5), através do Quadro 8, retorna o nível 3. E por fim, a comparação de severidade sobre ocorrência (1) e severidade sobre detecção (3), com ajuda do Quadro 9, retorna o valor 2. Isto significa que, apesar do elevado RPN, o modo de falha não deve ser tomado como prioritário para tomada de ação preventiva.

Agora analisando o segundo elemento através deste novo método, e com a ajuda do Quadro 7, tendo como dados de entrada a severidade (9) e a ocorrência (3), retorna o nível 1. E comparando a severidade (9) com a detecção (5), através do Quadro 8, retornará o nível 2. E finalmente, comparando a severidade sobre a ocorrência (1) e a severidade sobre a detecção (2), o nível final de criticidade do modo de falha será 1. Este valor representa que, apesar do RPN ser mais baixo, este modo de falha deve ser o primeiro a receber o plano de controle a fim de diminuir seu nível de risco.

Analogamente ao exemplo citado acima, as operações com risco nível um (1) foram estabelecidas para o processo da linha de montagem de motores, como mostra a Figura 6, e estas operações serão discutidas em reuniões para ser determinado planos de ação que diminuirá o risco de cada operação.

**Figura 6 – a) Operações que com risco nível um; b) Colunas referentes as ações recomendadas e também para os valores finais recalculados.**

**a)**

Operação	N. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc.	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN	Oc. Sobre Sev.	Det. Sobre Sev.	Risk Priority Level
2010/2020	A4-01-005	Instalar (4) lubrificadores dos pistões.	Danificado no processo, O-rig cortado.	Durabilidade ou garantia	7		Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Não se pode detectar.	10		210	2	1	1

b)

Ação Recomendada	Responsavel	Resultado das Ações				
		Ações tomadas	Sev	Oc.	Det	RPN

Fonte: (Stature 4.3, 2014. Modificado pelo autor).

A Figura 6 a) representa o local onde é indicado o nível do risco do modo de falha. A Figura 6 b), inicialmente sem preenchimento, representa o campo onde a ação recomendada para redução do risco deve ser inserida, e também na região #B esta os valores de RPN e RPL (*Risk Priority Level*) recalculados.

### 3.9 PLANO DE AÇÃO

Todo estudo e desenvolvimento do PFMEA até o momento teve o objetivo de exaltar os modos de falha que representam maior risco para o processo. Nesta etapa, os modos de falha que foram classificados sendo de alto risco devem ser analisados e um plano de controle para cada modo de falha será implementado afim de prioritariamente reduzir sua severidade, depois diminuir a probabilidade de ocorrência, aumentar o poder de detecção e por fim reduzir o nível de criticidade. (STAMATIS, 2003).

Alguns modos de trabalhar com a redução do risco do processo estão listados nos próximos itens, entre eles está o sistema a prova de erro, modos de verificação, modos, métodos de contenção de erros, etc. A decisão do tipo de ação que será tomada, e qual índice (Severidade, ocorrência ou detecção) do modo de falha será trabalhado deve ser levada para aprovação considerando o orçamento disponível e o tempo para implementação do plano em questão.

Como a empresa visa a obtenção do certificado BIQ III, todos modos de falha classificados como risco nível um serão reanalisados afim da redução do nível do risco, porém, se a empresa não dispor dos recursos necessários para implementação das melhorias recomendadas (pessoas qualificadas, verba disponível ou tempo para

implementação) será prioritário os modos de falha que apresentarem maior severidade e maior RPN. (GM – GMS OPERATING TOOLS, 2000).

### 3.9.1 Eliminando erros

O defeito do processo pode ser eliminado através de modificações no design do produto, e apesar de se tratar de um processo mais complexo por alterar características do produto, envolvendo a área de desenvolvimento de produto e consequente o FMEA de design, é meio mais eficaz, que de fato elimina o erro ao contrário de preveni-lo. (LIXIA ,BO , 2010).

Algumas vantagens da eliminação de possíveis erros são:

- i. Redução significativa de custos se for implementado antes da finalização do desenvolvimento do produto;
- ii. Método mais efetivo de todos, com relação aos custos;
- iii. Uma vez que o erro foi identificado e eliminado, nenhuma ação posterior é necessária.

Figura 7 - a) Peça com alto nível de simetria; b) Peça com baixo nível de simetria.



Fonte: (Página Autopeças Xavier<sup>2</sup>, Motor Parts<sup>3</sup>, modificado pelo autor).

Exemplificando, durante a montagem de um motor é usado diferentes peças com alto nível de assimetria, mas que se forem montadas da maneira incorreta pode acarretar em sérias consequências para o funcionamento do motor. Uma dessas peças é a junta

<sup>2</sup> Disponível em: [http://www.autopecasxavier.com.br/JUNTA\\_CABECOTE\\_CHEVET.p.14332p.aspx](http://www.autopecasxavier.com.br/JUNTA_CABECOTE_CHEVET.p.14332p.aspx), acessados em out. 10.

<sup>3</sup> Disponível em: [http://www.motorparts.com.br/product\\_images/k/007/JUNTA%25~1\\_\\_55442\\_zoom.JPG](http://www.motorparts.com.br/product_images/k/007/JUNTA%25~1__55442_zoom.JPG), acessados em out. 10.

alocada entre o cabeçote e o bloco do motor, um dos lados da junta deve conter algo que o diferencie do outro lado, para que o operador não monte a peça de modo errado. A Figura 7, na parte superior mostra uma junta com alto nível simétrico, o que aumenta as chances da montagem incorreta, enquanto a imagem inferior ilustra uma junta com pouca simetria, o que impossibilita sua montagem de modo errado.

### 3.9.2 Prevenindo defeitos

Prevenir erros é a ideia limiar da ferramenta FMEA como um todo. Identificar o defeito em potencial antes que ele ocorra e preveni-lo. Há inúmeros métodos para prevenção de erros, incluindo a eliminação dele, como foi comentado no item 3.9.1. Os pontos chaves para prevenção de defeitos são: (LIXIA ,BO , 2010).

- i. A melhor maneira de prevenir é eliminando defeitos;
- ii. Assegurar produtos aceitáveis para um gama alta de variedade;
- iii. Construir o produto de modo que a falha não pode ser gerada;
- iv. Construir produtos, processos, equipamentos, meios de fixação para evitar que a peça errada seja usada (equipamentos *Poka Yoke*<sup>4</sup>)
- v. Procedimentos, documentações e treinamentos que auxiliem a prevenção de erros;
- vi. Documentações a prova de erro que evitarão que o defeito chegue no cliente;
- vii. Retornar produtos não conforme para o fornecedor.

Na manufatura de motores pode ser citado alguns exemplos de sistemas de prevenção de defeitos, como sensor indutivo para confirmação da montagem de peças metálicas, verificação do volume de óleo do motor, medição de parâmetros como torque, utilização de equipamentos auxiliares para montagem das peças afim de inviabilizar a alocação de peças erradas, etc. (WOOD, 2001).

---

<sup>4</sup> *Poka Yoke* é uma técnica para evitar erros humanos simples no trabalho. O engenheiro de manufatura Shingeo Shingo desenvolveu a ideia em uma formidável fermenta para atingir o defeito zero e eventualmente eliminar a inspeção do controle de qualidade. (KOGYO, 1988, tradução nossa).

### 3.9.3 Detectando defeitos

A ideia da detecção de erros não é mais preventiva, mas sim corretiva, uma vez que o defeito já foi produzido e busca-se detectá-lo a fim de corrigir antes que ele afete a produção ou chegue no cliente. (LIXIA ,BO , 2010).

Alguns pontos chave são listados abaixo:

- i. A detecção engloba todos defeitos que não puderam ser prevenidos;
- ii. A detecção deveria ser direcionada para parâmetros diretos como o tamanho da fásca da vela ou o grau de vibração do motor;
- iii. Os equipamentos de detecção devem estar próximos do processo, ou seja, logo antes de começar a operação ou logo após a finalização dela;
- iv. A detecção deveria rejeitar peças não conforme e providenciar imediatamente uma resposta para o operador;
- v. A detecção deveria ser confiável, certificada e monitorada.

Alguns exemplos de equipamentos de detecção são câmeras nas operações que identificam o tipo de peça que está sendo montada e sinalizam caso a peça errada seja montada, equipamentos de medição durante o processo que segregam os motores que obtiverem resultados fora do estabelecido pelo engenheiro. Os testes mais comuns no processo de montagem de motores são o *Cold Test* e o *Torque to Turn*, eles testam toda funcionalidade do motor durante o processo de montagem a fim de garantir que o cliente receberá um produto que exerça todas suas funções como planejado, e eles são realizados em 100% dos motores que são produzidos.

### 3.9.4 Controle das perdas

O potencial falha existe principalmente pela falta de detecção. Uma vez que o defeito é gerado o próximo passo será conter o defeito para minimizar seus danos.

Os pontos chaves para controlar possíveis perdas são listados abaixo.

Modificar o design do produto para resultados catastróficos, por exemplo a caixa preta dos aviões, aplicação de *airbag* nos automóveis; (LIXIA ,BO , 2010).

- i. Testes finais nos produtos logo antes do envio para o cliente;
- ii. Deve ser o último recurso;
- iii. Resposta rápida, a comunicação do defeito é de extrema importância para o controle de perdas.

Por exemplo, se uma montadora automobilística se comunicar com seus clientes rapidamente e com sinceridade, ela poderá efetuar o reparo dos automóveis com agilidade assim que os clientes descobrirem os defeitos de qualidade gerados pela empresa, o que reduziria expressivamente suas perdas. (LIXIA ,BO , 2010).

### 3.9.5 Process Plan Control (Plano de Controle de Processo)

O Plano de Controle de Processo (PCP) é uma ferramenta diretamente ligada com o PFMEA. Seu objetivo é atribuir um método de detecção para cada modo de falha bom como a frequência de monitoramento dele. (HU, 2007).

Neste trabalho seu preenchimento também foi disponibilizado pelo *software Stature 4.3*, como mostra a Figura 5. O preenchimento do PCP é mandatório, sendo que o PFMEA usa informações contidas nele como parte de seu preenchimento.

Para o PCP, assim como no PFMEA, as operações são separadas por elementos e cada elemento tem suas informações referentes ao método de plano de controle que será usado em cada modulo de falha. O PCP de algumas operações da linha de montagem de motores está representado na Figura 8. (HU, 2007).

Figura 8 -- Principais informações da ferramenta Plano de Controle de Processo.

Operação	Nº. Da estação	Função do processo	Potencial modo de falha	Características do processo.	Especificação/ Tolerância do processo	#2a #2b #2c #2d #2e #2f #2g #2h					Plano de Reação	Atual controle de detecção do processo		
						Avaliação/ Medidas							Método de controle	Departamento Responsável
						Técnica	Amostra - Produção		Número da estação de medição	Método de controle				
	Tamanho	Frequência												
2010/2020	A4-01-003	Levantar bloco de motor do suporte	Danificado durante o processo	Bloco não danificado	Bloco não danificado	Visual	1	100%		JES	Montagem	Descartar bloco danificado e substituir por outro novo	Inspecção visual de 100% na estação	
						Teste a frio	1	100%		Maquina	Montagem	Descartar bloco danificado	Equipamento de teste a frio	
						Teste de vazamento	1	100%		Maquina	Montagem	Descartar bloco danificado	Equipamento de teste de vazamento – não em 100%	
													Apertadeira com monitoramento de ângulo	
												Equipamento de teste a frio		
												Equipamento de teste de vazamento – não em 100%		

Fonte: (Stature 4.3, 2014. Modificado pelo autor).

Na coluna #2a foi preenchido os modos de falha de cada elemento, assim como no PFMEA.

Na coluna #2b foi preenchido a característica do produto daquele modo de falha, ou seja, qual seria a situação sem que a falha tivesse ocorrido.

Na coluna #2c foi descrito a tolerância para cada item, que para processos de montagem é, quase sempre, o mesmo que a característica do produto ou processo. Este item é mais utilizado para processos de usinagem, onde quase sempre é exigido tolerâncias para as operações.

Na coluna #2d foi analisado, de acordo com o plano de controle de detecção, a técnica de detecção para cada modo de falha, podendo ser através de máquinas de teste, equipamentos de medição ou simplesmente visual.

Na coluna #2e foi inserido a frequência de medição correspondente a técnica da coluna #d.

Na coluna #2f foi atribuído uma área responsável pela detecção do modo de falha correspondente.

Na coluna #2g foi estudado e inserido o plano de reação de cada modo de falha, que significa a ação necessária ou a consequência caso o defeito seja gerado.

Finalmente, na coluna #2h foi atribuído um plano de controle de detecção, que representa como e quando o defeito deverá ser detectado.

## 4 UTILIZAÇÃO DA AHP PARA AVALIAÇÃO DO PFMEA

Neste item a metodologia de auxílio em tomadas de decisão AHP será implementada sobre a ferramenta de prevenção de falhas PFMEA das empresas escolhidas, afim de analisar se a sua utilização é recomendada ou se a inconsistência do PFMEA é expressiva.

É necessário fazer algumas considerações iniciais com relação a ferramenta PFMEA antes da escolha das empresas que serão estudadas.

A documentação não foi retirada de diferentes empresas, embora tenha sido citado. Na realidade, foram escolhidos aleatoriamente o PFMEA de algumas operações do processo de montagem de motores de uma empresa e o PFMEA de cada operação foi estudado com base na metodologia de AHP. Este método de trabalho é coerente com a metodologia escolhida, como citado no item 1.3, Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) explicam que é possível, dentro do estudo de caso, a pesquisa do mesmo objeto de uma única empresa porém adotando diferentes perspectivas.

### 4.1 ESCOLHA DA EMPRESA

A empresa escolhida é uma montadora de automóveis e motores localizada na cidade de São José dos Campos no Estado de São Paulo. Os dados foram obtidos através da Engenharia de Manufatura de *Powertrain*, ou seja, o setor responsável pela manufatura de motores da fábrica.

O subsetor chama-se *New and Major* e gerencia todos novos programas instalados na América do Sul.

Os PFMEAs foram escolhidos de um novo programa de montagem de motores que será alocado na América do Sul. A nova linha de montagem de motores inicialmente terá capacidade de produção de 120.000 motores por ano. Nela será produzido apenas um modelo de motor com seis variações sendo o motor bicombustível, o motor a gasolina, o motor a gás, e também as versões manual e automático de cada uma delas. A linha de montagem será flexível para que no futuro receba, sem grandes alterações na estrutura e no processo, outro modelo de motor além do que será inicialmente produzido.

A produção ocorrerá em três turnos de oito horas de trabalho, cinco dias por semana e quatro semanas por mês.

Para o projeto desta linha de montagem, o cronograma das diversas etapas está representado na Figura 11 do Anexo A pelo gráfico de *Gantt*<sup>5</sup>, criado através do programa *Excel*, versão 2013, da *Microsoft*, como um dos requisitos do projeto.

Como consta no gráfico de *Gantt*, a SOP (*Start of Production*) deste projeto ocorrerá somente no segundo semestre de 2016, isto significa que a validação final do PFMEA deste trabalho será realizada apenas em 2016. Como a SOP do projeto ocorrerá em 2016 não será possível parte da análise da 4ª FASE de construção do PFMEA, referente a mudanças dos meios de detecção após a determinação das ações recomendadas.

O Quadro 10 representa as operações, ou empresas escolhidas que serão estudadas segundo o método AHP. Como mencionado no item 1.3, inicialmente será feito a análise de sete das empresas, podendo se estender posteriormente caso haja inconsistência dos resultados.

**Quadro 10 - Empresas que terão o documento PFMEA analisado.**

<b>Empresas</b>	<b>Operação</b>	<b>Descrição</b>
<b>Empresa 1</b>	OP 2010	Carregar Bloco no Pedestal.
<b>Empresa 2</b>	OP 2020	Instalar (4) injetores de óleo.
<b>Empresa 3</b>	OP 2030	Separa a base do Bloco.
<b>Empresa 4</b>	OP 2040	Limpar excesso de cola do bloco.
<b>Empresa 5</b>	OP 2050	Verificar a montagem da capa do mancal.
<b>Empresa 6</b>	OP 2060	Instalar base no bloco.
<b>Empresa 7</b>	OP 2070	Instalar pistões no bloco.

#### 4.1 DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS ERROS DAS ETAPAS DO PFMEA

Com base na teoria explicada neste trabalho, a primeira etapa da construção dos documentos PFMEAs foi estudada afim de reconhecer erros presentes nos documentos. As irregularidades encontradas foram listadas na Tabela 2.

<sup>5</sup> O gráfico de *Gantt* é uma ferramenta de gerenciamento de projetos que providencia um formato padrão de visualização das informações referentes a agenda do projeto, ele lista as atividades necessárias para realização do projeto e suas datas de início e fim em um formato de calendário. (SCHWALBE, 2013. Tradução nossa)

Tabela 2 - Erros encontradas na 1ª fase de construção dos PFMEAs.

<b>PRIMEIRA FASE – FUNÇÃO + MODO DE FALHA</b>		
<i>Identificação</i>	<i>Discrepância</i>	<i>Quantidade</i>
1.1	Não Abrange todas as funções	2
1.2	Descrição muito abrangente do modo de Falha.	6
1.3	Modo de falha sem relação com a função.	3
1.4	Informação duplicada.	1
1.5	Modo de falha escrita de forma não técnica.	1
1.6	Não abrange todos modos de falha	4

Analogamente, para a segunda fase da construção do PFMEA, denominada em atribuir os efeitos dos modos de falha e classifica-los de acordo com a severidade, os erros desta fase foram encontrados e escritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Erros encontradas na 2ª fase de construção dos PFMEAs.

<b>SEGUNDA FASE – EFEITO + SEVERIDADE</b>		
<i>Identificação</i>	<i>Discrepância</i>	<i>Quantidade</i>
2.1	Descrição genérica do efeito.	13
2.2	Efeito não considera o cliente.	2
2.3	Efeito identificado erroneamente.	2
2.4	Pontuação da severidade incoerente.	2

Novamente, agora para a terceira fase da construção do PFMEA, onde é identificado as possíveis causas dos modos de falha e atribuído a elas o número da ocorrência, foi identificado as irregularidades desta fase e listados na Tabela 4.

É importante citar que, como se trata da documentação de um novo projeto ainda não há base de dados para que seja feita uma análise estatística afim de atribuir o valor da ocorrência. Deste modo foi atribuído à todas as causas o valor “3”, afim de neutralizar o peso da “Causa/Mecanismo” nesta primeira análise. Porém estes valores deverão ser reavaliados quando a linha de produção gerar dados suficientes para isto.

Tabela 4 - Erros encontradas na 3ª fase de construção dos PFMEAs.

<b>TERCEIRA FASE – CAUSA + OCORRÊNCIA</b>		
<i>Identificação</i>	<i>Discrepância</i>	<i>Quantidade</i>
<b>3.1</b>	Não abrange todas as causas.	3
<b>3.2</b>	Análise errada da causa.	1
<b>3.3</b>	Descrição da causa generalizada	2
<b>3.4</b>	Causa sem relação com o modo de falha	2
<b>3.5</b>	Duas causas em um único campo	1

De modo similar, a quarta fase foi analisada para que fosse possível a identificação de erros da construção do formulário. A 4ª FASE é referente aos meios de controle de detecção do processo e a eles é atribuído um valor de detecção. As discrepâncias estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Erros encontradas na 4ª fase de construção dos PFMEAs.

<b>QUARTA FASE – CONTROLE DO PORCESSO +DETECÇÃO</b>		
<i>Identificação</i>	<i>Discrepância</i>	<i>Quantidade</i>
<b>4.1</b>	Detecção sem relação com modo de falha.	4
<b>4.2</b>	Detecção difere de outro item com a mesma descrição.	3
<b>4.3</b>	Detecção escrita de forma não técnica.	3
<b>4.4</b>	Valor da detecção incoerente	5

A quinta fase de construção do PFMEA não foi analisada metodologicamente pois não existe um modo exato de se realizar as reuniões de PFMEA. As recomendações visam auxiliar para que esta etapa flua da melhor maneira e demandando o menor tempo possível. Deste modo seria extremamente difícil mensurar a quantidade de erros cometidos em uma reunião, tendo em vista que não existe de fato os erros.

#### 4.2 APLICAÇÃO DO AHP PARA AUXÍLIO NA TOMADA DE DECISÃO

Esta parte do trabalho visa utilizar a metodologia AHP, explicada com as fundamentações teóricas no item 2.6, para analisar os dados obtidos através dos formulários de PFMEA descritos no item anterior.

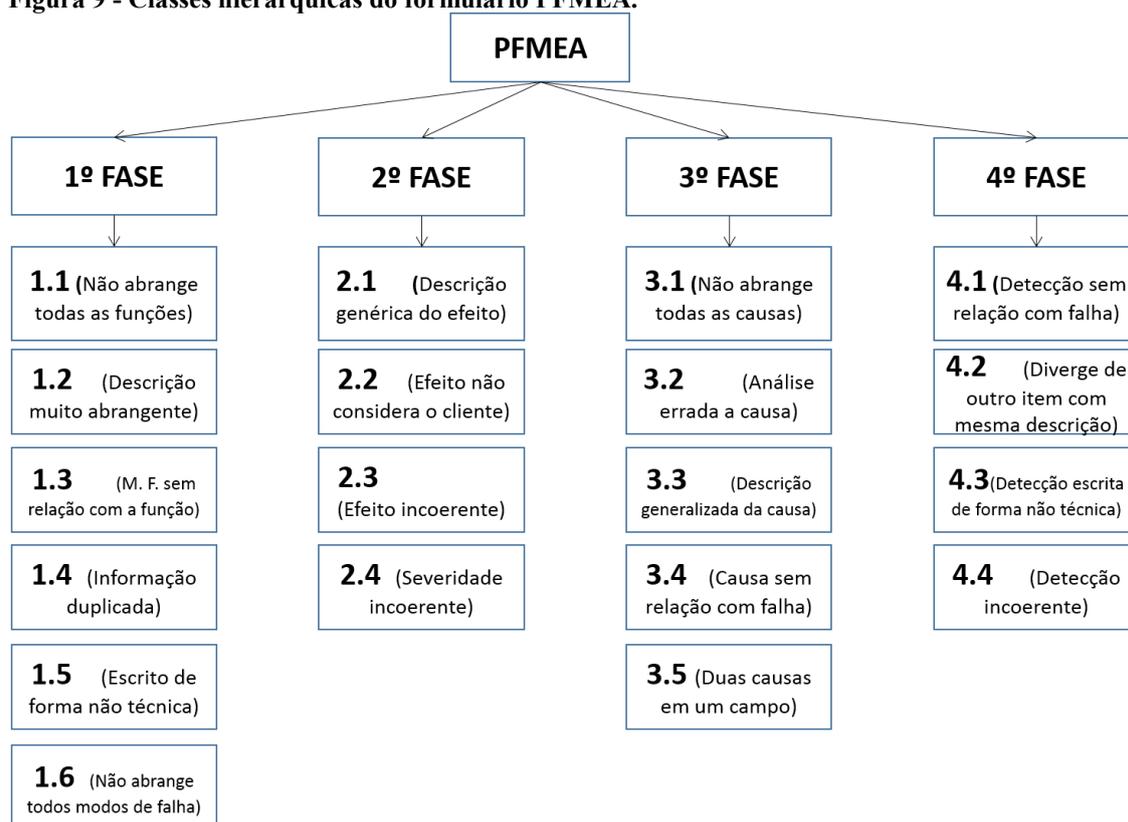
Como explicado no item 2.6, o desenvolvimento da metodologia AHP é realizado em 5 passos, que serão executados a seguir.

#### 4.2.1 Decomposição Hierárquica das Classes

Assim como foi explicado na fundamentação teórica, o processo de desenvolvimento da ferramenta PFMEA foi classificado hierarquicamente entre as fases de construção e apresentado na Figura 9. Onde o objetivo é a eliminação de erros da ferramenta PFMEA, e os critérios são as fases de construção do documento.

Abaixo de cada critério foi localizado os erros cometidos na construção da respectiva fase de construção, e são estes que serão analisados afim de determinar qual tem o maior peso com relação ao restante.

Figura 9 - Classes hierárquicas do formulário PFMEA.



### 4.2.3 Construção da matriz de comparação, cálculos e tomada de decisão

A matriz comparativa foi escrita com auxílio da Escala Fundamental proposta por Saaty (2009). Cada critério da coluna da esquerda foi comparado com os critérios da primeira linha e a eles foram atribuídos um valor de significância que terá um impacto no peso de cada critério, como mostra a Tabela 6.

Os valores foram escolhidos de acordo com a experiência em PFMEA do autor como também de outros profissionais que trabalham com esta ferramenta da qualidade, durante depoimentos pessoais.

A Tabela 7 mostra os valores da matriz principal, presente na da Tabela 6, normalizados bem como o cálculo dos pesos de cada critério e a soma total dos pesos de cada critério.

**Tabela 6 - Matriz de comparação da 1ª fase de construção do PFMEA.**  
*MATRIZ DE COMPARAÇÃO - PRIMEIRA FASE*

	<b>Critérios</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>
<i>Não abrange todas as funções</i>	<b>1.1</b>	1	1/2	1/5	1/2	1/3	1
<i>Descrição muito abrangente</i>	<b>1.2</b>	2	1	1/3	1	1/2	2
<i>Sem relação com a função</i>	<b>1.3</b>	5	3	1	3	2	5
<i>Informação duplicada</i>	<b>1.4</b>	2	1	1/3	1	1/2	2
<i>Escrito de forma não técnica</i>	<b>1.5</b>	3	2	1/2	2	1	3
<i>Não abrange todos modos de falha</i>	<b>1.6</b>	1	1/2	1/5	1/2	1/3	1

**Tabela 7 - Matriz normalizada da 1ª fase.**

<b>Critérios</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>	<b>Prioridade</b>	<b>Peso</b>
<b>1.1</b>	0,0714	0,0625	0,0779	0,0625	0,0714	0,0714	<b>0,0695</b>	<b>6,0150</b>
<b>1.2</b>	0,1429	0,1250	0,1299	0,1250	0,1071	0,1429	<b>0,1288</b>	<b>6,0098</b>
<b>1.3</b>	0,3571	0,3750	0,3896	0,3750	0,4286	0,3571	<b>0,3804</b>	<b>6,0313</b>
<b>1.4</b>	0,1429	0,1250	0,1299	0,1250	0,1071	0,1429	<b>0,1288</b>	<b>6,0098</b>
<b>1.5</b>	0,2143	0,2500	0,1948	0,2500	0,2143	0,2143	<b>0,2229</b>	<b>6,0352</b>
<b>1.6</b>	0,0714	0,0625	0,0779	0,0625	0,0714	0,0714	<b>0,0695</b>	<b>6,0150</b>
<b>SOMA</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1,0000</b>	<b>-----</b>

Sendo assim, a primeira fase apresentou a taxa de coerência igual a  $CR = 0,003$ , que está dentro dos níveis aceitáveis recomendados por Saady (2001), não sendo necessário a reavaliação dos julgamentos realizados para montar a matriz de comparação. Analisando as prioridades de cada critério, observa-se que o item 1.3 “Sem relação com a função” apresentou a maior prioridade com 38%, ou seja, o formulário que conter o erro

1.3 será menos eficiente em cumprir com sua função do que o PFMEA que conter o erro 1.6 “Não abrange todos modos de falha” com 6,9%.

Analogamente, os itens referentes ao desenvolvimento da segunda fase foram estudados e a eles foram atribuídos valores seguindo a Escala Fundamental proposta por Saaty (2009). Os resultados iniciais para construção da matriz de comparação estão expressos na Tabela 8, e a matriz normalizada bem como os valores calculados das prioridades e dos pesos estão representados na tabela 9.

**Tabela 8 - Matriz de comparação da 2ª fase de construção do PFMEA.**

<i>SEGUNDA FASE</i>					
	<b>Critérios</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>
<i>Descrição genérica do efeito</i>	<b>2.1</b>	1	1/6	1/2	1/3
<i>Efeito não considera cliente</i>	<b>2.2</b>	6	1	5	4
<i>Efeito incoerente</i>	<b>2.3</b>	2	1/5	1	1/3
<i>Severidade incoerente</i>	<b>2.4</b>	3	1/4	3	1

**Tabela 9 - Matriz normalizada da 2ª fase.**

<b>Critérios</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>Prioridade</b>	<b>Peso</b>
<b>2.1</b>	0,0833	0,1031	0,0526	0,0588	<b>0,0745</b>	<b>4,0817</b>
<b>2.2</b>	0,5000	0,6186	0,5263	0,7059	<b>0,5877</b>	<b>4,2531</b>
<b>2.3</b>	0,1667	0,1237	0,1053	0,0588	<b>0,1136</b>	<b>4,0033</b>
<b>2.4</b>	0,2500	0,1546	0,3158	0,1765	<b>0,2242</b>	<b>4,1717</b>
<b>SOMA</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-----

A análise da segunda fase de construção da ferramenta PFMEA apresentou o coeficiente de coerência igual a  $CR = 0,047$ , o que, apesar de ser maior do que o da 1ª FASE, também está dentro dos valores aceitáveis. Logo não é necessário a reavaliação dos julgamentos desta fase. O item que apresentou maior prioridade foi o item 2.2 “Efeito não considera o cliente” com 58,7%, o que representa que o PFMEA que conter este tipo de erro de construção terá seu desempenho reduzido se comparado com outro documento que apresentar o erro 2.1 “Descrição genérica do defeito” com 7,5%.

Novamente, o mesmo estudo será feito para a terceira fase de construção da ferramenta PFMEA. Os resultados iniciais para construção da matriz de comparação estão expressos na Tabela 10, e a matriz normalizada bem como os valores calculados das prioridades e dos pesos estão representados na tabela 11.

Tabela 10 - Matriz de comparação da 3ª fase de construção do PFMEA.

*TERCEIRA FASE*

	<b>Critérios</b>	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>3.5</b>
<i>Não abrange todas as Causas</i>	<b>3.1</b>	1	1/5	1/2	1/4	1/2
<i>Análise errada da causa</i>	<b>3.2</b>	5	1	4	2	4
<i>Descrição generalizada da causa</i>	<b>3.3</b>	2	1/4	1	1/3	1
<i>Causa sem relação com falha</i>	<b>3.4</b>	4	1/2	3	1	3
<i>Duas causas em um campo</i>	<b>3.5</b>	2	1/4	1	1/3	1

Tabela 11 - Matriz normalizada da 3ª fase.

<b>Critérios</b>	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>3.5</b>	<b>Prioridade</b>	<b>Peso</b>
<b>3.1</b>	0,0714	0,0909	0,0526	0,0638	0,0526	<b>0,0663</b>	<b>5,0279</b>
<b>3.2</b>	0,3571	0,4545	0,4211	0,5106	0,4211	<b>0,4329</b>	<b>5,0999</b>
<b>3.3</b>	0,1429	0,1136	0,1053	0,0851	0,1053	<b>0,1104</b>	<b>5,0258</b>
<b>3.4</b>	0,2857	0,2273	0,3158	0,2553	0,3158	<b>0,2800</b>	<b>5,0865</b>
<b>3.5</b>	0,1429	0,1136	0,1053	0,0851	0,1053	<b>0,1104</b>	<b>5,0258</b>
<b>SOMA</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1,0000</b>	-----

A análise do desenvolvimento da terceira fase do PFMEA resultou em um coeficiente de coerência de  $CR = 0,013$ , que está dentro da faixa aceitável recomendada por Saaty (2001), logo não é necessário a reavaliação dos julgamentos estabelecidos. Para esta fase, o item que apresentou prioridade mais elevada foi o 3.2 “Análises errada da causa” com 43,2%, isto representa que o PFMEA que tiver este tipo de erro trará resultados inferiores se comparado com outra documentação que obtiver o erro 3.1 “Não abrange todas as causas” com 6,6%, por exemplo.

Do mesmo modo que as etapas um, dois e três foram analisadas, agora será feito com a quarta fase. Aos itens da quarta fase foram atribuídos valores referentes a Escala Fundamental citada por Saaty (2009). Os resultados iniciais para construção da matriz de comparação estão expressos na Tabela 12, e a matriz normalizada bem como os valores calculados das prioridades e dos pesos estão representados na tabela 13.

Tabela 12 - Matriz de comparação da 4ª fase de construção do PFMEA.

*QUARTA FASE*

	<b>Critérios</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>
<i>Deteção sem relação com falha</i>	<b>4.1</b>	1	1/7	1/2	1/4
<i>Diverge de item com mesma descrição</i>	<b>4.2</b>	7	1	6	4
<i>Deteção escrita de forma não técnica</i>	<b>4.3</b>	2	1/6	1	1/2
<i>Deteção incoerente</i>	<b>4.4</b>	4	1/4	2	1

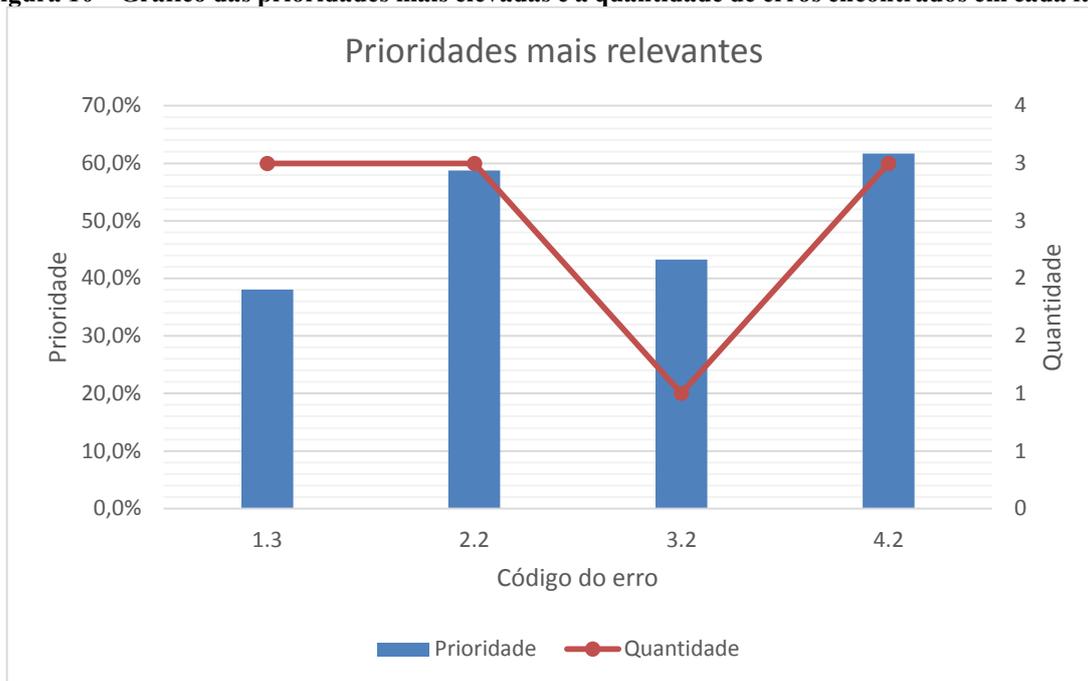
Tabela 13 - Matriz normalizada da 4ª fase.

<b>Crítérios</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>	<b>Prioridade</b>	<b>Peso</b>
<b>4.1</b>	0,0714	0,0916	0,0526	0,0435	<b>0,0648</b>	<b>4,0147</b>
<b>4.2</b>	0,5000	0,6412	0,6316	0,6957	<b>0,6171</b>	<b>4,1548</b>
<b>4.3</b>	0,1429	0,1069	0,1053	0,0870	<b>0,1105</b>	<b>4,0432</b>
<b>4.4</b>	0,2857	0,1603	0,2105	0,1739	<b>0,2076</b>	<b>4,0556</b>
<b>SOMA</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-----</b>

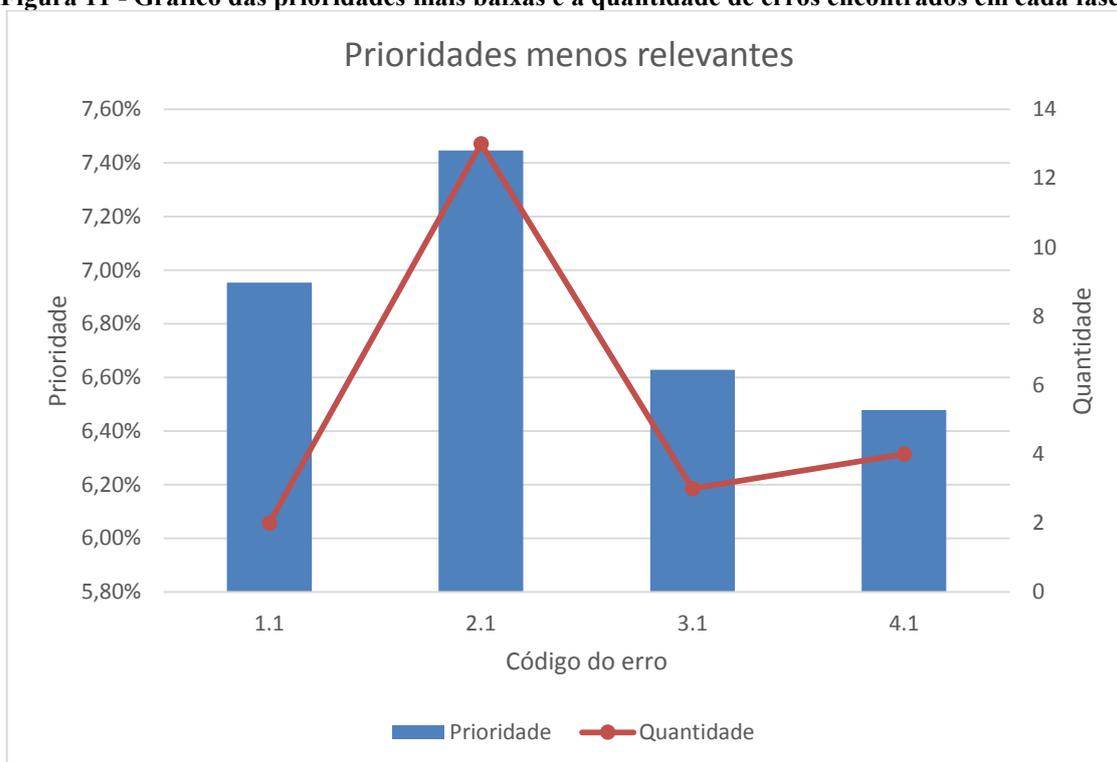
A análise da tabela de julgamentos e pesos proporcionou o cálculo da taxa de coerência, que foi igual a  $CR = 0,025$ , ou seja, significa que os julgamentos foram corretos e não há necessidade de reanalisar a matriz de paridade. O item 4.2 “Diverge do item com mesma descrição” apresentou maior prioridade com o valor de 61%, isto representa que se este PFMEA for comparado com outro que obteve o erro 4.1 “Detecção sem relação com falha” por exemplo, o documento com o erro denominado 4.2 apresentará menor desempenho em cumprir sua função.

A Figura 10 correlaciona a prioridade mais relevante de cada fase de construção do PFMEA com seus respectivos números de ocorrência. Os itens mais críticos de todas as etapas compreendem nos pontos 2.2 “Efeito não considera o cliente” e 4.2 “Diverge de item com mesma descrição”, ambos com aproximadamente 60% de prioridade e 3 ocorrências em todos os formulários preenchidos. Apesar do número de acontecimentos ser baixo, ambos possuem a prioridade expressiva se comparado com o restante dos itens. Isto significa que os formulários PFMEA que apresentaram estes dois itens devem ser revistos e corrigidos, para que a capacidade de resposta e a qualidade de informação da ferramenta seja aprimorada.

**Figura 10 – Gráfico das prioridades mais elevadas e a quantidade de erros encontrados em cada fase.**



**Figura 11 - Gráfico das prioridades mais baixas e a quantidade de erros encontrados em cada fase.**



Em contrapartida, a Figura 11 mostra os itens que apresentaram a menor prioridade entre todos das diferentes etapas de construção do PFMEA. Entre eles se destacam os itens 4.1 “Detecção sem relação com a falha” e o item 3.1 “Não abrange todas as causas” que obtiveram a menor prioridade de todos os itens que foram comparados, ambos em torno de 6,5%, e obtiveram frequência não muito significativa, ambos em torno de 5 casos. Também se destaca o item 2.1 “Descrição genérica do efeito”, que apesar de ter apresentado baixa prioridade se comparado com todos os outros itens, cerca de 7,4%, foi o ponto com maior frequência entre todos, o que demonstra a falta de precisão das informações referentes a este item e que é um item normalmente tratado de modo genérico. Portanto é recomendado que os formulários PFMEA que apresentaram esta discrepância sejam revistos afim de saber se é necessário realizar alguma modificação ou não.

## 5 COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS

As empresas de manufatura atualmente vivem um grande dilema diante do desafiador cenário industrial global. Por um lado, elas precisam garantir a qualidade diferenciada de sus produtos para que continuem atuando expressivamente no mercado, mas por outro lado precisam manter seus preços competitivos, tendo em vista o grande número de fábricas que surgem todos os anos. Uma das atitudes que se torna tendência entre as firmas é a adoção do pensamento e da cultura preventiva e preditiva.

Empresas veem a ideia de não produzir falhas não mais como uma maneira de não perder dinheiro mas sim uma possibilidade de gerar lucros de um ponto de vista que antes não era abordado, e esta mudança de cultura se faz necessária se é de interesse da empresa atingir o *benchmark*.

O trabalho presente mostrou a importância da ferramenta PFMEA em prevenir falhas e que, se a ideia geral da ferramenta for utilizada em outras atividades, é possível extrair ganhos significativos dela. Foi possível identificar todas as etapas necessárias para o desenvolvimento do formulário bem como as dificuldades encontradas durante este processo.

Foi utilizada a metodologia de auxílio na tomada de decisões AHP para estudar e localizar os pontos fracos do processo de construção da ferramenta PFMEA desenvolvida para um processo de montagem de motores. O resultado mostrou que um dos pontos mais críticos está diretamente relacionada com o cliente final, onde o item 2.2 “Efeito não considera o cliente” obteve prioridade de quase 60% e isto explicita a importância da preocupação para com o consumidor. Também foi observado que deve-se ter cuidado na qualidade da informação colocada no formulário, tendo em vista que o erro mais frequente, com 13 ocorrências, foi o item 2.1 “Descrição genérica do efeito”.

Por fim, o trabalho cumpriu com todos os objetivos propostos pelo autor no item 1.2 sendo eles: detalhar o processo de construção da ferramenta PFMEA; decompor este processo em etapas; identificar as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste formulário; analisar criticamente os PFMEAs escolhido afim de apontar erros cometidos durante sua construção; e finalmente estabelecer quais forma os itens mais críticos encontrados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASQC/AIAG TASK FORCE. **Potential Failure Mode and Effect Analysis (FMEA): Reference Manual**. 4. ed. Automotive Industry Action Group, 2008.

CHARLTON, CHARLES. (2009). FMEA (General Motors - Global), Disponível em: [https://gmweb.gm.com/manufacturing/mfg\\_osc/Quality/FailureModesandEffectsAnalysis\(FMEA\).ppt](https://gmweb.gm.com/manufacturing/mfg_osc/Quality/FailureModesandEffectsAnalysis(FMEA).ppt)

CHEN LIXIA, MENG BO. **How to Apply Error Proofing to Realize Full Process Quality Control of Products in Chinese Enterprises Successfully**. *Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII), 2010 International Conference on*, vol.4, no., pp.75,78, 26-28 Nov. 2010  
doi: 10.1109/ICIII.2010.496. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/>>. Acesso em: 13 out. 2014.

CUSATO, RENATA N.(2011). Error Proofing For Engineers. Disponível em: <https://gmweb.gm.com/quality/home/LAAMHome/Documents/SocratesBrasil-Qualidade/ErrorProofingforEngineers-english.pdf>

DAS, Keshab (Ed.). **Globalization and Standards: Issues and Challenges in India Business**. Ahmedabad: Springer, 2014. 300 p.

DYADEM PRESS (Ontario) (Ed.). **Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), for Automotive, Aerospace, and General Manufacturing Industries**. Richmond Hill: Crc Press, 2003. 149 p.

EISENHARDT, Kathleen M. Building Theories From Case Study Research. **Academy Of Management: The Academy of Management Review**, Stanford, v. 14, n. 4, p.532-550, out. 1989.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4a Edição. Editora Atlas S.A. São Paulo, 2002.

GM - GMS OPERATING TOOLS. **PFMEA & Risk Reduction**. São José dos Campos: General Motors Corporation (gm), 2000. 82 slides, color.

GODOY, FRANCISCO SANJUANICO. (2010). PFMEA (General Motors) ,  
Disponível em: <http://powertrain.gm.com/portal/manufacturing/engineering/pfmea>

HIRAYAMA, Roberto Eiji. **Otimização do Planejamento de Processos de Montagem Final da Indústria Automotiva**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Cap. 7.

HU, JASON.(2007). Process Control Plan (PCP). Disponível em :  
[https://gmweb.gm.com/communications/kor\\_dae\\_en/ArchiveDocuments/cnmedia748.ppt](https://gmweb.gm.com/communications/kor_dae_en/ArchiveDocuments/cnmedia748.ppt)

ISO. **ISO 9000 - Quality management**. 2008. Disponível em: <<http://www.iso.org>>.  
Acesso em: 20 set. 2014.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**: Vol. 1. Englewoods Cliffs: Prentice Hall, 1991. 679 p.

LARRUBIA, C B. "**Método AHP como instrumento de apoio a decisão para a manutenção da qualidade da água do Reservatório de Ilha Solteira**". 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia - Unesp, Ilha Solteira, 2010.

MARTIN, LAURA A. (2007). Quality Control Operation System, Disponível em:  
<https://gmweb.gm.com/quality/oq/gmna/Documents/QCOS/QCOS Overview June 2010.ppt>

NIKKAN KOGYO SHIMBUN (Tokyo). **Poka-Yoke**: Improving Product Quality by Preventing Defects. Tokyo: Factory Magazine, 1988. 282 p. Tradução de: Productivity Press.

OMDAHL, Tracy P. **Reliability, Availability and Maintainability**

**Dictionary:** Product Assurance Dictionary Series. Milwaukee: American Society For Quality Control (ASQC Press), 1988. 361 p.

PALADY, P.. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos:** prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. 3. ed. São Paulo: Imam, 2004. 270 p.

REITER-NEUMARK, LINDA M.(2007). Built in Quality Elements. Disponível em: <https://share.gm.com/sites/gmu/GMU/Curriculum/Manufacturing/ErrorProofing/errorproofing.ppt>

SAATY, T L. **Decision Making for Leaders:** The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World, New Edition 2001. 3. ed. Pittsburgh: Rws Publ. (new Ed.), 2001. 315 p. (Analytic Hierarchy Process Series).

SAATY, T L; VARGAS, L G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process.** Nova York: Springer Science & Business Media, 2012. 345 p.

SAE. **Advanced Product Quality Planning (APQP) / Production Part Approval Process (PPAP).** 2014. Disponível em: <<http://standards.sae.org>>. Acesso em: 20 set. 2014.

SALOMON, V. A. P.; MARINS, F.a.s; A DUDUCH, M.. Tomada de decisões múltiplas aplicada à seleção de fornecedores de equipamentos de uma linha de montagem em uma fábrica de autopeças. **Pesquisa Operacional Para O Desenvolvimento**, Guaratinguetá, v. 1, n. 2, p.208-217, ago. 2009.

SALOMON, V. A. P. **Desempenho da Modelagem do Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios na Análise do Planejamento e Controle da Produção.** 2004. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de Dissertação.**

Universidade Federal de Santa Catarina. 4. ed., Florianópolis, SC, 2004.

STAMATIS, D. H.. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution.** 2. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003. 455 p.

TAKEDA, I K. **Auxílio na tomada de decisão na compra de uma máquina de usinagem a laser.** 2010. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Mecânica, Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

VOSS, C., TSIKRIKTSIS, N. FROHLICH, M. **Case research in operations management.** International Journal of Operations & Production Management, v. 22, no. 2, p. 195 - 219, 2002.

WOOD, MICHAEL L. (2001). Error Proofing. Disponível em:

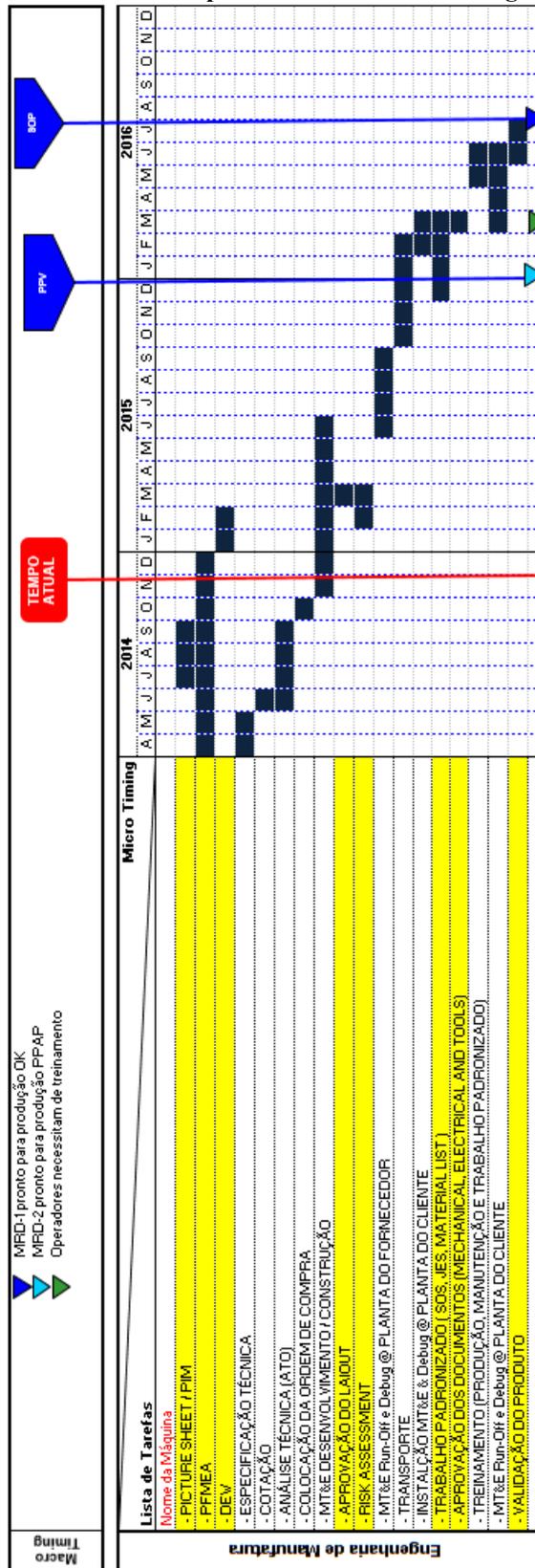
<https://mysite.gm.com/personal/lz06z0/SharedDocuments/25Aug11/ArchitectOverview.pptx>

ANEXOS

ANEXO A

Figura 12 – Representação do Gráfico de Gantt para a nova linha de montagem de motores.

Level IV - Engenharia de Manufatura  
 Nova linha de Montagem de Motores  
 Linha : Linha de Motores



## ANEXO B

### Formulários de PFMEA estudados para o Estudo de Caso.

Figura 13 – Formulário PFMEA da operação 2010 (Carregar Bloco no Pedestal) com as respectivas discrepâncias indicadas.

Operação	N. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN	
2010	1.1	transportar o Block do motor no pedestal	Danificar superfície da junta.	Interrupção da produção na estação	3		Material mal manuseado	3		100% de inspeção visual na estação.	7	4	147	
			Orientação incorreta.	Vazamento	7		Material mal manuseado	3	3.1	Verificação automática no processo - 100% pós processo no teste de usinamento.	4	3	84	
	1.2	Escanear matriz 2D no Bloco (Lado da exaustão)	Off location / Fuera de localización	Interrupção da produção na estação	3		Lift Assist danificado	3		100% de inspeção visual na estação.	7	4	147	
			Ilegal	Danifica a ferramenta da próxima estação.	5		Trabalho padronizado não seguido.	3	4.1	Não é possível completar a operação seguinte.	1	4.4	9	
	1.2	Escanear matriz 2D no Bloco (Lado da exaustão)	Não escaneado.	Interrupção da produção na estação	3		Trabalho padronizado não seguido.	3	3.2	Sensor automático de presença	4	4	60	
			Processo alternativo - Digitar manualmente a informação 2D no equipamento.	Sem Rastreabilidade	3		Mal funcionamento do equipamento.	3		Não pode passar, scanner travado com processo.	3	4	27	
	1.3	Escanear matriz 2D no Bloco (Lado da exaustão)		Interrupção da produção na estação	3		Trabalho padronizado não seguido.	3			Não pode passar, scanner travado com processo.	3	4	27
				Interrupção da produção na estação	3		Trabalho padronizado não seguido.	3			100% de inspeção visual na estação.	7	3	63

Figura 14 - Formulário PFMEA da operação 2020 (Instalar (4) injetores de óleo) com as respectivas discrepâncias indicadas.

Operação	N.º da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc.	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN
2020	A4-01-005	2.1	Falha do motor. Pressão do óleo baixa.	8	7		Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Verificação automática no processo - 100% pós processo no Teste a Frio. Inspeção Visual - 100% na estação.	4	3	96
		2.3	Durabilidade ou garantia	7		Trabalho padronizado não foi seguido.	Inspeção Visual - 100% na estação.	5	4.2	Verificação automática no processo - 100% na estação, aperteira interligada com o processo.	3	3	105
		2.5	Etiquetas danificadas	3	3	Produção interrompida na estação	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4.3	Escanear etiqueta na estação.	4	3	4.4
		2.7	Faltante - Caído no processo	3	3	Produção interrompida na estação	Mal funcionamento do equipamento.	3	3	Não pode passar, scanner interligado com o processo.	3	3	27
		2.9	Etiquetas erradas	3	3	Produção interrompida na estação	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	3	Não pode passar, scanner interligado com o processo.	3	3	27
				3	3	Produção interrompida na estação	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	3	Nenhuma	10	--	90

Figura 15 - Formulário PFMEA da operação 2030 (Separar a base do bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas.

Operação	N. da estação	Função da Processo	Potencial Modo da Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc.	Atual Controle de Prevenção da Processo	Atual Control. de Detecção da Processo	Det	BIO Level	RPN							
2030	A4-01-006	1.2 Separa o suporte do bloco do motor.	Não retirado	Produção interrompida na estação. <b>Falha do motor.</b>	3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Não pode completar a operação seguinte.	1	4.4	36							
														2.1	Material mal manuseado pelo operador.	3	Verificação automática no processo 100% pós processo; teste de torque.	4	3	36
														2.1						
	2.3	Suporte do bloco virado (?)	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	3	36												
	1.4								Produção interrompida na estação. Produção interrompida na estação.	3	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	3	4	27					
		Faltante	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	27													
									2.1	Falha do motor.	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	36					
	2.1	Falha do motor.	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	36													
	2.1							Falha do motor.	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	36							
	2.1	Falha do motor.	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	36													
	2.1							Material com impureza.	8	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4	36							
	2.1	Casquilho de pressão no lugar do padrão.	3	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	1	5							9						
2.1	Casquilho padrão no lugar do de pressão.							6	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	7	4	168							
2.1		Casquilhos superior e inferior misturados.	3	Trabalho padronizado não foi seguido.	3	7	4							168						

Figura 16 - Formulário PFMEA da operação 2040 (Limpar excesso de cola do bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas.

Operação	N. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc.	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN
2040	A4-01-010	Limpar o excesso de cola da junta do suporte do bloco.	Não realizado	Vazamento na junta ou na face da tampa frontal.	8		Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Inspeção visual - 100% na estação.	7	4	168
			<b>Cola não removida completamente.</b>	.....	8		Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4.2	Inspeção visual - 100% na estação.	7	4	168
	1.5	Carregar o vibrador na máquina de lubrificação.	Faltante	Produção interrompida na estação.	3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4.2	Inspeção visual - 100% na estação.	3	4	27
			<b>Modelo incorreto.</b>	Produção interrompida na estação.	3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3	4.2	Inspeção visual - 100% na estação.	3	4	27



Figura 18 - Formulário PFMEA da operação 2060 (Instalar base no bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas.

Operação	N. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc.	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN		
2060	A4-01-014	1.1 Instalar suporte no bloco.	Não colocado.	Produção interrompida na estação.	3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Inspecção visual - 100% na estação.	7	4	63		
			1.6 Deslocado.	Produção interrompida na estação.	3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3			Inspecção visual - 100% na estação.	7	4	84	
		Produto pode ser descartado ou reparado. Grande interrupção na linha de montagem.		3											
		1.6 Vazamentos	2.1	Casquilho inferior derrubado durante a instalação.	Produção interrompida na estação.	7		Material mal manuseado.	3			Verificação automática no processo - 100% pós processo no teste de vazamento.	4	3	96
					Falha do moto	8									
		1.6 Não retirado	1.6	Remover (2) pinos guias do suporte do bloco.	Produção interrompida na estação.	3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3			Não pode completar operação seguinte.	1	4.4 3	9

Figura 19 - Formulário PFMEA da operação 2070 (Instalar base no bloco) com as respectivas discrepâncias indicadas.

Operação	N. da estação	Função do Processo	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Sev	Classe	Potencial Causa / Mecanismo da Falha	Oc.	Atual Controle de Prevenção do Processo	Atual Controle de Detecção do Processo	Det	BIQ Level	RPN		
2070	A4-01-016	Instalar (1 e 4*) conjunto de pistão e biela.	Orientação incorreta, pistão invertido.	Baixa compressão - Rachado em funcionamento. Emissões Produção interrompida na estação.	8 9 3		Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	6	2	162		
			Danificado no processo pelo anel de compressão.	Baixa compressão - Rachado em funcionamento. Garantia	8 8		Câmara de prensagem do pistão danificada. Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro. Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	6 6	2	144 144		
			Danificado no processo pelo anel de óleo ou pelo pistão.	Baixa compressão - Rachado em funcionamento. Garantia <b>Falha do motor.</b> ← 2.1	8 8		Trabalho padronizado não foi seguido. <b>Partes caídas.</b>	3		Inspeção visual - 100%; na estação.	Inspeção visual - 100%; na estação.	7 7	4	168 168	
			Danificado no processo pelo furo do cilindro.	Produção interrompida na estação. <b>Falha do motor.</b> ← 2.1	3		Câmara de prensagem do pistão danificada. <b>Anel para fora.</b>	3		Inspeção visual - 100%; na estação. Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	Inspeção visual - 100%; na estação. Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	7 6	4	144 144	
			Danificado no processo pelo pino da biela.	<b>Falha do motor</b> ← 2.1	8		Prensador do pistão fora de ajuste. Trabalho padronizado não foi seguido.	3		Inspeção visual - 100%; na estação. Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	Inspeção visual - 100%; na estação. Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	7 6	4	144 144	
												Verificação automática no processo - 100%; pós processo, teste a frio. Bancada de testes, pós processo - menos de 100%; de confiabilidade no teste de giro.	4 6	2	96