

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Design for Six Sigma (DFSS) aplicado no projeto de pedal de acelerador

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

José Ricardo Elbel Simão

Orientador: Marcelo A. L. Alves

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2005**

VISTO



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Design for Six Sigma (DFSS) aplicado no projeto de pedal de acelerador

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

José Ricardo Elbel Simão

Orientador: Marcelo A. L. Alves

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2005**

TE05
Se42e

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011167

FICHA CATALOGRÁFICA

Simão, José Ricardo Elbel

Estudo da metodologia Design for Six Sigma (DFSS) e sua aplicação no projeto de pedal de acelerador / J.R.E. Simão. -- São Paulo, 2005.

p. 111

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.DFSS 2.Pedal de acelerador (Projeto) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA.....	8
2	DFSS X SEIS SIGMA.....	10
2.1	DFSS: MITOS E VERDADES.....	11
3	ABORDAGENS DE PROJETO.....	12
4	O PAPEL DO DFSS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	13
5	O DFSS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	15
5.1	OTIMIZAÇÃO DA VIDA TÉRMICA DO SISTEMA DE ESCAPE.....	15
5.2	TERCEIRA LINHA DE ASSENTOS FORD FREESTAR.....	15
5.3	SISTEMA DE ENCHIMENTO DE COMBUSTÍVEL.....	15
6	AVALIAÇÃO FINANCEIRA.....	16
7	ENGENHARIA ROBUSTA.....	18
8	AS DIVERSAS METODOLOGIAS DO DFSS.....	21
9	A METODOLOGIA IDDOV.....	22
10	FERRAMENTAS SUGERIDAS PARA CADA FASE.....	23
10.1	FASE 1: IDENTIFICAR.....	23
10.2	FASE 2: DEFINIR.....	23
10.3	FASE 3: DESENVOLVER.....	24
10.4	FASE 4: OTIMIZAR.....	24
10.5	FASE 5: VERIFICAR.....	25
10.6	INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS IDDOV.....	26
11	CONDUZINDO UM DFSS – O CAMINHO DAS PEDRAS: APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE FASE E PORTAL PARA GESTÃO DO PROJETO.....	27
12	ESTRUTURA DAS PESSOAS NO DFSS.....	29
13	IDDOV FASE 1: IDENTIFICAR.....	32
13.1	PROJECT CHARTER.....	32
14	IDDOV FASE 2: DEFINIR.....	34
14.1	VOC – A VOZ DO CONSUMIDOR.....	34
14.2	QFD - DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE.....	35
14.2.1	Construção da primeira matriz do QFD.....	37
14.3	MODELO DE KANO.....	41
14.4	GERENCIAMENTO DE PARÂMETROS CRÍTICOS (CPM-CRITICAL PARAMETER MANAGEMENT) OU CTQ.....	43

15	IDDOV FASE 3: DESENVOLVER.....	44
15.1	TRIZ.....	44
15.1.1	Introdução	44
15.1.2	Aplicação do processo passo-a-passo.....	47
15.2	DIAGRAMA DE PUGH.....	56
15.3	FMEA.....	57
15.3.1	Relação entre FMEA e QFD em um Projeto	57
15.3.2	Terminologia do FMEA.....	58
15.3.3	FMEA: Características Gerais	59
15.3.4	Etapas de desenvolvimento de um FMEA	59
15.3.5	O FMEA de Projeto	61
15.4	MODELO MATEMÁTICO / FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA.....	69
15.4.1	A função de transferência.....	70
15.4.2	Funções de transferência no DFSS	70
15.4.3	DFX (Design for X).....	71
15.4.4	Propagação de variância	72
16	IDDOV FASE 4: OTIMIZAR.....	74
16.1	PROJETO DE PARÂMETROS	74
16.2	PROJETO DE TOLERÂNCIAS: FUNÇÃO PERDA DE TAGUCHI	74
17	IDDOV FASE 5: VERIFICAR.....	77
17.1	CEP	77
17.1.1	Padrões em CEP	78
17.1.2	CEP em Sistemas de Manufatura Automatizados.....	81
18	ESTUDO DE CASO	83
18.1	IDDOV – FASE 1: IDENTIFICAR	84
18.2	PROJECT PLAN	86
18.3	IDDOV - FASE 2: DEFINIR.....	87
18.3.1	VOC	87
18.3.2	CTQs no projeto do pedal de acelerador.....	88
18.4	IDDOV – FASE 3: DESENVOLVER.....	91
18.4.1	FMEA de Projeto para Pedal de Acelerador.....	91
18.4.2	Diagrama de Interação	95
18.4.3	Função de Transferência.....	96
18.4.4	Avaliação dos parâmetros críticos à qualidade (CTQ) pelos clientes.....	97
18.4.5	Comparação do parâmetro Histerese com a concorrência.....	100
18.5	IDDOV – FASE 4: OTIMIZAR.....	104
18.5.1	Projeto de Parâmetros e Tolerâncias.....	104
18.6	IDDOV – FASE 5: VERIFICAR.....	105
18.7	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	106
19	CONCLUSÕES FINAIS.....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição Normal-fonte: http://www.ital-itsm-world.com/sigma.gif	8
Figura 2.1 - DFSS vs Seis Sigma.....	10
Figura 4.1-DFSS auxiliando processo DP - adaptada de Soderborg 2005	14
Figura 7.1-Sistema de Engenharia segundo Taguchi-adaptada de timdavis.co.uk	19
Figura 7.2-Saída do sistema de engenharia.....	19
Figura 9.1 - Fluxo do DFSS - fonte: ASI Consulting Group	22
Figura 10.1-Integração das ferramentas DFSS (elaborada pelo autor)	26
Figura 11.1 - Fases/Portais do projeto – elaborada pelo autor.....	28
Figura 12.1-Organograma do DFSS - adaptada de [BREYFOGLE III].....	29
Figura 14.1 - Fluxo de Informações - elaborada pelo autor.....	34
Figura 14.2 - Matrizes do QFD – adaptada [OUCHI02]	35
Figura 14.3-Fluxo de informação entre as matrizes do QFD- Pugh (1991)	36
Figura 14.4 - Partes da primeira matriz QFD - Adaptada intranet GM	37
Figura 14.5-Exemplo de matriz de relação entre requisitos do cliente e produto.....	38
Figura 14.6-Avaliação de mercado	39
Figura 14.7-Divisão das características do produto para subsistemas.	40
Figura 14.8 - Modelo de Kano	41
Figura 15.1 - Curva da Banheira.....	44
Figura 15.2 - Fluxo de Informações do TRIZ -Elaborada pelo autor	47
Figura 15.3 - Qualidades a melhorar 1-20 vs. Resultados indesejados 14-26	50
Figura 15.4 - Qualidades a melhorar 1-20 vs. Resultados indesejados 27-39	51
Figura 15.5 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados indesejados 1-13	52
Figura 15.6 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados Indesejados 14-26.....	53
Figura 15.7 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados Indesejados 14-26.....	54
Figura 15.8 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados Indesejados 27-39.....	55
Figura 15.9 - Diagrama de Pugh - elaborado pelo Autor.....	56
Figura 15.10-FMEA vs. QFD - elaborada pelo autor	57
Figura 15.11 - Fluxo de ações FMEA - elaborada pelo autor	60
Figura 15.12 - Propagação de variâncias	73
Figura 16.1-Função Perda - elaborada pelo autor	75
Figura 17.1 - Exemplo de Carta de Controle	78
Figura 17.2 - Exemplos de padrões CEP	79
Figura 17.3 - Carta de controle separada em três zonas.	81
Figura 18.1 - Pedal de acelerador – adaptada do catálogo de peças Chevrolet	84
Figura 18.2 - Veículos de passeio vendidos entre janeiro a outubro de 2005	85
Figura 18.3 - Primeira matriz do QFD.....	89
Figura 18.4 - Diagrama de CTQs – adaptado intranet GM.....	90
Figura 18.5-Fragmento DFMEA Pedal de Acelerador-Fonte: HELLA AG.....	92
Figura 18.6-Fragmento FMEA Pedal de Acelerador-Fonte: HELLA AG	93
Figura 18.7-Fragmento DFMEA Pedal da Acelerador-Fonte: HELLA AG.....	94
Figura 18.8-Fragmento do FMEA Pedal do Acelerador-Fonte: HELLA AG.	95
Figura 18.9 - Diagrama de interação do pedal de acelerador	96
Figura 18.10-Gráfico ilustrativo Força vs. Deslocamento do pedal	104

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1-Diferenças entre DFSS e Seis Sigma – adaptada intranet GM.....	10
Tabela 2.2-Mitos e verdades sobre o DFSS – adaptada intranet GM.	11
Tabela 8.1 - Metodologias do DFSS – adaptada [SODERBORG05].....	21
Tabela 9.1 - Etapas da metodologia IDDOV	22
Tabela 15.1 - Níveis de Inventividade - adaptada de mazur.net/triz	46
Tabela 15.2 - Os 39 parâmetros de engenharia - adaptada de mazur.net/triz	48
Tabela 15.3 – Princípios inventivos-adaptada de mazur.net.....	48
Tabela 15.4 - Índice de severidade - Adaptado de FMEA Manual (DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force). ...	66
Tabela 15.5 - Índice de ocorrência - Adaptado de FMEA Manual (DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force). ...	67
Tabela 15.6 - Índice de detecção - Adaptado de FMEA Manual (DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force).	68
Tabela 17.1 - Regra para determinação de processo fora de controle estatístico.	81
Tabela 18.1-Project Plan.....	86
Tabela 18.2 - Resultados da Voz do Consumidor (VOC)	89
Tabela 18.3-Resultados do Estudo (adaptada GM)	104

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar e entender a metodologia de projetos Design for Six Sigma. Sobre este assunto, pouquíssima bibliografia nacional foi encontrada. Neste são feitas considerações sobre as diversas metodologias do DFSS mas dá-se maior foco à IDDOV. Algumas ferramentas das áreas de Qualidade e Estatísticas, as bases na qual o DFSS se apóia, são explicadas com maiores detalhes no decorrer do texto. Fez-se comentários sobre a adoção das metodologias propostas por empresas da Indústria Automotiva, relatando alguns exemplos e dificuldades destas companhias. Ao fim do trabalho apresenta-se um estudo de caso de um projeto da General Motors de um pedal de acelerador eletrônico.

ABSTRACT

The main objective of this report is to study and understand the project management methodology Design for Six Sigma. About this subject, very little material in Portuguese was found. Here are considered and explained some of the DFSS tools and best practices that came from quality control and statistics. Some comments and considerations about DFSS's implementation in the automotive industry were made, as well as some examples of successful projects. This report exposes and compares all the DFSS methodologies but focuses in one known as IDDOV. At the end, as a case study, a General Motors of an electronic accelerator pedal is presented.

INTRODUÇÃO

A velocidade em que ocorrem mudanças nos diferentes mercados tem diminuído muito o ciclo de vida dos produtos e fazendo com que a necessidade de desenvolver novos projetos aumente rapidamente. Para acompanhar essa evolução, é necessário excelência no desenvolvimento de projetos, o que permite que as empresas economizem tempo e recursos.

Uma ferramenta utilizada largamente na indústria para controle de processos é o Seis Sigma, uma metodologia baseada na estatística para resolver problemas de produção ou serviços. Este, porém, não apresenta uma abordagem imediata para projetos.

O DFSS (Design for Six Sigma) é a aplicação do Seis Sigma para o desenvolvimento de produtos e processos. Consiste em uma série de ferramentas de engenharia e de estatística que serão utilizadas durante o desenvolvimento de um produto para prevenir o surgimento de defeitos. A engenharia garante a parte de tecnologia e de funcionalidade do produto, enquanto que o DFSS garante que seus aspectos funcionais atendam às necessidades do cliente e que a tecnologia escolhida irá suprir suas necessidades funcionais de maneira robusta.

O DFSS não é utilizado na manufatura, mas na fase de projetos de produtos e processos. Tem como objetivo prevenir problemas ou tentar solucioná-los no tempo certo do desenvolvimento do produto, acarretando em menores custos.

Da perspectiva de gerenciamento de projetos, o DFSS cria bases para o processo de criação, desenvolvimento, otimização e transferência de tecnologia para os programas de design de produto, assim como permite a verificação dos novos produtos antes de serem lançados em seus respectivos mercados.

1 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA

Seis Sigma representa seis desvios padrão (o sigma é a letra grega usada para representar o desvio padrão em estatística) de distância entre os limites de especificação e o valor nominal da especificação – a média, conforme ilustra a Figura 1.1.

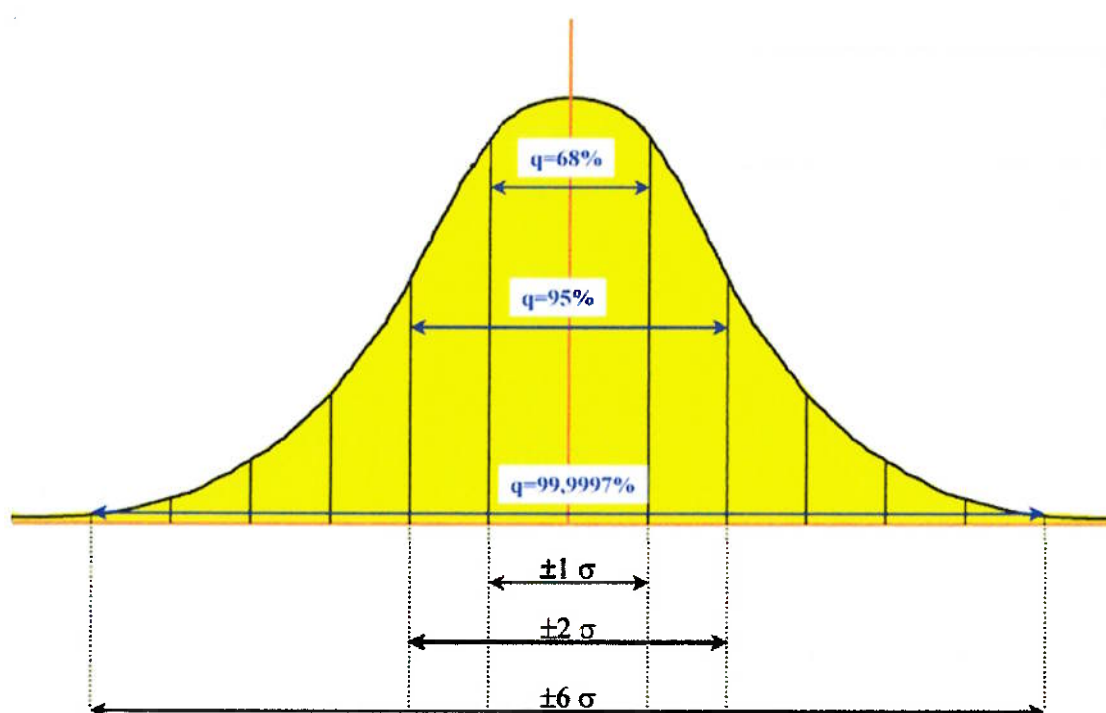


Figura 1.1 - Distribuição Normal-fonte: <http://www.itil-itsm-world.com/sigma.gif>

O Seis Sigma busca a perfeição: permite somente 3.4 defeitos por milhão de produtos ou serviços produzidos. Para atingir este nível, deve-se considerar que de 70 a 80% dos problemas de qualidade estão relacionados diretamente com problemas de projeto [CHOWDHURY02]. A partir destes dados, conclui-se que não adianta buscarmos apenas melhorias de processo, mas atuar na qualidade Seis Sigma logo na fase de projeto, para isto emprega-se o Design for Six Sigma (DFSS).

O método tradicional de projeto é a tentativa e erro [MOURA02], uma metodologia que produz altos índices de defeitos, necessita de muito trabalho para melhorar o processo e acaba não atingindo as expectativas do cliente.

O DFSS é uma abordagem mais sistemática de projeto, que visa atingir níveis de qualidade Seis Sigma desde a concepção do produto. Os resultados de sua aplicação são o aumento da satisfação do cliente e, como consequência, sua retenção, diminuição do tempo e do custo de projeto e drástica queda nos gastos com assistência técnica e garantia [OUCHI02].

2 DFSS x SEIS SIGMA

A principal diferença entre o DFSS e o Seis Sigma é o fato de o primeiro ser uma metodologia pró-ativa, enquanto o segundo é reativo. A abordagem pró-ativa permite que o projeto que empregou DFSS apresente custos menores durante a fabricação do produto quando comparado com a abordagem do Seis Sigma, conforme mostra a .

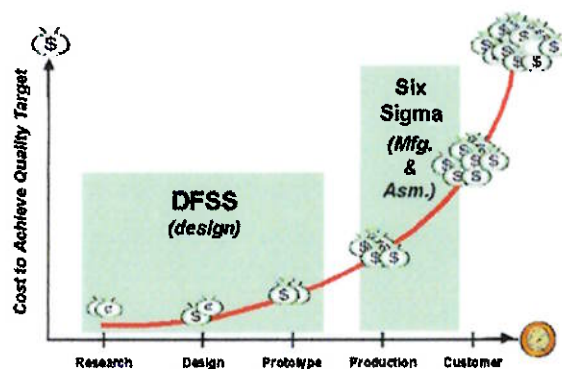


Figura 2.1 - DFSS vs Seis Sigma

Outras diferenças entre as duas metodologias são explicitadas na Tabela 2.1 abaixo.

Tabela 2.1-Diferenças entre DFSS e Seis Sigma – adaptada intranet GM

	DFSS	Seis Sigma
TEMPO	Tempo de ação: antes da produção	Tempo de ação: após a produção
DEFEITOS	Defeitos difíceis de serem percebidos, mas fáceis de serem prevenidos.	Defeitos fáceis de serem percebidos, porém caros para serem corrigidos.
CUSTO	Baixo custo para melhorar o produto	Alto custo para melhorar o produto
FOCO	Foco nas necessidades dos clientes	Foco nas necessidades do negócio
EM QUE SE BASEIA	Traduzir necessidades do cliente em parâmetros de projeto	Reagir às diferenças entre o medido e o esperado na produção

2.1 DFSS: mitos e verdades

Existem algumas diferenças entre o que se diz sobre a filosofia do DFSS (mitos) e o que é realmente o Design for Six Sigma. A Tabela 2.2 abaixo esclarece alguns destes pontos.

Tabela 2.2-Mitos e verdades sobre o DFSS – adaptada intranet GM.

Mito	DFSS
DFSS é uma alternativa para abordagem atual de projeto	DFSS é a abordagem para o projeto. É um guia rigoroso para se atingir qualidade no produto desde a fase de projeto.
DFSS é um amontoado de ferramentas	DFSS é um processo que utiliza muitas ferramentas
DFSS requer controle estatístico de todos os parametros de projeto	Alguns destes parametros são classificados como criticos à qualidade (COM) e estes devem ser analisados estatisticamente.
DFSS é um programa de qualidade coordenado pelo departamento de qualidade da empresa	DFSS deve ser controlado pela engenharia.

3 ABORDAGENS DE PROJETO

Existem duas abordagens diferentes para um projeto: a abordagem determinística, empregada pelo Seis Sigma, e a abordagem empregada na metodologia do DFSS. A primeira não tenta abordar o impacto de variações no projeto e busca uma tradução qualitativa da voz do cliente. A segunda, mais atual, visa uma tradução quantitativa das necessidades do consumidor, sendo assim capaz de prever o impacto de variações do projeto ou do meio na satisfação dos clientes.

Para ilustrar estas diferentes abordagens de projeto, imaginemos a concepção de uma nova cafeteira. Do ponto de vista determinístico, se uma cafeteira de determinado design produz um café gostoso uma vez, assume-se que todas as xícaras de café produzidas por cafeteiras com o mesmo design serão tão boas quanto a primeira.

Por outro lado, para ilustrar a abordagem do DFSS, no projeto da cafeteira deve-se levar em conta as variações no meio, no grão de café e na operação da máquina pelo cliente. Esta abordagem permite que saibamos quantos clientes estarão satisfeitos com o desempenho da cafeteira, o que possibilita mudanças na engenharia do produto para que estes continuem satisfeitos com o produto apesar de diversas influências externas.

4 O PAPEL DO DFSS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

O primeiro desafio organizacional para a aplicação da metodologia DFSS é definir claramente seu papel nos projetos. O DFSS pode ser empregado de forma a revisar todo o procedimento de desenvolvimento de novos produtos mas também pode ser empregado apenas em alguns dos projetos escolhidos taticamente pela empresa.

Para uma empresa nova no setor automotivo que deseja ser fornecedora de uma grande montadora, DFSS pode ser utilizado para estabelecer uma sistemática para o processo de desenvolvimento de produtos (DP), por exemplo. Uma grande montadora, por outro lado, geralmente já tem um processo bastante maduro de DP, desenvolvido através das inúmeras experiências de projetos anteriores. A aplicação do Design for Six Sigma nestes processos de desenvolvimento de produtos pode ser contra produtivo para a empresa. Neste caso, o DFSS é provavelmente melhor utilizado se for integrado ao processo já existente.

Esta integração pode ser feita de duas maneiras:

- Ferramentas do DFSS são integradas ao conjunto de ferramentas já utilizadas no desenvolvimento de produtos.
- Projetos novos podem empregar a metodologia DFSS do começo ao fim.

De acordo com Soderborg (2005), quando a Ford Motor Company estudou a utilização do DFSS, percebeu que muitas das ferramentas deste já estavam sendo utilizadas no seu sistema de DP. O grande desafio para a empresa não foi identificar quais as ferramentas corretas a serem utilizadas, mas empregá-las de forma realmente eficiente. Muitos de seus produtos já atingiam altos níveis de qualidade e satisfação do consumidor. Para estes, o sistema de desenvolvimento de produtos (DP) empregado já estava fazendo seu trabalho. Havia, entretanto, alguns itens para os quais um melhor conhecimento de suas funções e relações com as expectativas dos clientes ajudaria a prevenir modos de falha crônicos. Nestes itens o DFSS tinha grandes chances de ser empregado com sucesso.

A alta administração da empresa decidiu então que o Design for Six Sigma seria empregado para auxiliar o processo de DP existente. Alguns projetos novos adotariam a metodologia por completo, em áreas que demandavam mais conhecimento da relação produto-cliente.

Quando o DFSS é empregado em conjunto com uma metodologia de projeto já existente, é importante estabelecer claramente o trabalho adicionado pelo primeiro à segunda. A Figura 4.1 mostra um processo de desenvolvimento de produto já existente da indústria automotiva e as contribuições do DFSS.

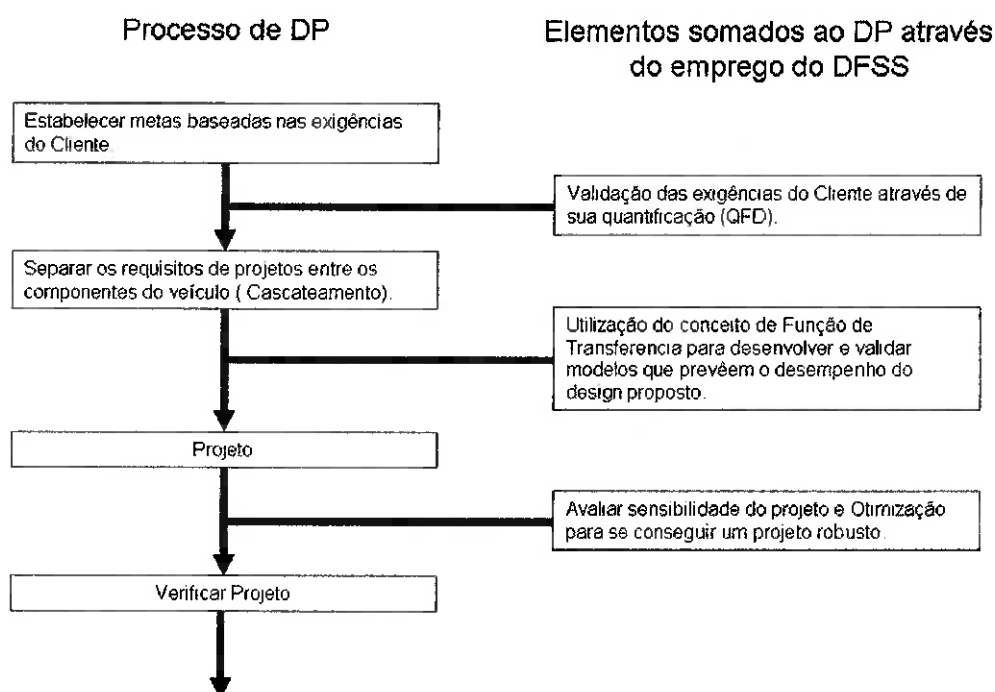


Figura 4.1-DFSS auxiliando processo DP - adaptada de Soderborg 2005

5 O DFSS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Alguns exemplos de projetos em que o Design for Six Sigma foi aplicado pela FORD e pela GM são mencionados abaixo.

5.1 Otimização da vida térmica do sistema de escape

Este projeto tinha como objetivo projetar um sistema de escape de ar do motor com materiais alternados para minimizar seu custo mantendo a desempenho de sistemas mais caros.

5.2 Terceira linha de assentos Ford Freestar

O objetivo deste projeto era facilitar a utilização da terceira linha de assentos deste veículo. Na época de seu lançamento, a imprensa classificou este assento como o melhor da categoria.

5.3 Sistema de enchimento de combustível

A meta deste trabalho era desenvolver um gargalo de tanque de combustível que permitisse reabastecimento rápido e fácil, assim como garantir que o tanque fosse completamente preenchido, melhorando a percepção das pessoas em relação ao consumo de combustível.

Como estes exemplos ilustram, o DFSS pode trazer muitos benefícios quando aplicado em um projeto, porém sua implementação e utilização de forma correta podem trazer alguns problemas para a empresa.

6 AVALIAÇÃO FINANCEIRA

O DFSS apresenta três objetivos principais, todos os quais resultam em melhoria no desempenho financeira da empresa. Em primeiro lugar, o DFSS permite que os produtos atendam às necessidades do mercado uma vez que a base do projeto é a voz do cliente.

Em segundo lugar, a utilização do Design for Six Sigma minimiza o possível tempo de retrabalho da peça, assim como torna o processo de projeto mais eficiente. Isto ocorre por que, uma vez o produto aprovado nas fases iniciais, muitas ferramentas do DFSS são usadas para quantificar e identificar as relações e as variáveis de controle do projeto. Este controle chama-se CPM (Critical Parameter Management) ou CTQ (Critical to Quality).

A terceira vantagem financeira de utilizar-se o DFSS esta ligada com a diminuição da produção perdida, porque o processo do DFSS é formulado de maneira a se saber quais são e como controlar os processos de produção do produto e seus riscos, tendo sempre como objetivo atender às necessidades do cliente.

Os três objetivos mencionados acima contribuem para otimização do custo do produto. Tendo em mente que o lucro das empresas é proporcional ao lucro por produto vendido, que por sua vez é o resultado do seu preço subtraído de seu custo, o DFSS acarreta num aumento da lucratividade da empresa. O lucro pode, portanto, ser representado pela eq.(1):

Erro! Não é possível criar objetos a partir de códigos de campo de edição.

(1)

De acordo com KIOUMARS (2003), a variável preço não é controlada pelas companhias e sim pelo mercado volátil. A variável custo é a única ferramenta que as empresas tem para aumentar seus lucros

Portanto, algumas das vantagens de se aplicar o DFSS em projetos são:

- Aumento do volume de venda: aumento da satisfação do cliente pelo atendimento pleno de suas necessidades e pela melhoria da qualidade levando à redução de níveis de insatisfação.
- Redução do custo: evitam-se desperdícios e retrabalhos, uma vez que o processo foi testado (CEP) e verificado para permitir pouquíssimos defeitos.
- Aumento de preço do produto: a melhoria na qualidade pode resultar em um aumento do valor percebido pelo cliente e fortalecimento da marca GM, o que em teoria permitiria aumento elevação de preço.

7 ENGENHARIA ROBUSTA

A chamada Engenharia Robusta foi desenvolvida de acordo com as idéias do Dr. Genichi Taguchi e é empregada com muito sucesso em muitas empresas líderes de mercado [CREVELING, SLUTSKY, ANTIS 03], inclusive na General Motors. O termo robusto faz referencia à capacidade do produto ou processo para absorver as variações advindas de condições de uso não controláveis sem remover as fontes destas. A motivação fundamental da engenharia robusta é melhorar a qualidade do produto ou processo satisfazendo requisitos de performance e minimizando variações de desempenho.

Terminologia

- **Função Ideal:** função primária para a qual o produto ou processo foi projetado.
- **Função de Sinal:** energia colocada no produto para fazê-lo funcionar.
- **Estado de Erro:** saída indesejada do sistema causada principalmente por muita variação sobre a Função Ideal.
- **Ruído:** todo tipo de influencia do meio que leve o sistema ao estado de erro.
- **Robustez:** pouca variação da saída do sistema em relação à função ideal, mesmo o sistema estando sujeito a ruído.

De acordo com as idéias de Taguchi, um sistema de engenharia pode ser representado pela Figura 7.1.

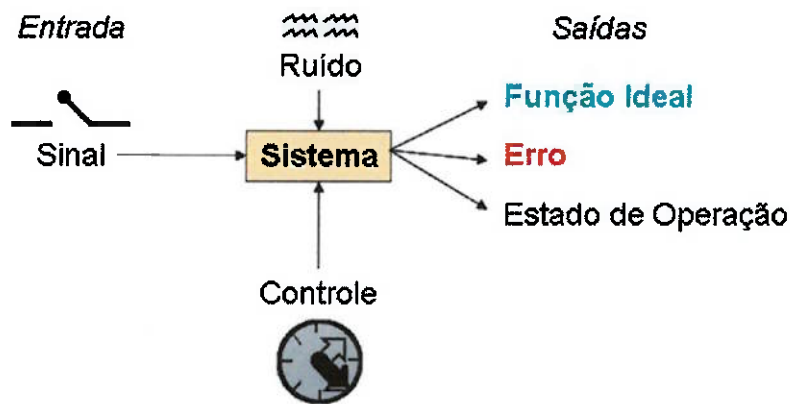


Figura 7.1-Sistema de Engenharia segundo Taguchi-adaptada de timdavis.co.uk

Idealmente, toda a energia ou sinal que entra no sistema seria transformado de modo a exercer a função ideal do produto ou processo, mas devido à influências externas, como o meio e o operador, a saída do sistema não é a função ideal mas um estado qualquer de operação. Gráficamente, a saída do sistema poderia ser representada pelo gráfico ilustrado na Figura 7.2.

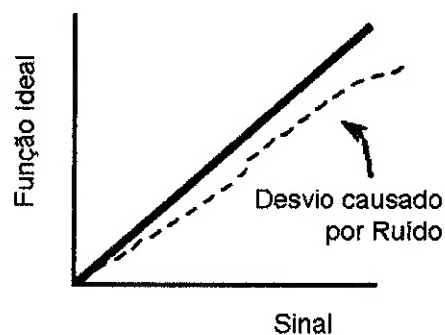


Figura 7.2-Saída do sistema de engenharia

De acordo com Davis (1997), os ruídos no sistema podem ser externos ou internos:

- Ruídos internos ao sistema (produto/processo):
 - variações de dimensões de subcomponentes devido ao processo de fabricação;

- mudança de dimensões de subcomponentes durante utilização (desgaste, temperatura, etc.)
- Ruídos externos ao sistema:
 - condições de uso;
 - meio de operação agressivo (ambiente muito úmido, etc)

Ainda segundo o mesmo autor, para se obter um design mais robusto, deve-se trabalhar variando os parâmetros de controle do sistema e através do uso de funções de transferencia e do projeto de tolerâncias (tratados mais adiante neste trabalho), para saber chegar em arranjo no qual a variação causada pelo ruído afete o mínimo a saída do sistema.

8 AS DIVERSAS METODOLOGIAS DO DFSS

Existem diferentes metodologias para o DFSS e para o Seis Sigma, como mostrado na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Metodologias do DFSS – adaptada [SODERBORG05]

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Comentários
Caminhos para DFSS	Invenção	Inovação	Desenvolver	Otimizar	Verificar	IDOV - Foco no desenvolvimento de novas tecnologias
	Conceituar		Desenvolver	Otimizar	Verificar	CDOV - Foco na comercialização do produto
	Identificar	Definir	Desenvolver	Otimizar	Verificar	IDDOV - Modelo que combina desenvolvimento de tecnologia e comercialização do produto.
	Definir		Caracterizar	Otimizar	Verificar	DCOV - modelo combina de desenvolvimento de tecnologia e comercialização do produto.
Seis Sigma	Definir	Medir	Analisar Desenvolver		Verificar	DMADV - semelhante ao DMAIC. O Medir foca em determinar as necessidades do cliente para projetar um produto que as satisfaça.
	Definir		Medir	Analisar Otimizar (Improve)	Controlar	DMAIC - o Medir em DMAIC é feito para se analisar a performance do produto para se determinar as causas de defeitos e custos.

Para o presente projeto será explicada a metodologia IDDOV, que é a metodologia utilizada pela General Motors. Esta apresenta como particularidade a ênfase dada à fase de otimização do produto/processo.

Ao final deste trabalho, o IDDOV será empregado para o estudo de um caso de projeto em que o DFSS foi empregado.

9 A METODOLOGIA IDDOV

O IDDOV é composto pelas etapas descritas brevemente na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 - Etapas da metodologia IDDOV

Erro! Não é possível criar objetos a partir de códigos de campo de edição.

A Figura 9.1 mostra o fluxo do projeto DFSS, passando por todas as fases mencionadas neste texto.

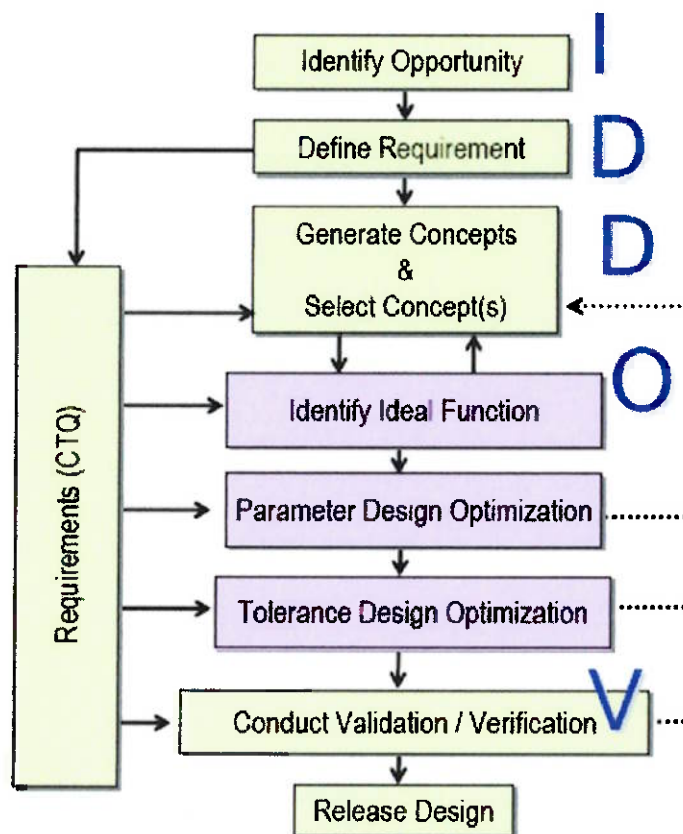


Figura 9.1 - Fluxo do DFSS - fonte: ASI Consulting Group

10 FERRAMENTAS SUGERIDAS PARA CADA FASE

Dentro de cada uma das fases apresentadas na Tabela 9.1, o DFSS oferece ferramentas e técnicas que auxiliam no projeto. Nesta seção é feita uma breve exposição de algumas das ferramentas das quais se dispõe para completar cada etapa. Todas estas serão estudadas mais profundamente nos capítulos posteriores deste trabalho.

10.1 Fase 1: Identificar

Para esta primeira fase, que define a direção do projeto, seus objetivos, limitações e viabilidade, são sugeridas as seguintes ferramentas e metodologias:

- Análise de Mercado: avaliação econômica do mercado para o futuro;
- Project Charter e Project Plan;
- Formar time de projeto;
- Benchmarking da concorrência.

10.2 Fase 2: Definir

Na fase 2, após ter-se definido a rumo do projeto, deve-se estabelecer seus parâmetros críticos para que este agrade o cliente e torne-se um design bem sucedido. Nesta etapa utilizam-se:

- Matriz QFD: traduz as necessidades do cliente em um produto pronto para o uso. Composta por quatro matrizes. Nesta etapa (medir), utiliza-se apenas a primeira matriz, que relaciona as necessidades do cliente com especificações de desempenho.
- Modelo de Kano;

- Benchmarking;
- Estudo das necessidades do cliente e estabelecimento das características CTQ (*critical to quality*).

10.3 Fase 3: Desenvolver

A fase desenvolver tem como meta criar um conceito que seja capaz de atender às necessidades definidas na fase anterior. Devem-se desenvolver alternativas para que o produto atinja o desempenho especificado. As principais ferramentas recomendadas são:

- DFM/DFA (Projeto para Montagem / Projeto para Manufatura);
- Função de Transferência;
- FMEA (Análise dos modos de Falha);
- Brainstorming;
- Método Pugh;
- TRIZ (Teoria da Solução Inventiva de Problemas).

Nesta etapa, deve-se dar atenção especial à função de transferência, que tem um papel fundamental no DFSS, pois permite aos projetistas saberem como o produto se comporta a cada alteração de parâmetros externos, permitindo que a engenharia robusta seja feita.

10.4 Fase 4: Otimizar

Nesta etapa tem-se como objetivo determinar o projeto detalhado do produto. Serão definidas todas as especificações materiais e dimensionais. O projeto resultante deverá também ser otimizado, o que será feito em duas etapas. A primeira etapa é o Projeto de Parâmetros, que os define para se obter um projeto de engenharia robusta, pouco afetado por variações externas. A segunda etapa é Projeto de Tolerâncias, que as define levando em conta o custo necessário para seu estreitamento. As ferramentas são:

- Projeto de Tolerâncias
- Projeto de Parâmetros

Ao fim desta etapa, estarão prontos desenhos, documentação e especificações do projeto.

10.5 Fase 5: Verificar

A etapa do verificar tem como objetivos avaliar se o produto projetado é capaz de atender às especificações propostas pelo QFD e avaliar se é possível produzir este produto no nível de qualidade Seis Sigma. Para atingir estes objetivos, utiliza-se:

- Testes em protótipos e simulações no computador.
- CEP (Controle estatístico de processo): ferramenta utilizada para realizar estudos preliminares e determinar-se a capacidade do processo em um lote piloto de produção.

A General Motors utiliza o sistema de PPAP para a aprovação final do produto, que pode ser descrito como o CEP aplicado a um lote piloto de produção. O controle estatístico de processo (CEP) será explicado mais adiante neste texto.

10.6 Integração das ferramentas IDDOV

Para esclarecer o relacionamento das ferramentas do IDDOV DFSS, construiu-se a Figura 10.1.

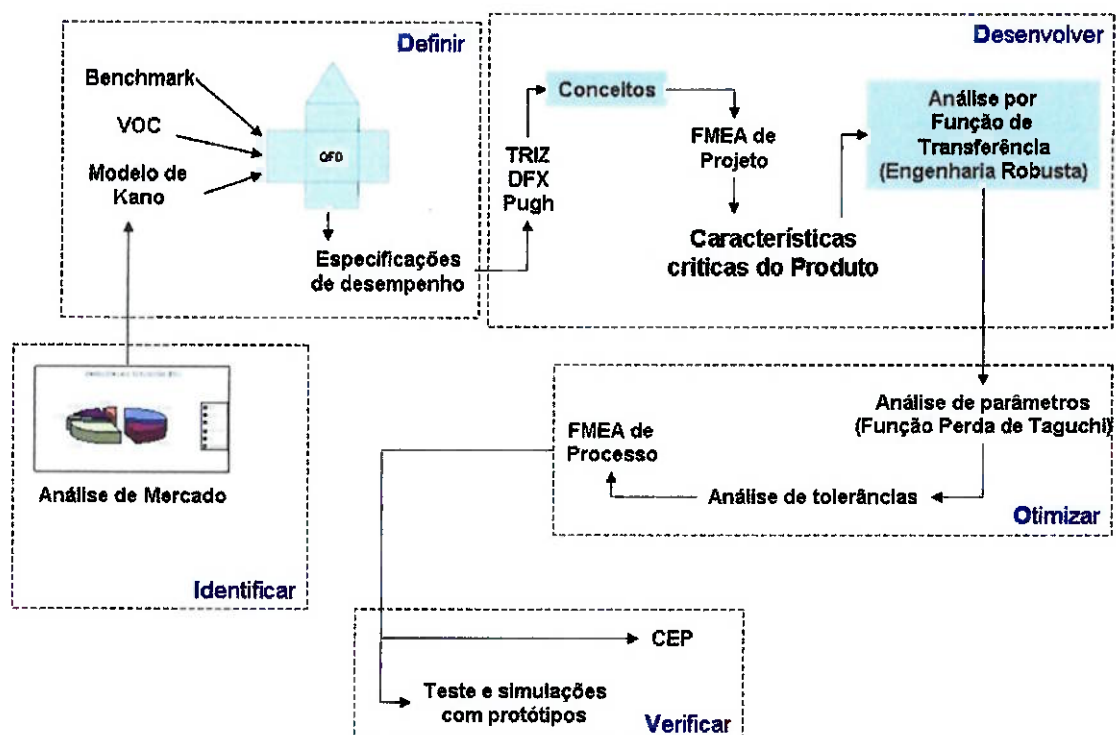


Figura 10.1-Integração das ferramentas DFSS (elaborada pelo autor)

11 CONDUZINDO UM DFSS – O CAMINHO DAS PEDRAS: APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE FASE E PORTAL PARA GESTÃO DO PROJETO

As diferentes etapas de projeto expostas na seção anterior formam uma sequência que deve ser respeitada e controlada. Para ser possível este controle, muitas empresas utilizam os conceitos de fase/portal (*phase/gate approach*) para conduzir projetos inteiros de forma organizada e controlada.

Fase ou etapa é um período de tempo em que são utilizadas ferramentas e metodologias de maneira organizada para se chegar a resultados tangíveis que atendam aos pré-requisitos determinados no projeto.

Portal é uma parada no decorrer do projeto, onde é feito um balanço do que foi e do que não foi feito em fases anteriores, além de servir como oportunidade para se rever o plano de negócios para a próxima fase. A cada portal, deve-se ter em mente que, enquanto alguns subsistemas do projeto terão atingido as metas propostas em suas fases, outros atingirão apenas parte de suas metas. O portal deve também ser usado para que se desenvolvam “planos B” para o projeto, ou seja, caminhos alternativos na gestão de projeto que tem como função permitir que este não seja parado toda vez que os pré-requisitos do portal não forem totalmente satisfeitos. É comum na engenharia a utilização de cores representativas em cada portal, denunciando o status de cada subsistema ao chegar no portal:

- **VERDE** é empregado para sinalizar que o subsistema atingiu as metas propostas;
- **AMARELO** é empregado para sinalizar que o subsistema atingiu parte das metas propostas, mas apresenta um número de pequenos problemas que devem ser corrigidos na próxima fase;
- **VERMELHO** é empregado para denunciar que o subsistema não atingiu as metas propostas na fase.

A passagem através do portal é garantida para o status verde e amarelo. O status vermelho não pode passar pelo portal e o tempo e recursos previstos no plano B do portal devem ser empregados para resolver os problemas do subsistema. A Figura 11.1 ilustra as fases de projeto empregando-se a metodologia IDDOV.

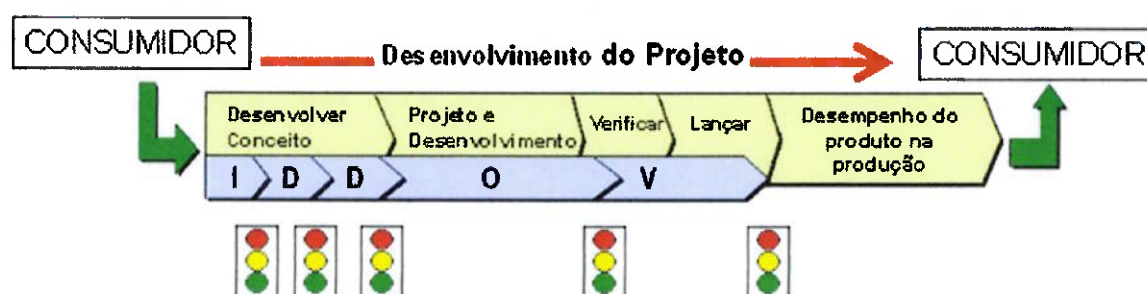


Figura 11.1 - Fases/Portais do projeto – elaborada pelo autor

12 ESTRUTURA DAS PESSOAS NO DFSS

O comprometimento das pessoas com o projeto é crucial para o bom andamento deste. É muito importante definir claramente os papéis de cada um no projeto, assim como as consequências por não atingirem as metas e as recompensas por atingi-las.

A estrutura como as pessoas estão organizadas no DFSS é a mesma do Seis Sigma. Um projeto DFSS típico apresenta o organograma da Figura 12.1.

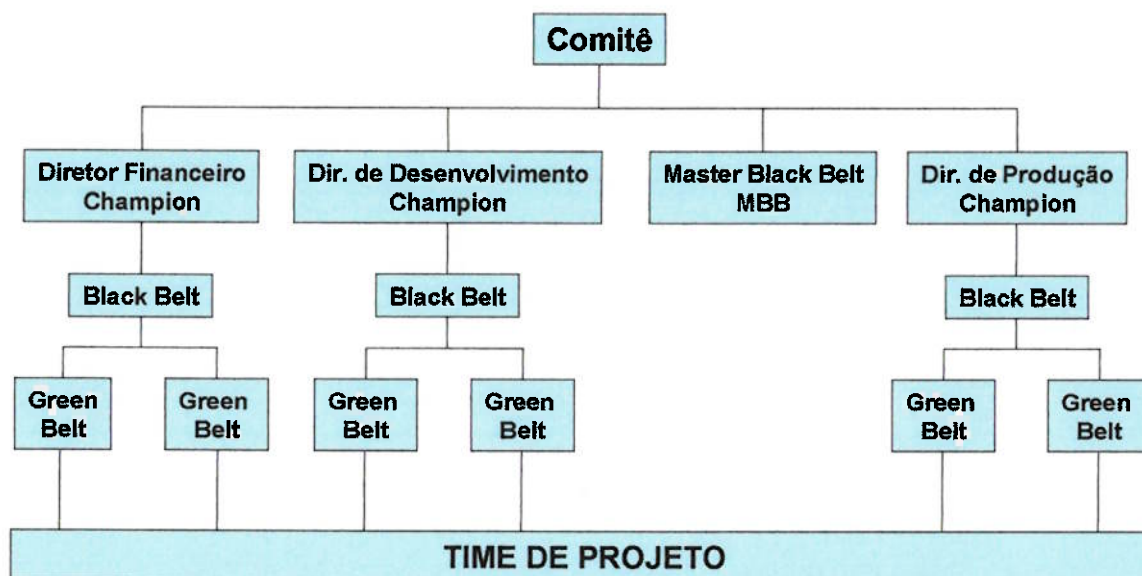


Figura 12.1-Organograma do DFSS - adaptada de [BREYFOGLE III]

O comitê é formado pelos Champions e pelo Master Black Belt. Seu objetivo é estabelecer as diretrizes de implementação e desenvolvimento do projeto.

Champion

É uma pessoa ligada à alta administração da empresa. Sua função é difundir o DFSS ou Seis Sigma e garantir o comprometimento dos funcionários com os projetos. Suas responsabilidades são:

- Difundir a cultura do DFSS e Seis Sigma;
- Prover o treinamento e recursos necessários para sua implementação;
- Auxiliar na escolha dos projetos.

Master Black Belt

Tem a função de consultor interno da empresa. Deve ter profundo conhecimento da metodologia e das ferramentas estatísticas utilizadas. Suas responsabilidades são:

- Treinar os Green e Black belts;
- Aprovar projetos depois de concluídos;
- Formular estratégias para seleção de projetos.

Black Belt

O Black Belt é o líder de grandes projetos. Deve trabalhar integralmente no projeto DFSS para acelerar o processo de melhorias da empresa. Suas principais responsabilidades são:

- Selecionar, ensinar e utilizar as ferramentas mais efetivas para o projeto;
- Desenvolver o Project Plan detalhado;
- Marcar e liderar reuniões do time de projetos;
- Entregar os resultados dos projetos para a alta administração;
- Calcular economia dos projetos para a empresa;
- Monitorar o trabalho do time, procurando por riscos no desenvolvimento do projeto;
- Completar de quatro a seis projetos por ano.

Green Belt

Tem funções semelhantes às do Black Belt, porém tem menos treinamento. Podem liderar projetos mais simples e não necessitam dedicar-se integralmente aos projetos como os Black Belts.

Time de Projetos

Composto por qualquer funcionário da empresa que participe do projeto. Fornecem suporte técnico para os Green e Black Belts.

13 IDDOV Fase 1: Identificar

Esta fase tem como objetivos identificar uma oportunidade de mercado e definir a direção do projeto através do desenvolvimento do chamado Project Charter e do estudo (benchmarking) da concorrência. Nesta etapa deve-se também formar o time de projeto.

13.1 Project Charter

O objetivo do Project Charter é reunir as informações necessárias para que a diretoria da empresa possa analisar a importância e relevância do projeto. Neste documento devem constar [ASI 05] :

- Datas de inicio e termino do projeto;
- Project Plan (Cronograma de Projeto);
- Título do projeto;
- Datas para cada portal entre as fases do IDDOV;
- Escopo do projeto;
- Resultados esperados após o término.

O escopo do projeto é fundamental para definir se o projeto irá tratar de componente, produto ou subcomponente. Os limites do escopo devem ser bem definidos.

O Project Charter deve trazer informações suficientes para que seja feita uma análise preliminar da viabilidade econômica. Pode trazer análise como do Valor Presente ou da Taxa Interna de Retorno, PV e TIR, respectivamente [OUCHI 02].

O método do Valor Presente, ou Present Value, consiste em trazer para data presente todos os custos e receitas previstas pelo projeto a uma taxa de mínima atratividade definida pela empresa. Quanto mais positivo o valor de PV, mais aconselhável é o investimento. O Valor Presente é uma análise que dá ênfase ao lucro.

Já o método TIR consiste em se calcular a taxa de juros que torna o PV dos investimentos, custos e receitas igual a zero. Se a TIR for maior que a taxa mínima de atratividade, a empresa é aconselhada a investir no projeto. O TIR dá maior ênfase à rentabilidade do projeto.

14 IDDOV Fase 2: Definir

14.1 VOC – A voz do consumidor

Como já mencionado anteriormente neste trabalho, toda a base do DFSS é satisfazer diretamente o cliente. Tendo isto em vista, o primeiro passo para definir as características de qualquer projeto DFSS é ouvir o consumidor.

Por que ouvir o consumidor? É mais econômico definir o produto correto na primeira tentativa e entregá-lo já com boa aceitação no mercado do que projetá-lo apenas com os parâmetros da Engenharia para depois retrabalhar e modificar todo o design para ganhar aceitação do cliente.

Para obter os dados desta fase deve-se identificar e fazer pesquisas com um grupo de prováveis consumidores.

Os dados que resultantes desta etapa devem ser categorizados e agrupados de forma e servirem como entrada do QFD. Este, por sua vez, transforma estas necessidades dos clientes em potencial em parâmetros quantificados que servirão como base do produto de engenharia. Para ilustrar este fluxo de informações criou-se a Figura 14.1.

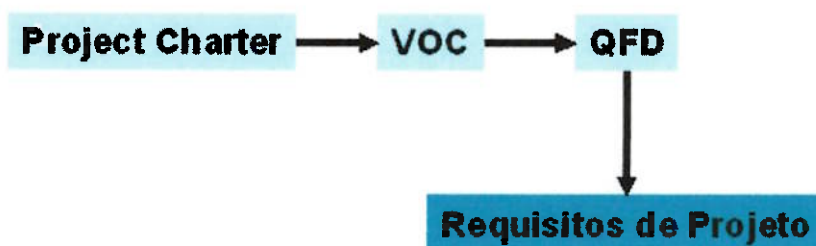


Figura 14.1 - Fluxo de Informações - elaborada pelo autor

14.2 QFD - Desdobramento da função qualidade

QFD (*Quality Function Deployment*) é uma ferramenta poderosa que traduz as necessidades do cliente em requisitos tecnológicos do projeto de um produto pronto para o uso. Nesta fase do DFSS, utiliza-se apenas a primeira matriz, que relaciona as necessidades do público alvo com as especificações de desempenho. Outras matrizes podem ser utilizadas em outras fases do projeto. As matrizes QFD estão esquematizadas na Figura 14.2.

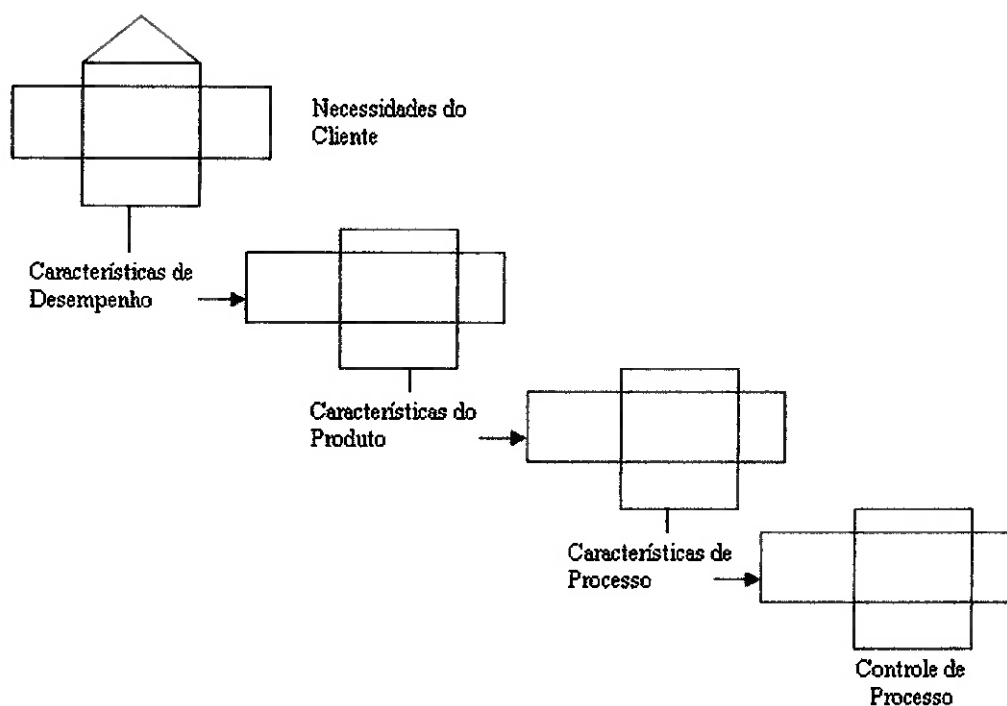


Figura 14.2 - Matrizes do QFD – adaptada [OUCHI02]

- MATRIZ 1: traduz a voz do consumidor em especificações de desempenho de engenharia;
- MATRIZ 2: características do produto convertem as características de desempenho do produto final em seus componentes e características demandadas;

- MATRIZ 3: planejamento de processo e controle de qualidade identificam parâmetros de projeto e processo críticos para o que os requisitos sejam atingidos;
- MATRIZ 4: Cartas de controle de processo, derivadas do planejamento deste e de qualidade, são as instruções para o operador.

A utilização das matrizes do QFD produz o fluxo mostrado na Figura 14.3-Fluxo de informação entre as matrizes do QFD- Pugh (1991).

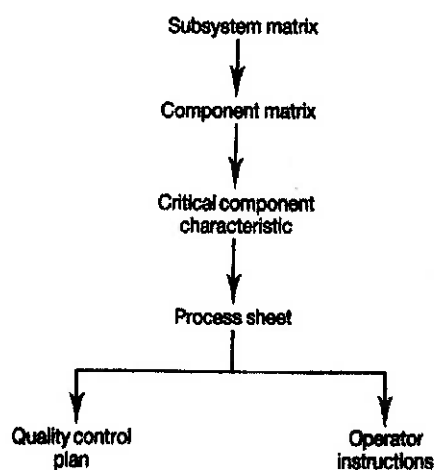


Figura 14.3-Fluxo de informação entre as matrizes do QFD- Pugh (1991)

As instruções para o operador resultantes da quarta matriz são rastreáveis até as necessidades dos clientes, enquanto que as CTQ identificam praticamente apenas o que deve ser atingido pelo produto e não como o operador deve fazer para tal. Sabendo disso, o operador pode estabelecer uma relação entre o que o cliente quer com a sua contribuição no processo para que isto seja atingido.

De acordo com Pugh (1991), o potencial máximo do QFD foi demonstrado pela indústria automotiva japonesa. Após dez anos de implementação envolvendo seus fornecedores, estima-se que os custos de início de projetos foram reduzidos em 61% entre 1977 e 1984, e o tempo necessário para um projeto foi diminuído para um terço.

14.2.1 Construção da primeira matriz do QFD

Apesar de parecer muito complicada, a primeira matriz do QFD é construída por diversas partes simples, como mostra a Figura 14.4.

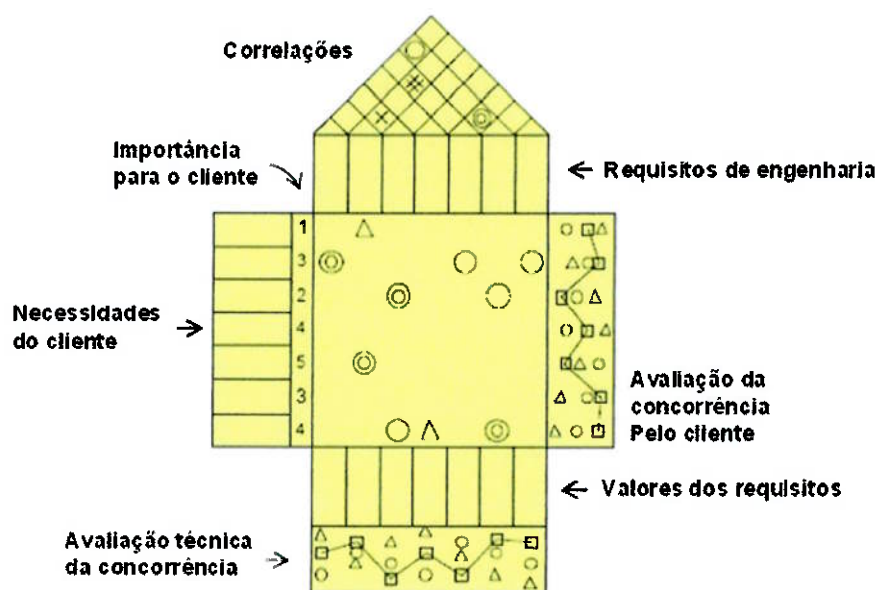


Figura 14.4 - Partes da primeira matriz QFD - Adaptada intranet GM

As necessidades dos clientes conhecidas através de pesquisas de mercado e análise da concorrência são simplesmente listadas como na Figura 14.5-Exemplo de matriz de relação entre requisitos do cliente e produto: ●, relação forte; ○, relação média; △, relação fraca. Fonte: PUGH, Total Design. a seguir expande-se as necessidades básicas em secundárias e terciárias. Após este passo, uma matriz de controle das características do produto foi criada. Esta primeira etapa é crucial para o desenvolvimento de um bom QFD, e deve fazer uso de toda a experiência da empresa.

			Product requirements									
Customer requirements	Primary	Secondary	Tertiary	Steering feedback	Ride	Handling	Chassis isolation	Engine isolation	Performance	Economy	Durability	Packaging
	Quiet	Quiet chassis	No thumps	○	○		●					
			No road noise				●					
			Smooth ride		●			△	△			
		Low engine noise	Smooth acceleration					○	●			
			No shunt				●	○				
			Shake free				●					
		No rattles										
				●								

Figura 14.5-Exemplo de matriz de relação entre requisitos do cliente e produto: ●, relação forte; ○, relação média; △, relação fraca. Fonte: PUGH, Total Design.

Características de controle críticas que representam a voz do cliente (VOC) serão desenvolvidas como base para o projeto do produto/processo e precisam necessariamente ser expressas em termos quantitativos.

Os passos que seguem desenvolvem a matriz e classificam, por grau, a relação entre características do produto e requisitos do cliente. Somado a esta avaliação, é a análise dos produtos competidores sob o mesmo critério, como determinado pelas informações do cliente disponíveis na empresa. A Figura 14.6 abaixo mostra um exemplo.

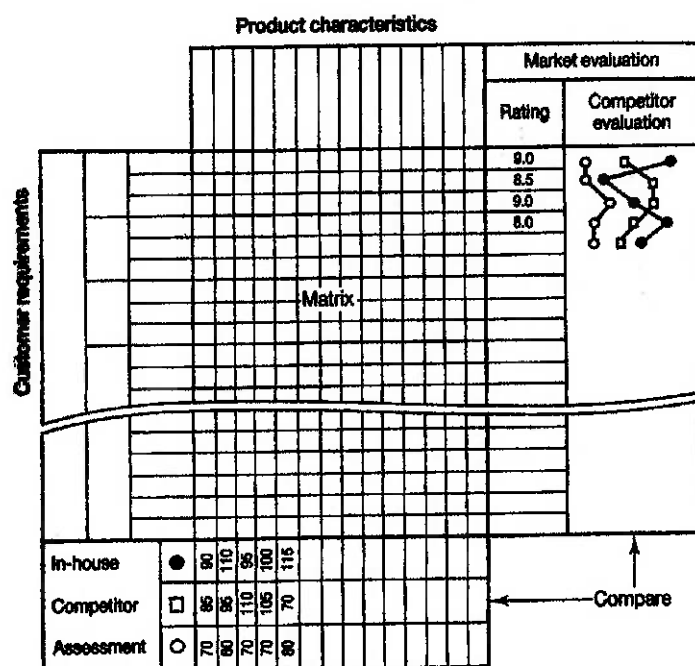


Figura 14.6-Avaliação de mercado: ●, competidor A; □, competidor B; ○, competidor C. Fonte: PUGH, Total Design.

Para se completar a matriz, devem-se inserir as características dos produtos competidores obtidas através de testes especificados quantitativamente ou através de uma escala gradativa.

Os parâmetros de projeto obtidos são então divididos para os componentes e subsistemas como ilustra a Figura 14.7, e serão usados para medir o desempenho do produto ou processo durante diversos estágios do projeto. Usando terminologia de projetos, os parâmetros que são resultado da análise da primeira matriz do QFD são os parâmetros críticos do projeto (CPM) ou CTQ.

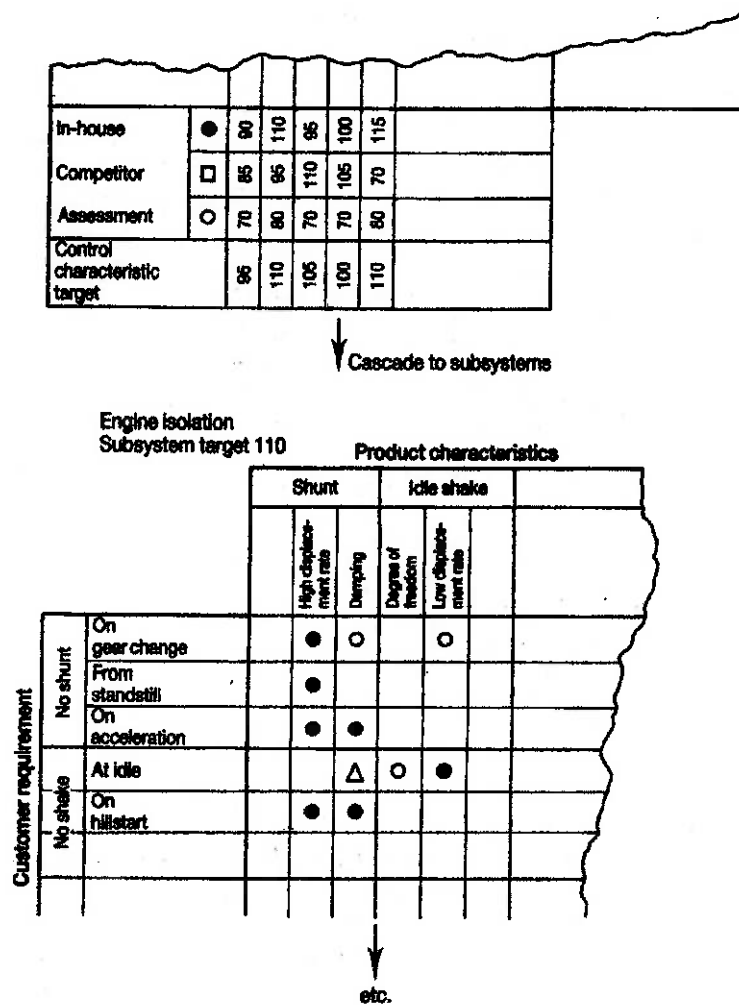


Figura 14.7-Divisão das características do produto para subsistemas. Fonte: PUGH, Total Design.

14.3 Modelo de Kano

O modelo proposto por Kano, professor da Universidade de Ciências de Tóquio e consultor de gestão da qualidade, marketing e estatística – trata de "qualidade atrativa versus qualidade obrigatória".

Kano questionou a crença convencional sobre a satisfação do cliente, segundo a qual quanto melhor for uma empresa na prestação de cada atributo do produto ou serviço, mais satisfeitos estarão seus clientes. Em sua opinião, nem todo o desempenho de um produto ou serviço é igual aos olhos do cliente. Alguns atributos criam níveis mais altos de fidelidade que outros por agradarem mais. O "modelo Kano" afirma que há três níveis de desempenho, conforme ilustra a Figura 14.8:

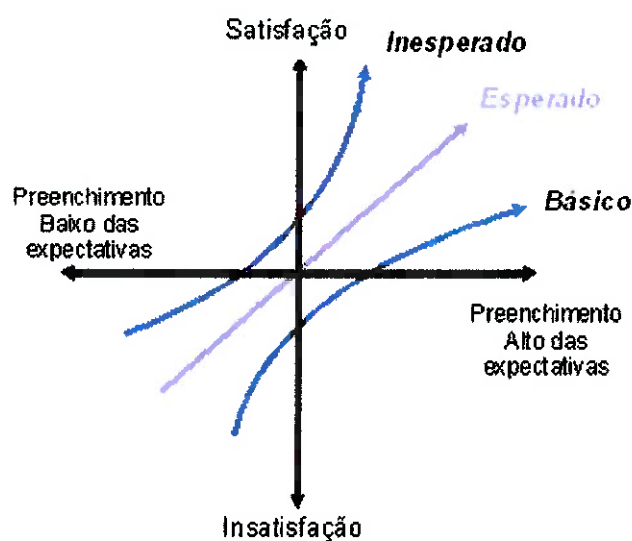


Figura 14.8 - Modelo de Kano

- *Básico*. É obrigatório. O pedal do acelerador deve acionar a borboleta do motor e fazer com que o veículo acelere quando pressionado. Contudo, seu cumprimento também não aumentará a fidelidade, porque os clientes os consideram requisitos mínimos.
- *Esperado*. Este nível abrange os fatores de desempenho que os líderes de um setor fornecem. Um pedal que seja confortável em uma viagem longa, por

exemplo. Fornecê-lo não aumenta nem diminui a fidelidade do cliente, porque a maioria dos concorrentes o faz.

- *Inesperado*. Este nível inclui os fatores de desempenho atraentes e surpreendentes, que diferenciam uma empresa de suas concorrentes e aumentam a fidelidade do cliente. Um pedal que permita o controle de velocidade em qualquer condição de piso ou velocidade, além de confortável e fácil de ser acionado, por exemplo.

14.4 Gerenciamento de parâmetros críticos (CPM-Critical Parameter Management) ou CTQ

O gerenciamento dos parâmetros críticos de projeto está se tornando rapidamente uma ferramenta estratégica para reduzir o ciclo de desenvolvimento de um novo produto (CREVELING, SLUTSKY, ANTIS). O CPM atua no sentido de atender às necessidades críticas levantadas após conhecer-se a voz do cliente.

Para ilustrar o CPM pode-se pensar em um barco com seis remadores que participam de uma corrida. O objetivo é vencer, mas a mecânica atrás da vitória não é apenas uma questão de qualidade dos remadores, mas um problema que envolve física, engenharia, integração dos subsistemas (cada remador). O barco move-se em um ambiente repleto de variações, como a água, vento, forças de arrasto e laterais, além de ter suas próprias fontes de variação, como remos desgastados e remadores diferentes. A questão que os remadores devem saber responder é: Qual são os parâmetros críticos que devem ser verificados para que o objetivo de vencer a corrida seja atingido mesmo existindo interferências das mais variadas, causadas pelo ruído externo? [CREVELING,SLUTSKY,ANTIS03].

As respostas à esta pergunta e as ferramentas usadas para melhorar o desempenho individual e do grupo é o que levará ou não este barco a vitória.

Neste trabalho, os parâmetros críticos de projeto são as necessidades dos clientes, portanto, CPM equivale a CTQ (Critical to Quality).

15 IDDOV Fase 3: Desenvolver

Nesta etapa decisões importantes são exigidas do grupo de projeto. Segundo a ASI Consulting Group, é a etapa na qual há maiores oportunidades para idéias inovadoras e onde cerca de 80% dos custos de projeto estão amarrados. Um bom projeto leva à menores níveis de taxa de falha do produto, conforme mostra a Figura 15.1.

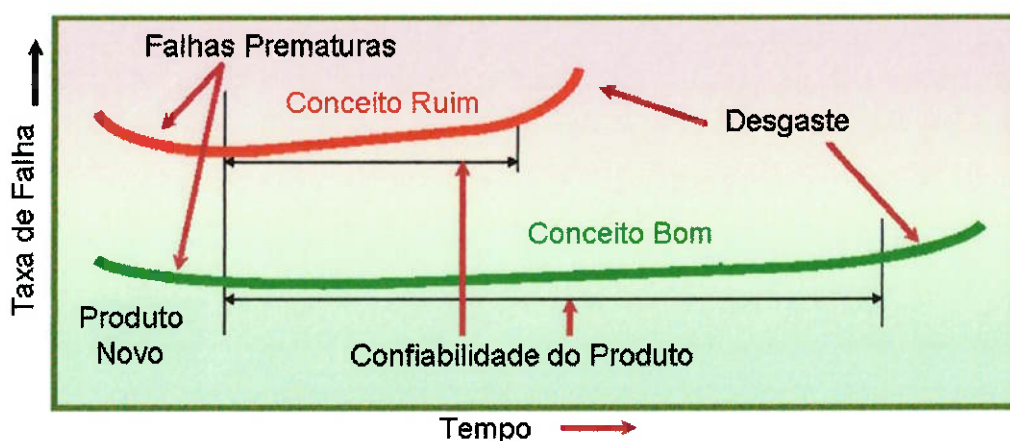


Figura 15.1 - Curva da Banheira

15.1 TRIZ

15.1.1 Introdução

Ao passo que muitas ferramentas para projeto como o QFD sejam largamente utilizadas, estas mostram apenas *qual problema* deve-se resolver e muitas vezes não *mostram como resolver* o problema.

Os projetistas que tentam solucionar o problema contam normalmente apenas com seus conhecimentos nas áreas em que são especializados e perdem a chance de enxergarem soluções em outros campos do conhecimento. Por exemplo, um engenheiro de materiais procurando por uma solução para amortecedores provavelmente restringirá

suas pesquisas à borrachas. Uma solução mais eficiente e barata pode ser criar um campo magnético, mas como o engenheiro de materiais poderia imaginar tal solução? Usando a ferramenta chamada TRIZ, ele seria capaz de explorar soluções de problemas em áreas diferentes da sua.

A palavra TRIZ vem da pronúncia da sigla russa para “Teoria da Solução Inventiva de Problemas”. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo russo Genrich Altshuller, que estudando patentes percebeu que a solução de problemas diferentes se repetia em diversas indústrias e pesquisas e que inovações usavam efeitos científicos fora dos campos onde foram desenvolvidos, ou seja, Altshuller concluiu que a maioria dos problemas a serem resolvidos (cerca de 90%) já o foi em situações muitas vezes completamente diferentes da situação enfrentada.

Nas décadas de 60 e 70, Altshuller classificou as soluções de problemas e cinco categorias.

- Nível um. Problemas rotineiros de projetos resolvidos por métodos bem conhecidos dentro da especialidade do problema. Aproximadamente 32% das soluções foram classificadas dentro desta categoria.
- Nível dois. Pequenas melhorias dentro de um sistema existente feita através de métodos conhecidos dentro da indústria em questão. São, normalmente, soluções de compromisso, isto é, se ganha em algum aspecto mas perde-se em outro (aumentar a resistência de um material ocasionando aumento de seu peso, por exemplo). Cerca de 45% das soluções foram classificadas dentro desta categoria.
- Nível três. Grandes melhorias em um sistema existente através de métodos apenas conhecidos fora da indústria na qual o problema foi gerado. Cerca de 18% das soluções se encaixaram nesta categoria.
- Nível quatro. Geração de um novo conceito que utilize novos princípios para realizar as funções do sistema. Estas soluções são normalmente encontradas mais na ciência do que na tecnologia. Cerca de 4% das soluções foram classificadas nesta categoria.

- Nível cinco. Descoberta científica rara ou invenção pioneira. Englobou cerca de 1% das soluções pesquisadas.

Estes resultados estão resumidos na Tabela 17.1.

Tabela 15.1 - Níveis de Inventividade - adaptada de mazur.net/triz

Níveis de Inventividade			
Nível	Grau de Inventividade	% das soluções	Fonte do Conhecimento
1	Solução Aparente	32%	Conhecimento Pessoal.
2	Pequena Melhoria	45%	Conhecimento da Empresa
3	Grande Melhoria	18%	Conhecimento da Indústria.
4	Novo Conceito	4%	Conhecimentos de fora da Indústria
5	Descoberta	1%	Todo Conhecimento (Pesquisas, Sociedade...)

O TRIZ apresenta como base três premissas:

1. Idealização: sistemas devem evoluir no sentido de melhorar seu grau de idealização, onde idealização é definida como o quociente da somatória dos aspectos funcionais do produto (U) pela somatória de seus aspectos negativos (H).

$$Idealização = \frac{\sum U_i}{\sum H_i}$$

Aspectos funcionais incluem os efeitos positivos do funcionamento do produto. Aspectos negativos são entradas como custo, consumo de energia, poluição, perigo, etc.

2. Contradição: projetos inovadores resolvem contradições, que podem ser vistas como efeitos secundários indesejados.
3. Abordagem sistêmica.

15.1.2 Aplicação do processo passo-a-passo

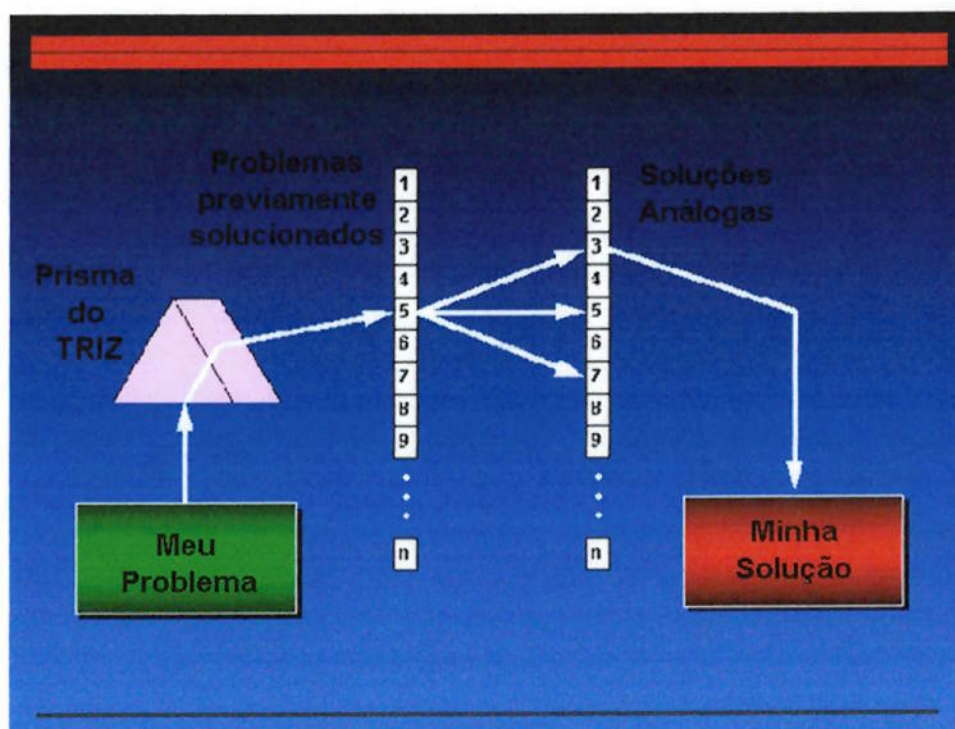


Figura 15.2 - Fluxo de Informações do TRIZ -Elaborada pelo autor

Passo 1: Identificar o problema. Pode ser feito através de ferramentas como o QFD.

Passo 2: Formular o problema usando o Prisma do TRIZ. Formular o problema em termos de contradições físicas. Identificar os problemas que podem ocorrer. Pode a melhoria de um aspecto do produto prejudicar outros? Existem conflitos técnicos que podem ocasionar em contradição?

Passo 3: Procurar por problemas resolvidos anteriormente. Altshuller, em sua pesquisa por cerca de 1,5 milhão de patentes, levantou 39 características técnicas padrão que podem causar conflito. Este 39 parâmetros de engenharia estão listados na Tabela 15.2.

Deve-se inicialmente encontrar o princípio do produto que deve ser modificado e em seguida o princípio causado por um efeito secundário indesejado.

Tabela 15.2 - Os 39 parâmetros de engenharia - adaptada de mazur.net/triz

1	Peso do objeto em movimento	21	Potencia
2	Peso do objeto parado	22	Perda de Energia
3	Comprimento do objeto em movimento	23	Perda de substancia
4	comprimento do objeto parado	24	Perda de informação
5	Área do objeto em movimento	25	Perda de tempo
6	Área do objeto parado	26	Quantidade de substancia
7	Volume do objeto em movimento	27	Confiabilidade
8	Volume do objeto parado	28	Precisão de medição
9	Velocidade	29	Precisão de fabricação
10	Força	30	Efeitos indesejados atuando no objeto
11	Tensão, pressão	31	Efeitos colaterais indesejados
12	Forma	32	Manufaturabilidade
13	Estabilidade do objeto	33	Conveniencia de uso
14	Resistencia	34	Manutenibilidade
15	Durabilidade do objeto em movimento	35	Adaptabilidade
16	Durabilidade do objeto parado	36	Complexidade do componente
17	Temperatura	37	Complexidade de controle
18	Brilho	38	Nível de automação
19	Energia gasta pelo objeto em movimento	39	Produtividade
20	Energia gasta pelo objeto parado		

Passo 4: Utilizando soluções análogas. Altshuller também conseguiu extrair de sua pesquisa em patentes os 40 princípios inventivos mostrados na Tabela 15.3.

Tabela 15.3 – Princípios inventivos-adaptada de mazur.net

1	Segmentação, fragmentação	21	Alta velocidade
2	Remoção, extração	22	transformação de prejuizo em lucro
3	Qualidade local	23	Retroalimentação
4	Assimetria	24	Mediação
5	Junção, mistura	25	Auto-serviço
6	Universalização	26	Cópia
7	boneca de esconder russa	27	Uso de objeto barato e de vida curta
8	Contrapeso	28	Substituição de meios mecânicos
9	Compensação prévia	29	Uso de pneumática e hidráulica
10	Ação prévia	30	Uso de filmes finos e capas flexíveis
11	Amortecimento prévio	31	Uso de materiais porosos e membranas
12	Equipotencialidade	32	Mudança de cor
13	Reversão	33	Homogenização
14	Recurvação	34	Descarte e recuperação
15	Dinamização	35	Mudança de parametros e propriedades
16	Ação parcial ou excessiva	36	Mudança de fase
17	Aumento do numero de dimensões	37	Expansão térmica
18	Vibração	38	Uso de oxidantes fortes
19	Ação periódica	39	Uso de atmosferas inertes
20	Continuidade de ação útil	40	Uso de materiais compostos

Para definir-se qual principio inventivo deve-se usar para resolver o problema, deve-se consultar a Tabela de Contradições de Altshuller, que relaciona as 39 características contraditórias. No eixo das abscissas estão os efeitos secundários indesejados e nas ordenadas estão as características que se deseja melhorar no produto. A intersecção mostra o número do principio inventivo que pode ser utilizado para resolver o problema. As Tabelas de Contradições são mostradas na Figura 15.3, Figura 15.4, Figura 15.5, Figura 15.6, Figura 15.7 e Figura 15.8 abaixo.

Undesired Result (Conflict)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Feature to Improve		Weight of moving object	Weight of non-moving object	Length of moving object	Length of non-moving object	Area of moving object	Area of non-moving object	Volume of moving object	Volume of non-moving object	Speed	Force	Tension, pressure	Shape	Stability of object
1	Weight of moving object			15,8, 29,34		29,17, 38,34		29,2, 40,28		2,8, 15,38	8,10, 18,37	10,36, 37,40	10,14, 35,40	1,35, 19,39
2	Weight of non-moving object				10,1, 29,35		35,30, 19,2		5,35, 14,2		8,10, 19,35	13,29, 10,18	13,10, 29,14	26,39, 1,40
3	Length of moving object	8,15, 29,34				15,17, 4		7,17, 4,35		13,4, 8	17,10, 4	1,8, 35	1,8, 10,29	1,8, 15,34
4	Length of non-moving object		35,28, 40,29				17,7, 10,40		35,8, 2,14		28,10	1,14, 35	13,14, 15,7	39,37, 35
5	Area of moving object	2,17, 29,4		14,15, 18,4				7,14, 17,4		29,30, 4,34	19,30, 35,2	10,15, 36,28	6,34, 29,4	11,2, 13,39
6	Area of non-moving object		30,2, 14,18		26,7, 9,39						1,18, 35,36	10,15, 36,37		2,38
7	Volume of moving object	2,26, 29,40		1,7, 4,35		1,7, 4,17				29,4, 38,34	15,35, 36,37	6,35, 36,37	1,18, 29,4	28,10, 1,39
8	Volume of non-moving object		35,10, 19,14	19,14	35,8, 2,14						2,18, 37	24,35	7,2, 35	34,28, 35,40
9	Speed	2,28, 13,38		13,14, 8		29,30, 34		7,29, 34			13,28, 15,19	6,18, 38,40	35,15, 18,34	28,33, 1,18
10	Force	8,1, 37,18	18,13, 1,28	17,19, 9,38	28,10	19,10, 15	1,18, 36,37	15,9, 12,37	2,36, 18,37	13,28, 15,12		18,21, 11	10,35, 40,34	35,10, 21
11	Tension, pressure	10,36, 37,40	13,29, 10,18	35,10, 36	35,1, 14,16	10,15, 36,25	10,15, 35,37	6,35, 10	35,24	6,35, 36	36,35, 21		35,4, 15,10	35,33, 2,40
12	Shape	8,10, 29,40	15,10, 26,3	29,34, 5,4	13,14, 10,7	5,34, 4,10		14,4, 15,22	7,2, 35	35,15, 34,18	35,10, 37,40	34,15, 10,14		33,1, 18,4
13	Stability of object	21,35, 2,39	26,39, 1,40	13,15, 1,28	37	2,11, 13	39	28,10, 19,39	34,28, 35,40	33,15, 28,18	10,35, 21,16	2,35, 40	22,1, 18,4	
14	Strength	1,8, 40,15	40,26, 27,1	1,15, 8,35	15,14, 28,28	3,34, 40,29	9,40, 28	10,15, 14,7	9,14, 17,15	8,13, 26,14	10,18, 3,14	10,3, 18,40	10,30, 35,40	13,17, 35
15	Durability of moving object	19,5, 34,31		2, 19, 9		3,17, 19		10,2, 19,30		3, 35, 5	19,2, 18	19,3, 27	14,26, 28,25	13,3, 35
16	Durability of non-moving object		6,27, 19,16		1,10, 35				35,34, 38					39,3, 35,23
17	Temperature	36,22, 6,38	22,35, 32	15,19, 9	15,19, 9	3,35, 39,18	35,38	34,39, 40,18	35,6, 4	2,28, 36,30	35,10, 3,21	35,39, 19,2	14,22, 19,32	1,35, 32
18	Brightness	19,1, 32	2,35, 32	19,32, 16		19,32, 26		2,13, 10		10,13, 19	26,19, 6		32,30	32,3, 27
19	Energy spent by moving object	12,18, 28,31		12,28		15,19, 25		35,13, 18		8,15, 35	16,26, 21,2	23,14, 25	12,2, 29	19,13, 17,24
20	Energy spent by non-moving object		19,9, 6,27								36,37			27,4, 29,18

Figura 15.3 - Qualidades a melhorar 1-20 vs. Resultados indesejados 14-26

Undesired Result (Conflict)		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Feature to Improve		Strength	Durability of moving object	Durability of non-moving object	Temperature	Brightness	Energy spent by moving object	Energy spent by non-moving object	Power	Waste of energy	Waste of substance	Loss of information	Waste of time	Amount of substance
1	Weight of moving object	28,27, 18,40	5,34, 31,35		6,20, 4,38	19,1, 32	35,12, 34,31		12,36, 18,31	6, 2, 34,19	5,35, 3,31	10,24, 35	10,35, 20,28	3,26, 18,31
2	Weight of non-moving object	28,2, 10,27		2,27, 19,6	28,19, 32,22	19,32, 35		18,19, 28,1	15,19, 18,22	18,19, 28,15	5, 8, 13,30	10,15, 35	10,20, 35,26	19,6, 18,26
3	Length of moving object	8,35, 29,34	19		10,15, 19	32	8,35, 24		1,35	7, 2, 35,39	4,29, 23,10	1, 24	18, 2, 29	29, 35
4	Length of non-moving object	15,14, 28,26		1,40, 35	3,35, 38,18	3,25			12,8	6,28	10,28, 24,35	24,26	30,29, 14	
5	Area of moving object	3,15, 40,14	6,3		2,15, 16	15,32, 19,13	19,32		19,10, 32,18	15,17, 30,26	10,35, 2,39	30,26	26, 4	29,30, 6,13
6	Area of non-moving object	40		2,10, 19,30	35,39, 38				17,32	17,7, 30	10,14, 18,39	30,16	10,35, 4,18	2, 18, 40,4
7	Volume of moving object	9,14, 15,7	6,35, 4		34,39, 10,18	2,13, 10	35		35,6, 13,18	7,15, 13,18	36,39, 34,10	2, 22	2, 6, 34,10	29,30, 7
8	Volume of non-moving object	9,14, 17,15		35,34, 38	35, 6, 4				30,6		10,39, 35,34		35,16, 32,18	35, 3
9	Speed	8,3, 26,14	3,19, 35,5		28,30, 36,2	10,13, 19	8,15, 35,38		19,35, 38,2	14,20, 19,35	10,13, 28,38	13, 26		18,19, 29,38
10	Force	35,10, 14,27	19,2		35,10, 21		19,17, 10	1,18, 36,37	19,35, 18,37	14,15	8,35, 40,5		10,37, 36	14,29, 18,36
11	Tension, pressure	9,18, 3,40	19,3, 27		35,39, 19,2		14,24, 10,37		10,35, 14	2,36, 25	10,36, 3,37		37,36, 4	10,14, 36
12	Shape	30,14, 10,40	14,26, 9,25		22,14, 19,32	13,15, 32	2,6, 34,14		4, 6, 2	14	35,29, 3, 5		14,10, 34,17	36, 22
13	Stability of object	17,9, 15	13,27, 10,35	39,3, 35,23	35,1, 32	32,3, 27,15	13,19	27,4, 29,18	32,35, 27,31	14,2, 39,6	2, 14, 30,40		35,27	15,32, 35
14	Strength		27,3, 26		30,10, 40	35,19	19,35, 10	35	10,26, 35,28	35	35,28, 31,40		29,3, 28,10	29,10, 27
15	Durability of moving object	27,3, 10			19,35, 39	2,19, 4,35	28,6, 35,18		19,10, 35,38		28,27, 3,18	10	20,10, 28,18	3, 35, 10,40
16	Durability of non-moving object				19,18, 36,40				16		27,16, 18,38	10	28,20, 10,16	3, 35, 31
17	Temperature	10,30, 22,40	19,13, 39	19,18, 36,40		32,30, 21,16	19,15, 3,17		2,14, 17,25	21,17, 35,38	21,36, 29,31		35,28, 21,18	3, 17, 30,39
18	Brightness	35,19	2, 19, 6		32,35, 19		32,1, 19	32,35, 1,15	32	19,16, 1, 6	13, 1	1, 6	19, 1, 26,17	1, 19
19	Energy spent by moving object	5,18, 9,35	28,35, 6,18		19,24, 3,14	2,15, 19			6,19, 37,18	12,22, 15,24	35,24, 18,5		35,38, 19,18	34,23, 16,18
20	Energy spent by non-moving object	35				19,2, 35,32					28,27, 18,31			3, 35, 31

Figura 15.4 - Qualidades a melhorar 1-20 vs. Resultados indesejados 27-39

Feature to Improve	Undesired Result (Conflict)	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
		Reliability	Accuracy of measurement	Accuracy of manufacturing	Harmful factors acting on object	Harmful side effects	Manufacturability	Convenience of use	Repairability	Adaptability	Complexity of device	Complexity of control	Level of automation	Productivity
1	Weight of moving object	3, 11, 1,27	28,27, 35,28	28,35, 28,18	22,21, 18,27	22,35, 31,39	27,28, 1,36	35,3, 2,24	2,27, 28,11	29,5, 15,8	26,30, 36,34	28,29, 26,32	26,35, 18,19	35,3, 24,37
2	Weight of non-moving object	10,28, 8, 3	18,26, 28	10,1, 35,17	2, 19, 22,37	35,22, 1,39	28, 1, 9	6,13, 1, 32	2,27, 28,11	19,15, 28	1,10, 26,39	25,28, 17,15	2, 26, 35	1, 28, 15,35
3	Length of moving object	10,14, 29,40	28,32, 4	10,28, 29,37	1,15, 17,24	17,15	1, 29, 17	15,29, 35,4	1, 28, 10	14,15, 1,18	1, 19, 26,24	35,1, 26,24	17,24, 26,16	14,4, 28,29
4	Length of non-moving object	15,29, 28	32,28, 3	2, 32, 10	1, 18		15, 17, 27	2, 25	3	1, 35	1, 26	28		30,14, 7,26
5	Area of moving object	29, 9	26,28, 32,3	2,32	22,33, 28,1	17,2, 18,39	13,1, 26,24	15,17, 13,16	15,13, 10,1	15,30	14, 1, 13	2,36, 26,18	14,30, 28,23	10,26, 34,2
6	Area of non-moving object	32,35, 40,4	26,28, 32,3	2,29, 18,36	27,2, 39,35	22, 1, 40	40, 16	16, 4	16	15, 16	1, 18, 36	2,35, 30,18	23	10,15, 17,7
7	Volume of moving object	14, 1, 40,11	25,28, 28	25,28, 2,16	22,21, 27,35	17,2, 40,1	29, 1, 40	15,13, 30,12	10	15, 29	26, 1	29,28, 4	35,34, 16,24	10, 6, 2,34
8	Volume of non-moving object	2,35, 16		35,10, 25	34,39, 19,27	30,18, 35,4	35		1		1, 31	2, 17, 26		35,37, 10,2
9	Speed	11,35, 27,28	28,32, 1,24	10,28, 32,25	1,28, 35,23	2,24, 35,21	35,13, 8,1	32,28, 13,12	34,2, 28,27	15,10, 26	10,28, 4,34	3,34, 27,16	10, 18	
10	Force	3,35, 13,21	35,10, 23,24	28,29, 37,36	1,35, 40,18	13,3, 36,24	15,37, 18,1	1,28, 3,25	15, 1, 11	15,17, 18,20	26,35, 10,18	36,37, 10,19	2, 35	3,28, 35,37
11	Tension, pressure	10,13, 19,35	6, 28, 25	3, 35	22, 2, 37	2, 33, 27, 18	1, 35, 16	11	2	35	19, 1, 35	2, 36, 37	35, 24	10,14, 35,37
12	Shape	10,40, 16	28,32, 1	32,30, 40	22,1, 2, 35	35, 1	1,32, 17,28	32,15, 26	2, 13, 1	1, 15, 29	16,29, 1,28	15,13, 39	15, 1, 32	17,26, 34,10
13	Stability of object		13	18	35,24, 30,18	35,40, 27,39	35, 19	32,35, 30	2,35, 10,16	35,30, 34,2	2,35, 22,26	35,22, 39,23	1, 8, 35	23,35, 40,3
14	Strength	11, 3	3, 27, 16	3, 27	18,35, 37,1	15,35, 22,2	11,3, 10,32	32,40, 28,2	27,11, 3	15, 3, 32	2, 13, 28	27, 3, 15, 40	15	29,35, 10,14
15	Durability of moving object	11, 2, 13	3	3,27, 16,40	22,15, 33,28	21,39, 16,22	27, 1, 4	12, 27	29,10, 27	1, 35, 13	10,4, 29,15	19,29, 39,35	6, 10	35,17, 14,19
16	Durability of non-moving object	34,27, 6,40	10, 26, 24		17,1, 40,33	22	35, 10	1	1	2	25,34, 6,35		1	10,20, 16,38
17	Temperature	19,35, 3,10	32,19, 24	24	22,33, 35,2	22,35, 2,24	26, 27	26, 27	4, 10, 16	2,18, 27	2,17, 16	3,27, 35,31	26,2, 19,16	15,28, 35
18	Brightness		11,15, 32	3, 32	15, 19	35,19, 32,39	19,35, 28,26	28,26, 19	15,17, 13,16	15, 1, 1, 19	6, 32, 13	32, 15	2, 26, 10	2, 25, 16
19	Energy spent by moving object	19,21, 11,27	3, 1, 32		1,35, 6,27	2, 35, 6	28,26, 30	19, 35	1,15, 17,28	15,17, 13,16	2, 29, 27,28	35, 98	32, 2	12,28, 35
20	Energy spent by non-moving object	10,36, 23			10, 2, 22,37	19,22, 18	1, 4					19,35, 16,25		1, 6

Figura 15.5 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados indesejados 1-13

Undesired Result (Conflict)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Feature to Improve		Weight of moving object	Weight of non-moving object	Length of moving object	Length of non-moving object	Area of moving object	Area of non-moving object	Volume of moving object	Volume of non-moving object	Speed	Force	Tension, pressure	Shape	Stability of object
21	Power	8,36, 38,31	19,26, 17,27	1,10, 35,37		19,38	17,32, 13,38	35,6, 38	30,6, 25	15,35, 2	26,2, 36,35	22,10, 35	29,14, 2,40	35,32, 15,31
22	Waste of energy	15,6, 19,28	19,6, 18,9	7,2, 6,13	6,38, 7	15,26, 17,30	17,7, 30,18	7,18, 23	7	16,35, 38	36,38			14,2, 39,6
23	Waste of substance	35,6, 23,40	35,6, 22,32	14,29, 10,39	10,28, 24	35,2, 10,31	10,18, 39,31	1,29, 30,36	3,39, 18,31	10,13, 28,38	14,15, 18,40	3,36, 37,10	29,35, 3,5	2,14, 30,40
24	Loss of information	10,24, 35	10,35, 5	1,26	26	30,26	30,16		2,22	26,32				
25	Waste of time	10,20, 37,35	10,20, 26,5	15,2, 29	30,24, 14,5	26,4, 5,16	10,35, 17,4	2,5, 34,10	35,16, 32,18		10,37, 36,5	37,36, 4	4,10, 34,17	35,3, 22,5
26	Amount of substance	35,6, 18,31	27,26, 18,35	29,14, 35,18		15,14, 29	2,18, 40,4	15,20, 29		35,29, 34,28	35,14, 3	10,36, 14,3	35,14	15,2, 17,40
27	Reliability	3,8, 10,40	3,10, 8,28	15,9, 14,4	15,29, 28,11	17,10, 14,16	32,35, 40,4	3,10, 14,24	2,35, 24	21,35, 11,28	8,28, 10,3	10,24, 35,19	35,1, 16,11	
28	Accuracy of measurement	32,35, 26,28	28,35, 25,26	28,26, 5,16	32,28, 3,16	26,28, 32,3	26,28, 32,3	32,13, 6		28,13, 32,24	32,2	6,28, 32	6,28, 32	32,35, 13
29	Accuracy of manufacturing	28,32, 13,18	28,35, 27,9	10,28, 29,37	2,32, 10	28,33, 29,32	2,29, 18,35	32,28, 2	25,10, 35	10,28, 32	28,19, 34,36	3,35	32,30, 40	30,18
30	Harmful factors acting on object	22,21, 27,39	2,22, 13,24	17,1, 39,4	1,18	22,1, 33,28	27,2, 39,35	22,23, 37,35	34,39, 19,27	21,22, 35,28	13,35, 39,18	22,2, 37	22,1, 3,35	35,24, 30,18
31	Harmful side effects	19,22, 15,39	35,22, 1,39	17,15, 16,22		17,2, 18,39	22,1, 40	17,2, 35,4	30,18, 35,4	35,28, 3,23	35,28, 1,40	2,33, 27,18	35,1	35,40, 27,39
32	Manufacturability	28,29, 15,16	1,27, 36,13	1,29, 13,17	15,17, 27	13,1, 26,12	16,40	13,29, 1,40	35	35,13, 6,1	35,12	35,19, 1,37	1,28, 13,27	11,13, 1
33	Convenience of use	25,2, 13,15	6,13, 1,25	1,17, 13,12		1,17, 13,16	18,16, 15,39	1,16, 35,15	4,18, 39,31	18,13, 34	28,13, 35	2,32, 12	15,34, 29,28	32,35, 30
34	Repairability	2,27, 35,11	2,27, 35,11	1,28, 10,25	3,18, 31	15,13, 32	16,25	25,2, 35,11	1	34,9	1,11, 10	13	1,13, 2,4	2,35
35	Adaptability	1,6, 15,8	19,15, 29,16	35,1, 29,2	1,35, 16	35,30, 29,7	15,16	15,35, 29		35,10, 14	15,17, 20	35,16	15,37, 1,8	35,30, 14
36	Complexity of device	26,30, 34,36	2,36, 35,39	1,19, 26,24	26	14,1, 13,16	6,36	34,25, 6	1,16	34,10, 28	26,16	19,1, 35	29,13, 28,15	2,22, 17,19
37	Complexity of control	27,26, 28,13	6,13, 28,1	16,17, 26,24	26	2,13, 15,17	2,39, 30,16	29,1, 4,15	2,18, 26,31	3,4, 16,35	36,28, 40,19	35,36, 37,32	27,13, 1,39	11,22, 39,30
38	Level of automation	28,26, 18,35	28,26, 35,10	14,13, 17,28	23	17,14, 13		35,13, 16		28,10	2,35	13,35	15,32, 1,13	18,1
39	Productivity	35,26, 24,37	28,27, 15,3	18,4, 28,38	30,7, 14,26	10,26, 34,31	10,35, 17,7	2,6, 34,10	35,37, 10,2		28,15, 10,36	10,37, 14	14,10, 34,40	35,3, 22,39

Figura 15.6 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados Indesejados 14-26

Feature to Improve	Undesired Result (Conflict)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
		Strength	Durability of moving object	Durability of non-moving object	Temperature	Brightness	Energy spent by moving object	Energy spent by non-moving object	Power	Waste of energy	Waste of substance	Loss of information	Waste of time	Amount of substance
21	Power	26,10,28	19,35,10,38	16	2,14,17,25	16,6,19	16,6,19,37			10,35,38	28,27,18,38	10,18	35,20,10,6	4,34,19
22	Waste of energy	26			19,38,7	1,13,32,15			3,38		35,27,2,37	19,10	10,18,32,7	7,18,25
23	Waste of substance	35,28,31,40	28,27,3,18	27,16,18,38	21,36,39,31	1,6,13	35,18,24,5	28,27,12,31	28,27,18,38	35,27,2,31			15,18,35,10	6,3,10,24
24	Loss of information		10	10		19			10,19	10,10			24,26,28,32	24,28,35
25	Waste of time	29,3,28,18	20,10,28,18	28,20,10,16	35,29,21,18	1,19,26,17	35,38,19,18	1	35,20,10,6	10,5,18,32	35,18,10,39	24,26,28,32		35,38,18,16
26	Amount of substance	14,35,34,10	3,35,10,40	3,35,31	3,17,39		34,29,16,18	3,35,31	35	7,18,25	6,3,10,24	24,28,35	35,38,18,16	
27	Reliability	11,28	2,35,3,25	34,27,6,40	3,35,10	11,32,13	21,11,27,19	36,23	21,11,26,31	10,11,35	10,35,29,38	10,28	10,30,4	21,28,40,3
28	Accuracy of measurement	28,6,32	28,6,32	10,26,24	6,19,28,24	6,1,32	3,6,32		3,6,32	26,32,27	10,16,31,28		24,34,28,32	2,6,32
29	Accuracy of manufacturing	3,27	3,27,40		19,26	3,32	32,2		32,2	13,32,2	35,31,10,24		32,26,28,18	32,30
30	Harmful factors acting on object	18,35,37,1	22,15,33,28	17,1,40,33	22,33,35,2	1,19,32,13	1,24,6,27	10,2,22,37	19,22,31,2	21,22,35,2	33,22,19,40	22,10,2	35,18,34	35,33,29,31
31	Harmful side effects	15,35,22,2	15,22,33,31	21,39,16,22	22,35,2,24	19,24,39,32	2,35,6	19,22,18	2,35,18	21,35,2,22	10,1,34	10,21,29	1,22	3,24,39,1
32	Manufacturability	1,3,10,32	27,1,4	35,16	27,26,18	28,24,27,1	28,26,27,1	1,4	27,1,12,24	19,35	15,34,33	32,24,18,16	35,28,34,4	35,23,1,24
33	Convenience of use	32,40,3,28	29,3,8,25	1,16,25	26,27,13	13,17,1,24	1,13,24		35,34,2,10	2,19,13	28,32,2,24	4,10,27,22	4,28,10,34	12,35
34	Repairability	11,1,2,8	11,29,28,27	1	4,10	15,1,13	15,1,28,16		15,10,32,2	15,1,32,19	2,35,34,27		32,1,10,25	2,28,10,25
35	Adaptability	35,3,32,6	13,1,35	2,16	27,2,3,35	6,22,26,1	19,35,29,13		19,1,28	18,15,1	15,10,2,13		35,28	3,35,15
36	Complexity of device	2,13,28	10,4,28,15		2,17,13	24,17,13	27,2,29,28		20,19,30,34	10,35,13,2	35,10,28,29		6,29	13,3,27,10
37	Complexity of control	27,3,15,28	19,29,39,25	25,24,6,35	3,27,35,16	2,24,26	35,38	19,35,16	19,1,16,10	35,3,15,19	1,13,10,24	35,33,27,22	18,28,32,9	3,27,29,18
38	Level of automation	25,13	6,9		28,2,19	8,32,19	2,32,13		28,2,27	23,28	35,10,18,5	35,33	24,28,35,30	35,13
39	Productivity	29,28,10,18	35,10,2,18	20,10,16,38	35,21,28,10	26,17,19,1	35,10,38,19	1	35,20,10	28,10,29,35	28,10,35,23	13,15,23		35,38

Figura 15.7 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados Indesejados 14-26

Feature to Improve	Undesired Result (Conflict)	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
		Reliability	Accuracy of measurement	Accuracy of manufacturing	Harmful factors acting on object	Harmful side effects	Manufacturability	Convenience of use	Repairability	Adaptability	Complexity of device	Complexity of control	Level of automation	Productivity
21	Power	19,24, 26,31	32, 15 2	32, 2	19,22, 31,2	2, 35, 18	26,10, 34	26,35, 10	35, 2, 10,34	19,17, 34	20,19, 30,34	19,35, 16	28,2, 17	28,35, 34
22	Waste of energy	11,10, 35	32		21,22, 35,2	21,35, 2,22		35,22 1	2,19		7, 23	35, 3, 15,23	2	28,10, 29,35
23	Waste of substance	10,29, 39,35	16,34, 31,28	35,10, 24,31	33,22, 30,40	10,1, 34,29	15,34, 33	32,28, 2,24	2,35, 34,27	15,10, 2	35,10, 28,24	35,18, 10,13	35,10, 18	28,35, 10,23
24	Loss of information	10,28, 23			22,10, 1	10,21, 22	32	27,22				35,33	35	13, 23 15
25	Waste of time	10,30, 4	24,34, 28,32	24,26, 28,18	35,18, 34	35,22, 18,39	35,28, 34,4	4,28, 10,34	32, 1, 10	35, 28	6, 28	18,28, 32,10	24,28, 35,30	
26	Amount of substance	18, 3, 28,40	13, 2, 28	33, 30	35,33, 29,31	3,35, 40,39	29, 1, 35,27	35,29, 25,10	2,32, 10,25	15, 3, 29	3,13, 27,10	3,27, 29,18	8, 35	13,29, 3,27
27	Reliability		32,3, 11,23	11,32, 1	27,35, 2,40	35, 2, 40,26		27,17, 40	1, 11	13,35, 8,24	13,35, 1	27,40, 28	11,13, 27	1,35, 29,38
28	Accuracy of measurement	5,11, 1,23			28,24, 22,26	3,33, 39,10	6,35, 25,18	1,13, 17,34	1,32, 13,11	13,35, 2	27,35, 10,34	26,24, 32,28	28, 2, 10,34	10,34, 28,32
29	Accuracy of manufacturing	11,32, 1			26,28, 10,36	4,17, 34,26		1,32, 35,23	25, 10		25, 2, 18		26,28, 18,23	10,18, 32,39
30	Harmful factors acting on object	27,24, 2,40	28,33, 23,26	26,28, 10,18			24,35, 2	2, 25, 28,39	35,10, 2	35,11, 22,31	22,19, 29,40	22,19, 29,40	33, 3, 34	22,35, 13,24
31	Harmful side effects	24,2, 40,39	3,33, 26	4,17, 34,26							19, 1, 31	2, 21, 27,1	2	22,35, 18,39
32	Manufacturability		1,35, 12,18		24,2			2, 5, 13,18	35, 1, 11,9	2, 13, 15	27,26, 1	6,28, 11,1	8, 28, 1	35, 1, 10,28
33	Convenience of use	17,27, 8,40	25,13, 2,34	1,32, 35,23	2,25, 28,39		2, 5, 12		12,26, 1,32	15,34, 1,16	32,26, 12,17		1,34, 12,3	15, 1, 28
34	Repairability	11,10, 1,16	10,2, 13	25,10	35,10, 2,16		1,35, 11,10	1,12, 26,15		7, 1, 4 16	35,1, 13,11		34,35, 7,13	1, 32, 10
35	Adaptability	35,13, 8,24	35,5, 1,10		35,11, 32,31		1,13, 31	15,34, 1,16	1,16, 7,4		15,29, 37,28	1	27,34, 35	35,28, 6,37
36	Complexity of device	13,35, 1	2,26, 10,34	26,24, 32	22,19, 29,40	19,1	27,26, 1,13	27,9, 26,24	1,13	29,15, 28,37		15,10, 37,28	15, 1, 24	12,17, 28
37	Complexity of control	27,40, 28,8	26,24, 32,28		22,19, 29,28	2,21	5,28, 11,29	2,5	12,26	1,15	15,10, 37,28		34, 21	35, 18
38	Level of automation	11,27, 32	28,26, 10,34	28,26, 18,23	2,33	2	1,26, 13	1,12, 34,3	1,35, 13	27,4, 1,35	15,24, 10	34,27, 25		5,12, 35,26
39	Productivity	1,35, 10,38	1,10, 34,28	18,10, 32,1	22,35, 13,24	35,22, 18,39	35,28, 2,24	1,28, 7,19	1,32, 10,25	1,35, 28,37	12,17, 28,24	35,18, 27,2	5,12, 35,26	

Figura 15.8 - Qualidades a melhorar 21-39 vs. Resultados Indesejados 27-39

15.2 Diagrama de Pugh

Depois de elaboradas alternativas que resolvem questões críticas do produto, deve-se definir qual delas possui maior chance de sucesso. O Diagrama de Pugh é uma técnica simples, semelhante a uma matriz de decisão, que ajuda o grupo na seleção de alternativas sem perder a objetividade.

Parte-se dos critérios de seleção, selecionando apenas os mais importantes. Em seguida seleciona-se um dos conceitos para servir de base para as comparações. Fazem-se comparações entre o conceito e o conceito base para cada um dos critérios. Quando o conceito avaliado for melhor que base usa-se um (+), quando pior, um (-) e quando igual, um (S).

Depois de terminadas as comparações soma-se os (+),(-) e (S). Os conceitos que apresentarem mais pontos positivos e menos pontos negativos são selecionados para a próxima etapa do diagrama.

Ao fim da análise, cria-se um conceito híbrido, que mescla as melhores características de cada alternativa.

Critério:	Conceito A	Conceito B	Conceito C	BASE
Critério 1	+	+	-	
Critério 2	+	-	+	
Critério 3	S	-	+	
Critério 4	-	S	+	
Critério 5	+	S	S	
Critério 6	+	+	+	
Critério 7	-	-	+	
Critério 8	-	-	+	
Critério 9	+	-	+	
Critério 10	+	+	-	
Soma (+)	6	3	7	
Soma (-)	3	5	2	
Soma (S)	1	2	1	

Figura 15.9 - Diagrama de Pugh - elaborado pelo Autor

15.3 FMEA

A Análise do Tipo e Efeito da Falha ou *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) é uma técnica analítica empregada pelas Engenharias de Projeto, Processo e da Qualidade com o objetivo de identificar e prevenir os tipos de falha em potencial de determinado projeto, processo ou serviço. Através desta ferramenta, consegue-se propagar a falha de um subcomponente para o sistema e saber como esta afeta o segundo.

A aplicação sistêmica do FMEA traz como maior benefício à prevenção ao invés da detecção do problema e a conseqüente redução dos custos da qualidade.

Sua execução é importante para conhecer como o componente ou sistema opera quando um de seus subcomponente ou componentes falha. O resultado pode servir para alertar o grupo de projetos sobre algum item que esteja trazendo maiores problemas.

Outra vantagem importante desta análise é a excelente documentação do projeto que servirá para a melhoria de projetos futuros da empresa.

15.3.1 Relação entre FMEA e QFD em um Projeto

Enquanto o QFD relaciona as necessidades dos clientes com parâmetros de engenharia, o FMEA está mais voltado para confiabilidade de projeto e processo, sem dar muita importância à voz do cliente. A Figura 15.10 ilustra a comparação.

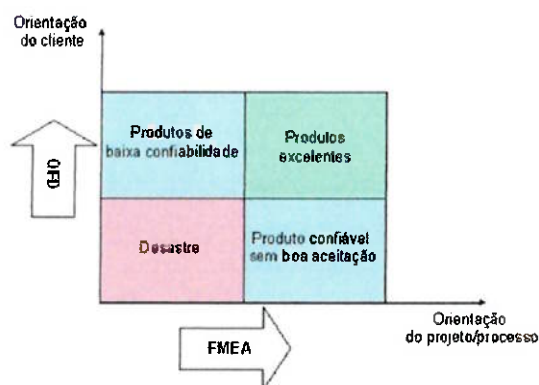


Figura 15.10-FMEA vs. QFD - elaborada pelo autor

15.3.2 Terminologia do FMEA

Seguem algumas definições empregadas pela técnica do FMEA por diversos autores e normas:

Defeito: desvio inaceitável da especificação de um atributo ou medida da qualidade ou característica indesejável de um produto. Um defeito não significa perda da capacidade funcional do produto. Ex.: Um automóvel zero quilometro com teto amassado.

Falha: falta de capacidade funcional de uma unidade em realizar sua função especificada quando requerida. Ex: Freio não funciona ou luz que não acende.

Não Conformidade: deficiência de ação, característica ou documento exigido por projeto ou norma técnica que torna a qualidade de um serviço ou material inaceitável ou indeterminada, exigindo ação corretiva. Ex.: Falta de um certificado de teste ou ensaio.

FMA (Failure Mode Analysis): estudo de um sistema e as interações funcionais de seus componentes sob varias condições pré-estabelecidas de operação (normais e anormais) de modo a determinar a localização de uma provável falha, tipo e mecanismo de ocorrência. Esta técnica é normalmente utilizada na revisão de novos Projetos/Processos já existentes de forma a evitar que os tipos ou mecanismos de falha já ocorridos se repitam.

FEA (Failure Effect Analysis): estudo das falhas potenciais que podem ocorrer em um sistema, focando nos efeitos prováveis desta falha em cada um dos outros componentes, sistemas e na confiabilidade.

FCA (Failure Criticality Analysis): estudo de falhas potenciais em um sistema, objetivando determinar a severidade de cada falha em relação ao desempenho, segurança e operação do sistema.

$FMEA = FMA + FEA$

$FMECA = FMA + FEA + FCA$

15.3.3 FMEA: Características Gerais

O objetivo desta ferramenta é obter e equacionar dados sobre os tipos de falhas em potencial de um produto ou serviço originado em seu projeto (FMEA de projeto) ou processo (FMEA de processo). A aplicação do FMEA é recomendada para realizar análise crítica de novos projetos/processos e produtos e também é uma das fontes para se prever a confiabilidade nos itens/sistemas/produto. No presente trabalho é dada ênfase à ferramenta aplicada ao Projeto.

O FMEA deve ser desenvolvido envolvendo as áreas de projeto/produto, manufatura e qualidade e tem como característica considerar um único Tipo de Falha em potencial no tempo, supondo que as demais características estão conforme especificado no projeto, por essa razão a ferramenta é restrita na consideração das probabilidades e consequências de falhas múltiplas nos sistemas/produtos/processos (VTB 1993).

15.3.4 Etapas de desenvolvimento de um FMEA

O desenvolvimento de um FMEA pode seguir os dez passos listados a seguir:

1. Identificação das *funções e características* esperadas para um item, sistema ou produto (FMEA de Projeto) ou para um processo (FMEA de Processo).
2. Identificação dos *tipos de falhas* em potencial que estes itens, sistemas, produtos ou serviços possam apresentar no desempenho de suas funções.
3. Identificação da cadeia de *efeitos* prováveis quando da ocorrência de algum tipo de falha em potencial.

4. Identificação de *causas* comuns que podem contribuir para o aparecimento do tipo de falha em potencial.
5. Identificação das *formas de controle* utilizadas para evitar ocorrência ou detectar tipos de falha em potencial.
6. Obtenção dos *índices de severidade, ocorrência, detecção e risco* para diversos tipos de falhas em potencial considerados.
7. Proposição de *ações recomendadas* para reduzir o índice de risco através da redução da severidade, minimização das causas prováveis ou melhoria de sua detecção, assim como nomeação dos responsáveis e datas previstas para sua efetiva implementação.
8. Implementação das *ações recomendadas/tomadas*.
9. Reavaliação dos *índices de severidade, ocorrência, detecção e risco* após implementação das ações recomendadas ou tomadas.
10. Retroalimentação do sistema de informações.

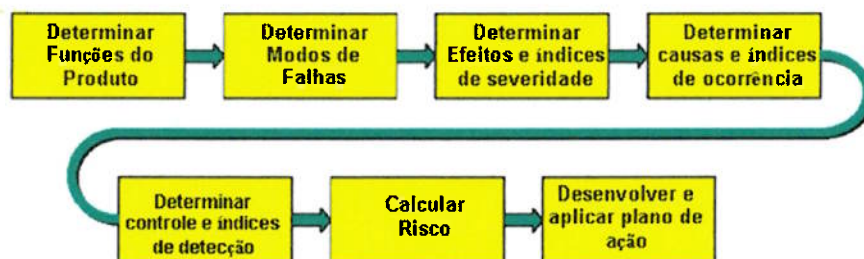


Figura 15.11 - Fluxo de ações FMEA - elaborada pelo autor

15.3.5 O FMEA de Projeto

O objetivo desta ferramenta é identificar e analisar os tipos de falhas em potencial que possam ocorrer com os produtos ou serviços originados pelas especificações do seu projeto.

Em um FMEA de Projeto, ou DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) só são considerados Tipos de Falha relacionados com o projeto e com as especificações de materiais, assumindo-se, inicialmente, que todos os itens a serem analisados serão manufaturados conforme as especificações de seu projeto.

15.3.5.1 FMEA de Projeto passo 1: Funções e Características

Neste primeiro passo são descritas as funções esperadas para cada um dos itens que compõe o produto ou sistema, assim como suas características, requisitos de qualidade e confiabilidade.

Para se identificar as funções e características de um produto, pode-se utilizar o seguinte modelo:

Função do item: *Verbo no infinitivo + Substantivo + Característica*

15.3.5.2 FMEA de Projeto passo 2: Tipo de Falha

Tipo de Falha é a descrição da forma de como um item poderia potencialmente falhar no desempenho de suas funções ou não ser adequado ao atendimento das necessidades e expectativas de seus consumidores.

Tipo de falha é a diferença física existente entre um item que falhou e um item que não falhou, por exemplo quebra, desgaste, vazamento ou corrosão.

A etapa anterior, na qual se identificou as funções e características do produto, é fundamental para se identificar os tipos de falha. Num FMEA de Projeto são comumente considerados como Tipos de Falhas [VTB 1993] :

Contaminação: presença de objeto ou material vindo de fonte externa para o interior da peça, sistema ou produto.

Corrosão: deterioração de uma ou mais características do produto por agentes do meio ambiente.

Desgaste: remoção mecânica da superfície de um material por adesão ou abrasão.

Escoamento: alongamento ou fratura devido a uma única aplicação de carga num período relativamente curto de tempo.

Fadiga: quebra ou fratura devido a ciclos acumulativos de cargas.

Fluência: alongamento ou fratura devido à aplicação de cargas num período relativamente longo de tempo em altas temperaturas.

Instabilidade físico-químico: alterações nas propriedades iniciais de materiais como resiliência, volume, composição, etc., em decorrência do tempo, pressão, temperatura.

Incompatibilidade dimensional: ajuste incorreto ou perda de folgas funcionais por acúmulo de tolerâncias.

Instabilidade estrutural: mudança na forma ou geometria do produto por causa de aplicação de forças externas.

Interferência Eletromagnética / Eletrostática: funcionamento anormal ou falho de componente, sistema ou produto devido a interferência eletromagnética ou eletrostática.

Manufatura / Pós Vendas: processos não têm capacidade para atender especificações de projeto.

15.3.5.3 FMEA de Projeto passo 3: Efeito

Efeito da falha é a consequência ou impacto no produto, serviço ou sistema. Os efeitos de falha podem ser classificados em dois grandes grupos: efeitos principais ou relevantes e efeitos secundários ou não relevantes.

Efeitos Principais são os que levam o produto / serviço à perda de sua função principal e afetam os parâmetros de confiabilidade do produto.

Efeitos Secundários são aqueles que permitem a operação, ainda que degradada de um serviço / produto. Não afetam parâmetros de confiabilidade.

Para uma melhor análise do efeito de um determinado tipo de falha, deve-se evitar o uso de palavras subjetivas como duro, mole, folgado, etc.

Um tipo de falha pode ter vários efeitos possíveis devido à forma com a qual o efeito se propaga. Tendo isto em vista, deve-se descrever sequencialmente estes efeitos, partindo do tipo de falha em potencial do item em análise até o seu efeito sobre o usuário final do produto ou serviço.

Para melhor compreensão e análise crítica do impacto e/ou efeitos de um tipo de falha sobre o produto deve-se fazer um esforço para quantificar estes efeitos, por exemplo perda de 15% da potência, redução da vida útil em 500 horas, intercambiabilidade afetada em 10% das peças, etc.

A análise dos efeitos de um Tipo de falha permite verificar a adequação do projeto.

15.3.5.4 FMEA de Projeto passo 4: Causa

Causa de um tipo de falha é a descrição sucinta das discrepâncias que podem dar origem a um determinado tipo de falha em potencial de um projeto. Para auxiliar na determinação das causas comuns na área de projeto podem-se utilizar ferramentas como a Espinha de Peixe e os M's de Ishikawa.

15.3.5.5 FMEA de Projeto passo 5: Formas de Controle

Neste passo, os responsáveis pela elaboração e verificação do projeto descrevem quais as formas de controle efetivamente aplicadas no desenvolvimento do projeto para evitar as causas dos tipos de falha ou para detectar as causas dos tipos de falha em potencial antes que seja feita a liberação dos documentos do projeto.

As formas de controle de um FMEA podem ser divididas em dois grupos: prevenção e detecção (VTB 1993).

Nas formas de controle por prevenção, relaciona-se todas as ferramentas utilizadas pela área de projeto com objetivo de controlar preventivamente as causas de um tipo de falha. Como exemplo pode-se citar roteiros de cálculos, normas utilizadas e experiências anteriores com projetos similares.

As formas de controle por detecção relacionam todas as atividades que foram desenvolvidas pela área de projeto relacionadas a testes e ensaios realizados com protótipos e pré-produção com o objetivo de detectar todos os tipos de falhas em potencial do projeto de um item, sistema, produto ou serviço antes da liberação final dos documentos do projeto. Como exemplo de formas de controle por detecção pode-se citar crash-tests, peças testadas e aprovadas conforme norma, testes de durabilidade.

Forma de Validação

Forma de validação é a descrição das sistemáticas que foram utilizadas pela empresa para certificar a adequação do projeto de um item às funções previstas para o produto e para as condições de mercado, aquisição de insumos, manufatura e pós-vendas.

Através do conhecimento das formas de controle e de validação utilizadas pela área de projetos e de dados históricos, pode-se estimar a probabilidade de ocorrência de falhas e de sua não detecção.

15.3.5.6 FMEA de Projeto passo 6: Índices

A utilização de índices no FMEA de Projeto tem como objetivo estimar o risco em potencial de um produto ou serviço originado pelo seu projeto e suas especificações. Para se obter este risco em potencial consideram-se os seguintes índices:

Índice de Severidade (Is): estima o impacto de um tipo de falha supostamente ocorrido.

Índice de Ocorrência (Io): estima a probabilidade de ocorrência de determinado tipo de falha.

Índice de Detecção (Id): estima a probabilidade da não detecção de determinado tipo de falha.

Índice de Risco (Ir): é o produto dos três anteriores. Estima o risco em potencial com base em seu impacto, na probabilidade de sua ocorrência e na probabilidade de sua não detecção.

A parametrização dos índices de severidade, ocorrência e detecção varia de acordo com normas, autores e empresas (CREVELING 2003). Duas escalas são as mais utilizadas: de 1 a 5 e de 1 a 10.

Utilizando a escala de 1 a 5 tem-se maior facilidade para predizer os índices de uma falha em potencial, porém perde-se a precisão no Índice de Risco e pode-se ter dificuldades em priorizar ações corretivas com base no índice de risco estimado.

Com a escala de 1 a 10 se ganha precisão, porém é necessário que se tenha uma visão muito clara de o que cada um dos índices realmente significa para a empresa, evitando-se assim interpretações subjetivas.

Índice de Severidade (Is)

O índice de severidade em um FMEA de projeto traduz o impacto dos tipos de falha supostamente ocorridas em um projeto aos processos, sistemas e ao produto e seus reflexos sobre os consumidores e sobre a própria empresa.

A Tabela 15.4 sugere critérios para estimarem-se índices de severidade.

Tabela 15.4 - Índice de severidade - Adaptado de FMEA Manual (DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force).

Grau de Severidade	Função	Is	Crítérios
1	-	1	O efeito é imperceptível, só reconhecido por pessoal especializado
2	Cosmética	2	O efeito é uma perda gradual da função cosmetica.
		3	O efeito é uma perda súbita da função cosmetica.
3	Secundária	4	O efeito é perda gradual da função secundária.
		5	O efeito é perda de função secundária localizada.
		6	O efeito é perda da função secundária com danos a outros itens ou sistemas.
4	Principal	7	O efeito é perda da função principal localizada.
		8	O efeito é perda da função principal com danos a outros itens ou sistemas.
5	Segurança	9	O efeito é perda gradual da função de segurança.
		10	O efeito é perda súbita da função de segurança.

Como a severidade ou o efeito de um tipo de falha está diretamente relacionado com a perda ou degradação das funções principal ou secundária de um produto e estas são definidas por projeto, o índice de severidade só será alterado se houverem alterações no projeto ou reconsiderações no mérito.

Índice de Ocorrência (Io)

O índice de ocorrência aplicado no FMEA de Projeto é um indicador da probabilidade de ocorrência de determinado tipo de falha em um produto, associado a cada uma das causas identificadas e às formas de controle por prevenção utilizadas.

As estimativas das probabilidades de ocorrência podem ser obtidas através de predições / ensaios de confiabilidade realizados com o produto, dados históricos de projetos semelhantes, número de peças substituídas em garantia que apresentaram este tipo de falha.

Para estimar o Io pode-se tomar como base a Tabela 15.5.

Tabela 15.5 - Índice de ocorrência - Adaptado de FMEA Manual (DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force).

Frequência	Io	Crítérios	Possibilidade de Falha
Mínima	1	É mínima a probabilidade de ocorrência. Projetos semelhantes não costumam apresentar esta falha.	< 0.010 por mil itens
Pequena	2	É pequena a probabilidade de ocorrência. Projetos semelhantes costumam apresentar poucas falhas deste tipo.	< 0.1 por mil itens
	3		< 0.5 por mil itens
Média	4	É média a probabilidade de ocorrência. Projetos semelhantes, de maneira geral, apresentaram este tipo de falha.	< 1 por mil itens
	5		< 2 por mil itens
	6		< 5 por mil itens
Alta	7	É alta a probabilidade de ocorrência. Projetos semelhantes sempre apresentam este tipo de falha.	< 10 por mil itens
	8		< 20 por mil itens
Muito Alta	9	É muito alta probabilidade de ocorrência. Projetos semelhantes apresentaram com frequência este tipo de falha.	< 50 por mil itens
	10		> 100 por mil itens

Índice de Detecção (Id)

O índice de detecção num FMEA de projeto é uma estimativa da probabilidade de não reconhecimento de uma falha em potencial de um item, sistema ou produto possa apresentar. Este índice é basicamente influenciado por fatores relacionados com a representatividade dos ensaios e testes e realizados, o número de amostras ensaiadas e testadas e a confiabilidade dos métodos de avaliação.

A Tabela 15.6 mostra um exemplo de critério para o Id.

Tabela 15.6 - Índice de detecção - Adaptado de FMEA Manual (DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force).

Probabilidade	Local de Detecção	Id	Critérios	%
Mínima	Projeto	1	Inspeção Automática - 100%	< 10%
Pequena	Protótipo	2	Inspeção Automática - 100%	< 20%
		3	Inspeção pelo Operador - 100%	< 30%
Média	Pré Produção	4	Inspeção pelo Operador - 100%	< 40%
		5	Inspeção Automática - Amostragem	< 50%
		6	Inspeção Automática - Amostragem	< 60%
Alta	Produção	7	Inspeção pelo Operador - Amostragem	< 70%
		8	Inspeção pelo Operador - Amostragem	< 80%
Muito Alta	Campo	9	Inspeção por Ensaio Sensorial	< 90%
		10	Inspeção ou Ensaio não realizado	< 100%

Índice de Risco

O índice de risco do FMEA de Projeto é produto dos índices de severidade, detecção e ocorrência.

$$I_{risco} = I_{severidade} \times I_{ocorrência} \times I_{detecção}$$

A principal função do índice de risco é identificar no projeto de um produto ou serviço as causas dos tipos de falhas para reduzir sua severidade e melhorar sua detecção. Este índice ainda ajuda a identificar e priorizar as ações corretivas.

Itens críticos ou prioritários para tomada de uma ação são aqueles que apresentam:

- Índice de Risco $I_r > 125$ (5^3)
- Índice isolado de ocorrência, severidade ou detecção maior do que 7.
- Tenham população significativa no produto.
- Empregam tecnologia em desenvolvimento.
- Tenham função diretamente relacionada com a segurança do produto.

15.4 MODELO MATEMÁTICO / FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA

Funções de transferência são um dos elementos centrais do DFSS porque esclarecem as relações entre o projeto, o processo e os materiais com as CTQs (do inglês *Critical to Quality*). Os parâmetros de projeto são otimizados pelo uso da função de transferência para que seja possível prever o desempenho, confiabilidade e o processo de produção do produto final.

15.4.1 A função de transferência

Uma função de transferência (FT) é a relação entre entradas e saídas de um sistema. São representadas por equações e expressas em $Y=f(X)$, onde Y representa a saída e é a variável dependente de X , que representa a entrada do sistema. f é a função propriamente dita que explica como as entradas se transformam em saídas. As FTs são utilizadas para se monitorar um processo ou sistema e saber se está fora de controle. No caso de um produto, a saída Y pode representar a satisfação do cliente ou a força que o sistema exerce, por exemplo.

15.4.2 Funções de transferência no DFSS

Conhecendo a relação $Y=f(X)$ entre entradas e saídas do sistema (produto), o grupo de engenharia é capaz de simular o desempenho do projeto utilizando o mínimo de recursos e sem a necessidade de se construir protótipos. Além disso, FTs possibilitam que o grupo introduza variações nas entradas do modelo e altere características do produto para:

- Encontrar uma combinação de regulagem de fatores que possibilitem que o sistema atinja sua função
- Permanecer insensível à variáveis que não se quer ou não se pode controlar (ruído).

Todo este conhecimento do sistema permite que os engenheiros saibam como realmente seu produto vai operar. A essência da Engenharia Robusta, ferramenta fundamental no DFSS, pode ser aplicada no projeto ao invés de se tentar eliminar ou reduzir as causas para a variação do desempenho do produto depois que este já está pronto.

Este tipo de análise (através da FT) leva os projetistas a tomarem decisões de compromisso entre os fatores (entradas X) do produto com o objetivo de otimizar a performance mas que trazem riscos. A análise destes riscos pode ser feita com o auxílio do FMEA.

15.4.3 DFX (*Design for X*)

Há algum tempo atrás se pensava que a eficiência na fabricação era o pré-requisito para se atingir vantagens no mercado competitivo. Dentro desta linha, o objetivo dos projetistas era minimizar os custos de manufatura e maximizar a qualidade do produto. Recentemente houve uma mudança deste objetivo, passando da manufatura para o produto [BREYFOGLE III 03].

Atualmente acredita-se que companhias que introduzem mais novos produtos, reagindo rapidamente às mudanças de mercado/tecnologia mantendo a qualidade, serão vitoriosas sobre seus competidores. Esta é uma abordagem de engenharia simultânea, que visa facilitar o projeto de novos produtos pois o produto e os processos de fabricação deste são desenvolvidos em paralelo. Estas abordagens ficaram conhecidas como *Design for X*, onde o X é o processo relacionado com o desenvolvimento do produto.

Constantemente durante o ciclo de projeto, o foco é colocado sobre o produto final e não sobre o processo usado para fabricá-lo. Dentro da estratégia proposta pelo DFX, o projeto é continuamente revisto para que se possa aumentar a produção e outros aspectos do processo.

Quando se pensa em diversos aspectos do DFX, o projeto pode ser beneficiado pela redução de diversas etapas e tempo para início da produção [BREYFOGLE III 03]. Pode-se conseguir reduzir o número de peças, aumentar o número de peças comuns. Alguns exemplos de DFX são design para performance, design para ergonomia, design para manufatura, design para confiabilidade, design para montagem. Exemplos da nomenclatura são Design for Manufacturing (DFM) e Design for Assembly (DFA).

15.4.4 Propagação de variância

A propagação de variâncias nas entradas X nos componentes do sistema deve ser levada em consideração para a formulação correta da função de transferência. Para entender a propagação de variâncias de uma entrada X em Y, vamos denotar Y uma característica CTQ do sistema e $\sigma_{x1}^2, \sigma_{x2}^2, \dots, \sigma_{xk}^2$, as variâncias de k variáveis. Com base na expansão em séries de Taylor de segunda ordem, a variância de Y em um determinado X_0 pode ser calculada pela equação 2 (PHADKE 1989):

$$\sigma_y^2 = \sum_i^k \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \Big|_{x_0} \right]^2 \sigma_{xi}^2 \quad (2)$$

A derivada parcial ($\partial y / \partial x_i$) mostra a sensibilidade de Y em relação a cada variável X. A variância total da característica é dependente do quadrado da sensibilidade do sistema para cada parâmetro de entrada X e da variância destes parâmetros.

Conclui-se, portanto, que para reduzir a variância da saída Y deve-se, ou reduzir a sensibilidade do sistema através da Engenharia Robusta, ou reduzir a variância do processo de manufatura de cada parâmetro.

A idéia da propagação de variâncias e sensibilidade do projeto é melhor ilustrada na Figura 15.12.

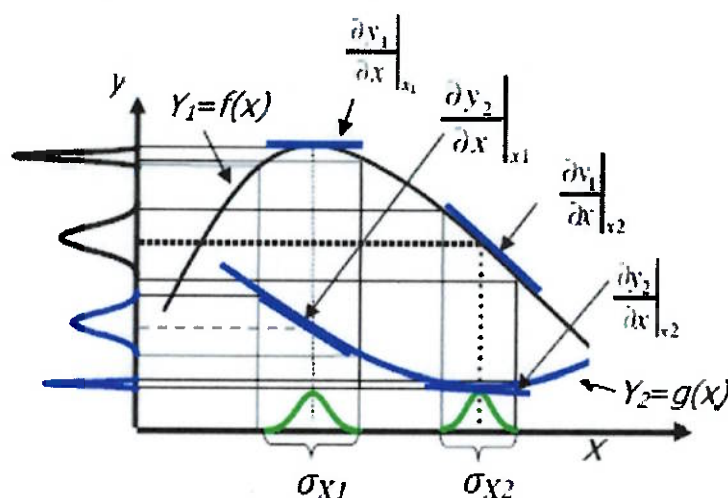


Figura 15.12 - Propagação de variâncias - adaptada de Transfer Function Development in Design for Six Sigma Framework

Avaliando-se a função Y_1 em relação as variáveis X_1 e X_2 , nota-se que a sensibilidade (dada pela derivada parcial) da função em relação à X_1 é menor do que X_2 . Uma variância maior em X_1 provoca variância menor em Y_1 em comparação com uma variância menor em X_2 . Neste caso, a manufatura pode empregar maiores e tolerância e menores custos quando tratar do parâmetro X_1 . Esta é uma das idéias do projeto robusto do DFSS.

As funções de transferência auxiliam o grupo de projetos a identificar e atacar as poucas variáveis de grande importância para o produto final.

16 IDDOV FASE 4: OTIMIZAR

16.1 Projeto de Parâmetros

Esta fase de otimização do projeto tem como objetivo definir os valores nominais de projeto para que este seja pouco afetado pelas variações do meio, ou seja, quer-se ter um projeto robusto.

Para a definição destes parâmetros necessita de alguns experimentos para levantar a influencia que a propagação das variâncias das entradas tem na saída (função do produto). A idéia é a chegar-se num gráfico como o da figura 12.11 acima.

Após identificar-se a influencia das variações, devem-se identificar os seguintes pontos:

- Variações nas entradas que afetam a saída: estas variáveis devem ser ajustadas em níveis que minimizem as variações causadas pelo ruído na variável de resposta.
- Variações que pouco afetam a variação da saída: estas devem ser tratadas de maneira mais econômica.

16.2 Projeto de Tolerâncias: Função Perda de Taguchi

Após ter-se definido os parâmetros, ou seja, os valores nominais, devemos definir as tolerância para cada parâmetro. Nesta etapa um erro comum é definir tolerâncias muito apertadas para cada parâmetro, o que evita problemas de desempenho do produto ou processo, entretanto aumenta consideravelmente o custo.

A definição da tolerância deve estar ligada à perda causada pela variação na saída, ou seja, a variação do parâmetro na função pretendida. Na década de 80 o Dr. Taguchi determinou a chamada função perda, que mostra em termos financeiros, os

efeitos da insatisfação do cliente quando o produto apresenta variações em seu desempenho esperado.

Segundo Taguchi, o cliente fica mais insatisfeito quanto maior a distancia do desempenho em relação ao nominal. A curva da função perda é quadrática, como representado na Figura 16.1.

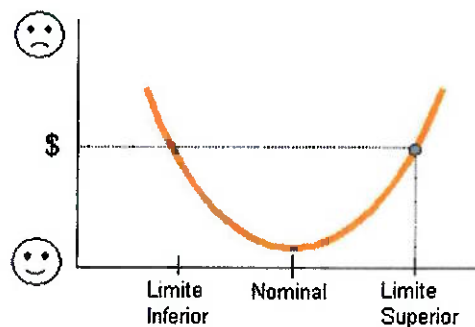


Figura 16.1-Função Perda - elaborada pelo autor

O usual é definir a tolerância do consumidor em relação ao desempenho do produto quando 50% destes estão insatisfeitos. Esta tolerância pode variar de empresa em empresa.

A equação matemática que rege a função de perda utiliza a variância e a média para seleccionar o melhor projeto. A fórmula utilizada é mostrada na eq. 3:

$$L(y) = k[\sigma^2 + (\bar{y} - m)^2] \quad (3)$$

onde:

$$k = A_0 / \Delta^2$$

A_0 : custo de refugo

Δ : distancia da especificação nominal ao limite de tolerância

$L(y)$: função perda do parâmetro y

$\bar{y}$: média do valor de y

m : especificação nominal

O cálculo da perda média permite que o time de projeto considere os benefícios de projetos alternativos com funções perda diferentes. Como visto na figura 13.1., sempre há perda de dinheiro para a empresa quando o produto desvia-se do nominal. Este custo pode se apresentar como custo de garantia ou retrabalho do produto. A figura 13.1 mostra a função perda como simétrica, mas podem haver casos em que isto não acontece.

Da análise da função perda de Taguchi conclui-se que alguns parâmetros têm maior contribuição para a esta. Estes devem ter as tolerâncias mais apertadas.

17 IDDOV FASE 5: VERIFICAR

17.1 CEP

A teoria do Controle Estatístico de Produção (CEP) foi desenvolvida na segunda metade da década de 20 do século passado pelo Dr. Walter A. Shewhart da Bell Telephone Laboratories. Ele analisou muitos processos de produção diferentes e concluiu que todos, sem exceção, apresentam variações.

O Dr. Shewhart identificou dois componentes destas variações: um constante inerente ao processo e um intermitente. Atribuiu à variação inerente, também chamada de *randômica*, o acaso ou causas não descobertas e à variação intermitente como causas *atribuíveis*. Ele concluiu que as variações atribuíveis poderiam ser descobertas e removidas de maneira economicamente viável através de um sistema de diagnose enquanto que as variações randômicas não poderiam ser removidas sem que mudanças no processo fossem introduzidas.

A variância de qualquer característica particular de qualquer processo pode ser determinada extraindo-se algumas amostras da produção e estimando os parâmetros de sua distribuição estatística. Mudanças na distribuição podem ser enxergadas quando se plota em um gráfico estes parâmetros pelo tempo.

No gráfico $\bar{X}$ e R, o tipo mais utilizado, a característica de qualidade X é calculada para cada indivíduo de um subgrupo (um subgrupo deve conter entre 4 e 10 medidas). A média $\bar{X}$ e o range R são calculados para cada subgrupo (deve-se ter no mínimo 50 subgrupos de medidas) e plotados em ordem de produção no gráfico. Uma linha média é desenhada na média geral $\bar{\bar{X}}$. Limites de controle são estabelecidos a partir da média geral, somando-se e subtraindo-se 3 desvios padrões desta. Define-se então o limite superior (UCL) e o inferior (LCL). A Figura 17.1 ilustra uma carta de controle.

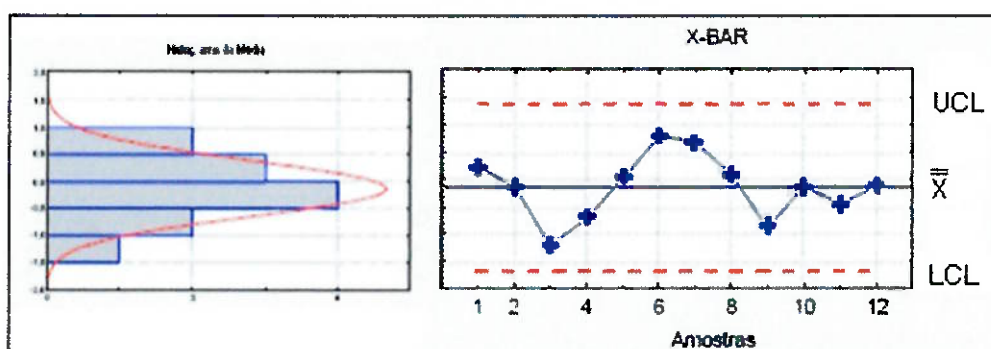


Figura 17.1 - Exemplo de Carta de Controle

A área entre os limites do gráfico contém a variação *randômica*. Pontos fora desta área indicam a existência de uma ou mais causas *atribuíveis*. Um processo que apresenta apenas causas randômicas é tido como sob controle estatístico.

17.1.1 Padrões em CEP

As primeiras pesquisas em cartas de controle foram destinadas à detecção de deslocamentos nas médias de um processo. Entretanto, podem existir muitos outros padrões em que um processo indica situações onde está fora de controle, como por exemplo, quando apresenta variações sistemáticas, ciclos ou misturas. Quando esses padrões ocorrem, a análise da carta de controle torna-se um problema de reconhecimento de padrão, isto é, deve-se ter um reconhecimento e uma identificação da razão desse comportamento (Montgomery, 1991).

Vários praticantes e pesquisadores têm identificado vários tipos de padrões fora de controle e algumas de suas possíveis causas assinaláveis (Western Electric 1958, Nelson 1985). A Figura 17.2 mostra exemplos de tipos de padrões não aleatórios. Uma detalhada descrição pode ser obtida no *Statistical Quality Control Handbook* da Western Electric.

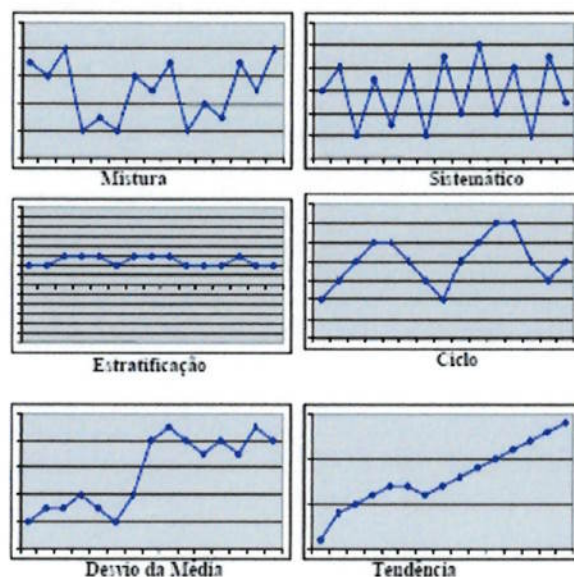


Figura 17.2 - Exemplos de padrões CEP

Os seis padrões não aleatórios mais comuns e suas possíveis causas, que abrangem quase todas as possibilidades de problemas de qualidade em processos de manufatura [BALESTRASSI 2000], são resumidos a seguir:

- **Tendência:** Contínuo movimento em uma direção.
Causas: Fadiga do operador, deterioração de equipamento, desgaste de ferramenta.
- **Desvios da Média:** Abrupta mudança na média de um processo.
Causas: Alteração do *setup* do processo, mudança ou alteração de matéria prima, mudança ou introdução de novos operadores, mudança nos métodos de inspeção.
- **Variações Sistemáticas:** Um ponto baixo é geralmente seguido de um ponto alto.
Causas: Diferença entre deslocamentos, diferença entre conjuntos de teste e diferença entre linhas de produção onde o produto é amostrado por rotação.
- **Ciclos:** Uma série de altos picos intercalados com uma série de baixos picos.
Causas: Periódica rotatividade de operadores, mudanças sistemáticas no meio

ambiente como temperatura ou fadiga do operador, flutuação de voltagem ou pressão ou alguma variação no equipamento de produção.

- **Misturas:** Os pontos tendem a falhar nas proximidades dos picos com uma ausência de flutuações aleatórias nas proximidades dos valores médios. A mistura é uma combinação de dados de diferentes distribuições.

Causas: Diferentes fornecedores, máquinas ou equipamentos.

- **Estratificação:** Os pontos estão aglomerados em torno da média do processo. As observações provêm de duas populações com distribuição de probabilidades distintas.

Causas: Diferentes lotes de materiais misturados na linha, diferença em padrões e equipamentos de medição e/ou pulos e instabilidade freqüentes no controle automático.

Para a identificação dos padrões não aleatórios acima o analista do CEP frequentemente usa um conjunto de regras simples sobre os dados obtidas de um item de controle que se deseja monitorar. A regra mais simples consiste em avaliar se um ponto está além dos limites de controle (usualmente 3 desvios padrões). É bem entendido, contudo, que a maior deficiência dessa regra é que somente o último ponto plotado é usado para se tomar a decisão com respeito ao estado do processo. O critério de 3 desvios é geralmente insuficiente para assinalar a existência de distúrbios em um processo. Tendo isto em vista, propôs-se um conjunto de regras suplementares que são extensivamente aplicadas nas indústrias. O mais conhecido conjunto de regras foi definido e proposto pela Western Electric que se baseia na divisão de uma carta de controle em 3 zonas mostradas na Figura 17.3, sobre as quais os dados são plotados.

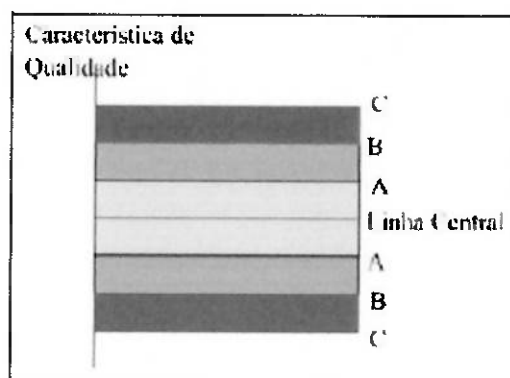


Figura 17.3 - Carta de controle separada em três zonas.

Com base na divisão nas três zonas, definiu-se que um processo está fora de controle estatístico se a distribuição dos dados se encontra na Tabela 17.1 abaixo.

Tabela 17.1 - Regra para determinação de processo fora de controle estatístico.

1	1 ponto além de C.
2	2 de 3 pontos consecutivos em BC ou além.
3	4 de 5 pontos consecutivos em AB ou além.
4	8 pontos consecutivos no mesmo lado da linha central.
5	15 ou mais pontos consecutivos em AA.
6	8 pontos consecutivos sendo que nenhum está em AA.

17.1.2 CEP em Sistemas de Manufatura Automatizados

Em sistemas de manufatura automatizados sensores são frequentemente utilizados para capturar dados em tempo real e deseja-se nesse caso uma resposta da análise também em tempo real. Existem hoje, sofisticadas técnicas de aquisição de dados fornecendo a possibilidade de se obter uma ou mais medidas de diversos itens de controle em praticamente qualquer ponto dos processos de manufatura.

Há basicamente duas categorias de sistemas de aquisição de dados: distribuídos e centralizados. Nos sistemas distribuídos os sensores são conectados próximos dos processos e placas seriais são usadas para transferir as observações para localizações distantes. Nos sistemas centralizados as medidas são transferidas usando placas paralelas com uma maior taxa de amostragem e geralmente situam-se próximos dos processos ou

usam um computador dedicado àquele monitoramento. Em ambos os tipos, podem ainda existir controladores PID (*proportional-integral-differential*), conversores AD (*Analogical-Digital*), capazes de desenvolver uma avalanche de cálculos matemáticos como FFT (*Fast Fourier Transform*) e álgebra matricial.

Por mais que se tenha um elevado grau de automação dos processos, a variabilidade nunca será zero. Dessa forma, o CEP não deve ser tido como método ultrapassado para controle de processo pois seu maior objetivo, apontar se um processo precisa de ajuste ou não, é necessário mesmo com o aumento nos níveis de automação.

As metodologias que lidam com o CEP é que sofrerão profundas modificações no sentido de acompanhar o desenvolvimento da automação. Keats (1989) aponta as principais características para um sistema de CEP em processos de manufatura automatizados como sendo:

- Acurácia: Quão perto o modelo usado para controlar um sistema reproduz o sistema controlado;
- Velocidade: Quão capaz é o modelo em desempenhar a função em tempo real;
- Custo: Quão elevado é o gasto para se conseguir o modelo;
- Eficiência: Quão capaz é o modelo em capturar os aspectos críticos do processo;
- Adaptabilidade: Quão automático é o modelo no sentido de se adaptar às mudanças do processo.

18 ESTUDO DE CASO

Após ter sido feito um estudo do método DFSS e algumas de suas principais ferramentas, decidiu-se fazer aqui um breve estudo de caso de um projeto de engenharia que empregou a teoria deste trabalho. O projeto apresentado a seguir não utilizou-se de todas as ferramentas citadas neste estudo porque não envolveu a fabricação do produto final, apenas estabeleceu critérios de projeto para o sistema que vêm de encontro com as necessidades dos clientes.

Pedal de Acelerador Eletrônico

O pedal analisado neste caso exemplo é componente de um sistema eletrônico de aceleração, ou ETC (Electronic Throttle Control). No mercado nacional, o sistema eletrônico de aceleração ainda é novidade mas suas principais qualidades são segurança, conforto e otimização do consumo de combustível [Hella].

O trabalho considerou carros com transmissão automática e mecânica. Alguns veículos dotados de transmissão automática podem estar equipados com um sistema que reduz uma marcha quando o pedal é pressionado com variação rápida de velocidade, o chamado *kick-down*. Este atributo é bastante útil quando se deseja fazer uma ultrapassagem, por exemplo.

A Figura 18.1 mostra os componentes do pedal de acelerador de um veículo da General Motors. Foram apenas indicados pela legenda os itens de interesse para o estudo.

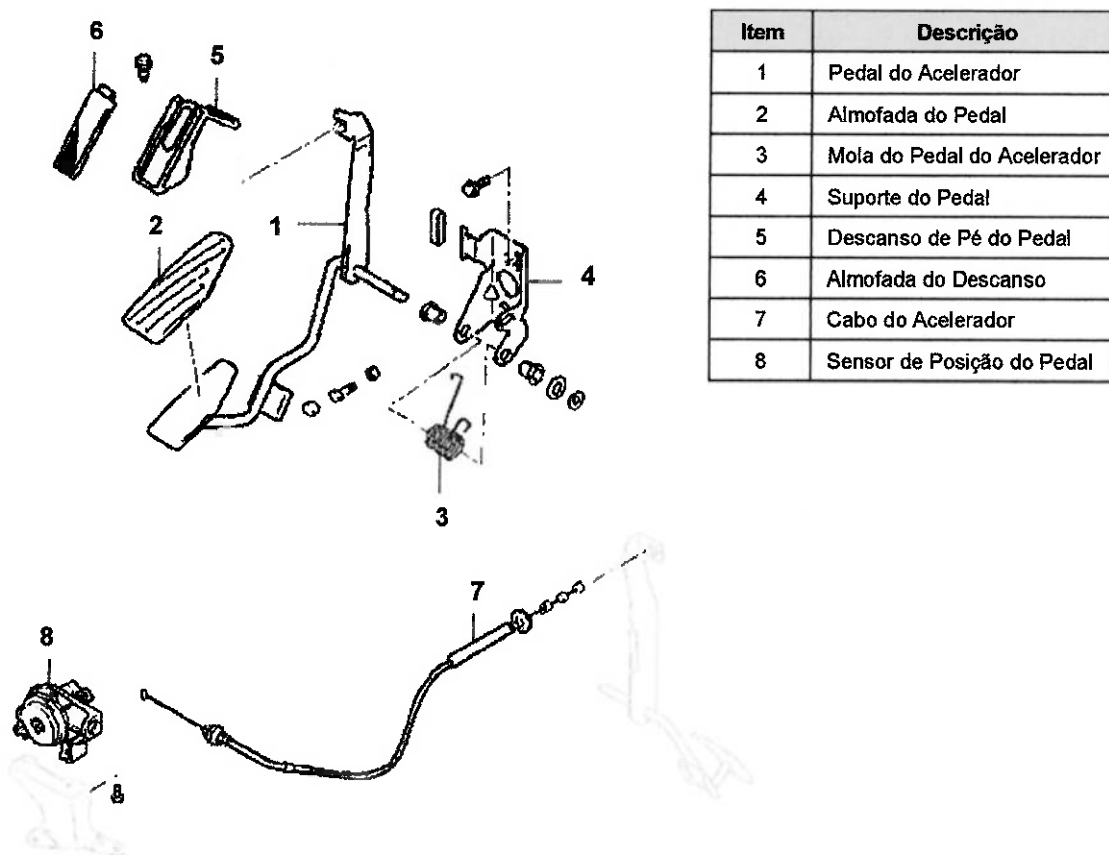


Figura 18.1 - Pedal de acelerador – adaptada do catálogo de peças Chevrolet

18.1 IDDOV – FASE 1: IDENTIFICAR

O pedal do acelerador não é um produto em si, mas um componente do sistema de *powertrain* que por sua vez é um subsistema do produto automóvel. É, porém, de fundamental importância na avaliação do cliente por ser uma das interfaces deste com o automóvel.

A Figura 18.2 ilustra como a General Motors está colocada na categoria de veículos pequenos de passeio. Os dados são referentes aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2005.

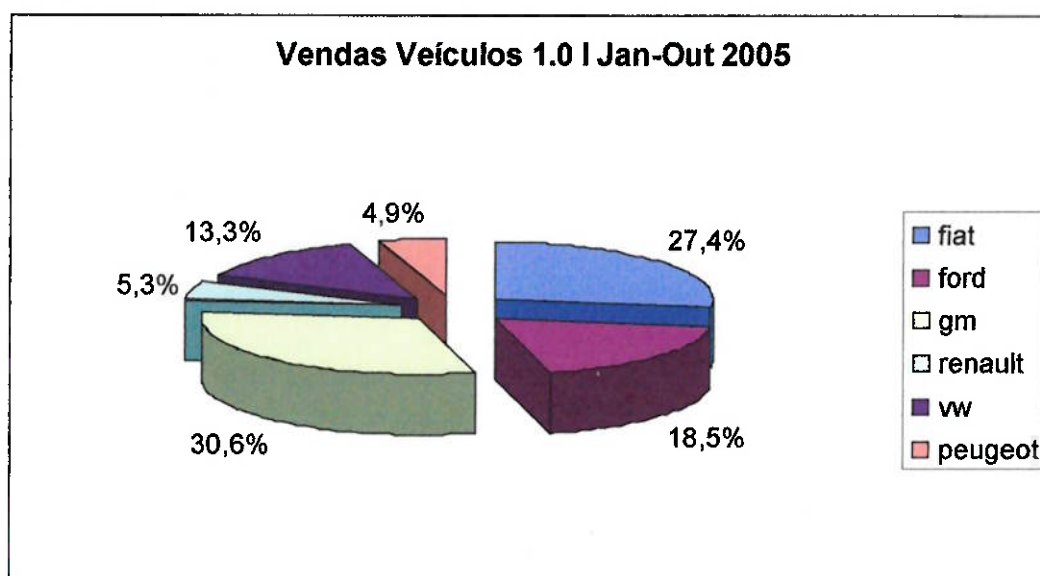


Figura 18.2 - Veículos de passeio vendidos entre janeiro a outubro de 2005- fonte: Anfavea

Do gráfico acima nota-se que a empresa está na liderança de mercado no segmento, porém por uma pequena diferença em relação à Fiat. O bom projeto do pedal de acelerador tem como o objetivo principal a melhoria da impressão do cliente em relação ao produto, levando a GM a um ganho de mercado (aumento de market share). O caso aqui estudado tem como objetivo definir e especificar quantitativamente o que é um bom pedal de acelerador. Para isto foram feitas pesquisas junto aos clientes e avaliações da engenharia de carros tidos como os com melhores sistemas de aceleração do mercado norte-americano.

18.2 Project Plan

Como já discutido, o projeto em questão não passou por todas as etapas de um DFSS. O planejamento das atividades completadas durante seu desenvolvimento estão resumidas na Tabela 18.1.

Tabela 18.1-Project Plan

CTQ Flowdown	
1	Identificar Oportunidade/Problema
2	Identificar necessidades do Cliente (Q)
3	Traduzir as necessidades do Cliente para requisitos de engenharia
Previsão da Qualidade	
1	Estipular desempenho e níveis de qualidade para cada CTQ
2	Gerar e justificar função de transferencia/modelo
3	Executar testes com modelos para determinar valores nominais para os parâmetros e fazer análise das tolerâncias
Otimização do Projeto	
1	Avaliar se o projeto proposto atinge as metas de qualidade
2	Comunicar quais os parametros criticos do projeto para Manufatura e fornecedores

18.3 IDDOV - FASE 2: DEFINIR

18.3.1 VOC

O DFSS precisa que sejam bem definidas as expectativas do cliente para o pedal de acelerador e o sistema de aceleração (throttle). Para coletar a voz do cliente, utilizou-se uma avaliação semelhante a que se encontra neste trabalho. Esta avaliação foca especificamente na sensação ao acionar o pedal, ou seja, na força, histerese e deslocamento. Foram disponibilizados veículos de diversos fabricantes e com diferentes características de pedal e aceleração para serem avaliados em dois ou três dias. Os avaliadores receberam instruções para fazerem as manobras listadas abaixo durante o período de avaliação.

- Estacionamento:
 - Verificar a resposta do veículo em quando acelerado do repouso
- Rodovias:
 - Manter velocidades constantes de 70 km/h e 100 km/h
 - Realizar manobras de ultrapassagem
- Cidade ou tráfico:
 - Manter velocidades constantes de 40 km/h
 - Verificar o controle do veículo durante parada/aceleração
- Estradas de terra:
 - Manter velocidade constante
- Viagens de 2 horas sem paradas:
 - Fadiga do motorista
 - 160 km sem paradas

Depois de acabado o período de avaliação, o cliente deve completar um formulário, dando notas de 1 a 5. Algumas perguntas deste estão listadas abaixo:

- Durante direção por tempo prolongado o motorista teve dores ou fadiga em seus pés ou pernas?
A resposta deveria ser 1 para nenhuma dor/fadiga e 5 para dores extremas.
- Avalie o esforço no pedal (Força):
1 indicando esforço leve e 5 indicando esforço excessivo.
- Avalie a habilidade do motorista para manter o veículo sob controle em estradas de terra:
1 para nenhuma habilidade e 5 para habilidade excessiva.
- Avalie a capacidade do veículo de manter-se em velocidades constantes de 40, 70 e 100 km/h:
1 para fácil e 5 para difícil

O documento continha 15 perguntas semelhantes às acima mencionadas e era simples e fácil de ser respondido e avaliado pelo grupo de projeto.

18.3.2 CTQs no projeto do pedal de acelerador

Depois de realizadas as pesquisas, os encarregados do projeto concluíram que os consumidores gostariam de comprar um veículo que apresentasse um pedal de acelerador que:

- Seja fácil /confortável para acelerar;
- Confortável em casos de direção prolongada, como em longas viagens;
- Permita fácil controle da velocidade do veículo em diferentes condições de pista e velocidade;
- Fácil de se manter a velocidade constante.

Estes parâmetros são passados para requisitos do sistema através do uso do QFD. Os resultados são mostrados na Tabela 18.2 abaixo. A matriz do QFD é mostrada na Figura 18.3

Tabela 18.2 - Resultados da Voz do Consumidor (VOC)

VOC	CTQs do Sistema
Fácil/Confortável para acelerar	Deslocamento do pedal
	Força no pedal
	Ganho do sistema
Confortável em uso prolongado	Força no pedal
	Deslocamento do pedal
Fácil de controlar em diferentes velocidades	Histerese
	Força no pedal
Fácil de manter velocidade	Histerese
	Ganho do sistema
	Deslocamento do pedal
	Força no pedal

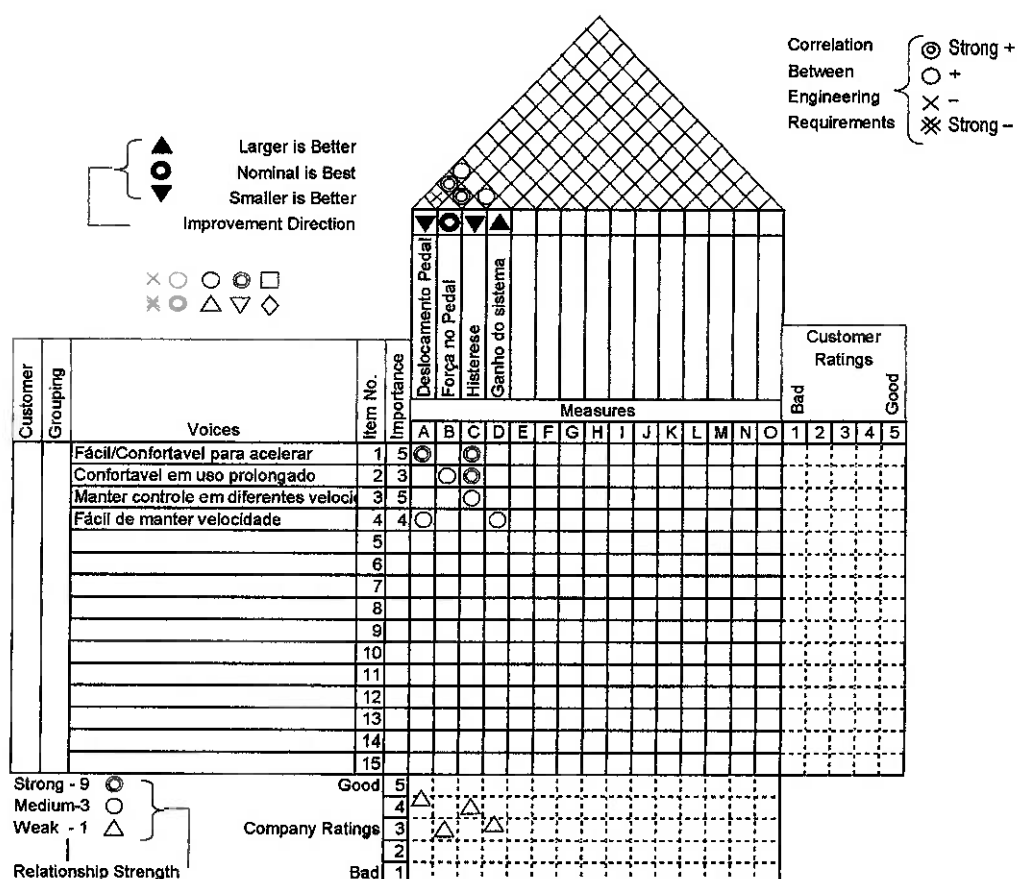


Figura 18.3 - Primeira matriz do QFD

A maior parte dos parâmetros escolhidos leva aos requisitos de curso do pedal, de força aplicada e de histerese. O CTQ escolhido neste projeto foi a histerese do pedal, porque está relacionada com os outros dois parâmetros: é a relação entre a força que se aplica neste e o quanto ele se desloca, assim como a força que a mola aplica quando tira-se o pé do pedal, no sentido de trazê-lo de volta para a posição inicial. O diagrama de CTQs que levou à escolha da histerese como foco do projeto pode ser visto na Figura 18.4

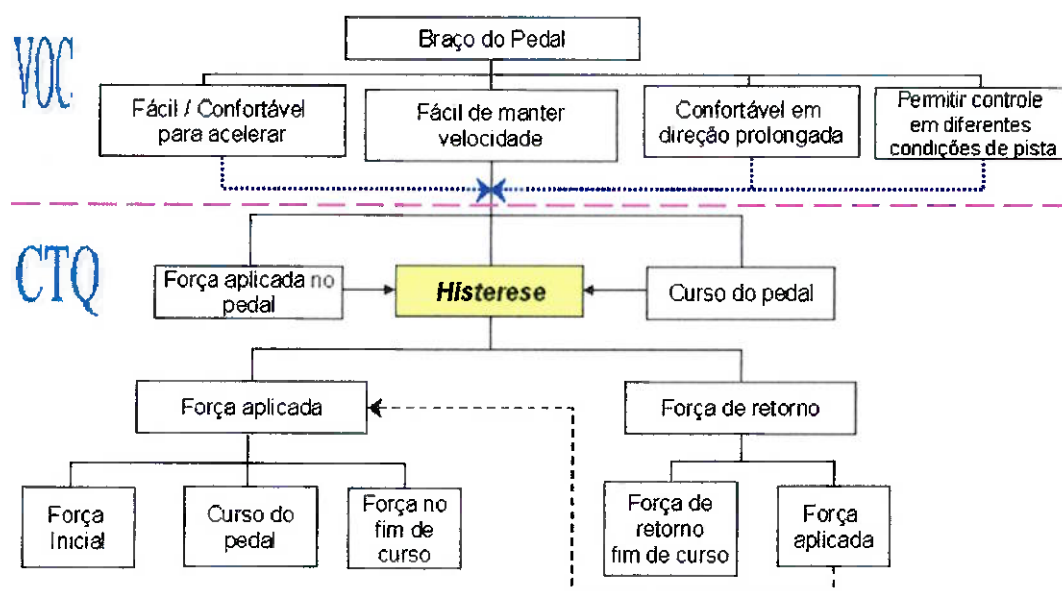


Figura 18.4 - Diagrama de CTQs – adaptado intranet GM.

Neste diagrama estão listadas as quatro necessidades para o pedal de acordo com os clientes. Estas, por sua vez, estão relacionadas com a força aplicada no pedal, a histerese e o curso do pedal, de acordo com parâmetros de engenharia. Como a histerese é a relação entre deslocamento e força, optou-se por atacar esta propriedade.

18.4 IDDOV – FASE 3: DESENVOLVER

18.4.1 FMEA de Projeto para Pedal de Acelerador

Nesta altura do projeto desenvolveu-se um FMEA envolvendo o pedal de acelerador, sua fixação no veículo, o sistema de molas, a parte elétrica que traduz o deslocamento do pedal em aceleração e os sensores envolvidos. Por motivos de confidencialidade, não se mostrará o FMEA completo do subsistema. Um exemplo da metodologia usada para preencher a ferramenta está descrito abaixo para a mola de retorno do pedal.

Passo 1: Funções e Características

- Qual a *função* da mola no sistema de aceleração do veículo?
- Retornar o mecanismo acionador.
- Quais as *características* ou os requisitos de qualidade/confiabilidade esperados para este item?
- Suavidade e vida média esperada de 1.000.000 de ciclos.

Função da mola: *Retornar o mecanismo acionador suavemente por 1.000.000 de ciclos.*

Passos 2 e 3: Tipo de Falha e Efeito

- Item: Mola de retorno do pedal de acelerador.
- Função do Item no Sistema / Produto: Retornar o mecanismo acionador suavemente por 1.000.000 de ciclos.
- Tipo de falha em potencial do Item: Quebra.
- Efeito sobre o sistema: Veículo permanece acelerado.
- Efeito sobre Produto: Perda de controle do veículo.
- Efeito sobre o usuário final: Acidente e/ou danos físicos.

Parte do FMEA está mostrado na Figura 18.6, Figura 18.8, Figura 18.7 e Figura 18.8 abaixo.

Line No	Item / Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	Caus	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	Q C C	Current Design Controls	D E T	R P N	Recommended Action (s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results			
													Actions Taken	New SEV	New QCC	New RPN
1	A - B 1a: Pedal Arm -- Housing is designed to generate a defined force feedback during pedal actuation.	Generated force is smaller than specified values	Low pedal force feedback to drivers foot - customer dissatisfied (3)	3		Crack of the plastic housing (2)	2	P: Proven Carryover design (1); P: FEA calculation (3); D: Vehicle durability test (5); D: Force test: Hella Test 5.5 (5); D: Hella durability Test 5.5 (5)	1	6	None			3		0
2	A - B 1b: Pedal Arm -- Housing is designed to generate a defined force feedback during pedal actuation.	Generated force is larger than specified values	High pedal force feedback to drivers foot - customer dissatisfied (3)	3		High friction due to debris affecting bearing surfaces from incomplete gaskets (1)	1	P: Proven Carryover design (1); P: Designed with gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal: Hella test 4.5 (1); D: Hella durability Test 5.5 (5)	1	3	None			3		0
3	A - B 2: Pedal Arm -- Housing is designed to generate a defined force hysteresis.	Generated force hysteresis is too small	Driver foot fatigue - customer dissatisfied (5)	5		High friction at bearings due to temperature affect the mating bearing surfaces. No additional force translated to friction element (1).	1	P: Proven Carryover design with PA6 material chosen for required pad offset (1); D: Vehicle durability test (5); D: Force test: Hella Test 5.5 (5); D: Hella durability Test 5.5 (5)	1	5	None			5		0
4	A - B 5: Pedal Arm -- Housing is designed to avoid a lag from pedal return to idle.	Returnability per FMVSS 124 not guaranteed	No return to idle (10)	10		High friction at bearings due to temperature and humidity affect the mating parts after rotating (1)	1	P: Designed with gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal: Hella test 4.5 (1); D: Hella durability Test 5.5 (5)	2	20	None			10		0
5	A - B 11: Pedal Arm -- Housing is designed to guarantee silent operation.	Unacceptable actuating noises	Exceeds noise specifications (3) Customer dissatisfied (3)	3		High friction due to debris affecting bearing surfaces from incomplete gaskets (1)	1	P: Designed with gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal: Hella test 4.5 (1); D: Hella durability Test 5.5 (5)	2	10	None			5		0

Figura 18.5-Fragmento DFMEA Pedal de Acelerador-Fonte: HELLA AG

ID	Item / Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	O C C	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	O C C	Current Design Controls	D E T	R P N	Recommended Action(s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results			
													Actions Taken	New SEV	New OCC	New RPN
6	A-C 1: Pedal Arm - Housing Cover is designed to generate a defined force feedback during pedal actuation.	Generated force is larger than specified values	High pedal force feedback to drivers foot - customer dissatisfied (3)	3	1	High friction due to debris affecting bearing surfaces from incomplete gaskets (1)	1	P: Proven Carryover design (1); P: Designed with gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal - Hella test 4.5.1.5;	1	5	None			2		0
7	A-C 2: Pedal Arm - Housing Cover is designed to generate a defined force hysteresis.	Generated force hysteresis is too small	Driver foot fatigue - customer dissatisfied (5)	5	1	High friction at bearings due to temperature effect on mating parts. In addition, force translated to piston element (1)	1	P: Proven Carryover design (1); D: Vehicle durability test (5); D: Force test Hella Test 5.5 (5); D: Hella durability Test 5.6.1 (7)	1	5	None			5		0
8	A-C 5: Pedal Arm - Housing Cover is designed to avoid a lag from pedal return to idle	Returnability per FMVSS 124 not guaranteed	No return to idle (10)	10	1	High friction at bearings due to temperature and humidity affect the mating parts from rotating (1)	1	P: Proven Carryover design (1); P: Designed with gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal - Hella test 4.5.1.5;	1	10	None			10		0
9	A-C 11: Pedal Arm - Housing Cover is designed to guarantee silent operation.	Unacceptable actuating noises	Exceeds noise specifications (5) Customer dissatisfied (5)	5	1	High friction due to debris affecting bearing surfaces from incomplete gaskets (1); incorrect material selection (1)	1	P: Designed with santoprene gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal - Hella test 4.5.1.5;	2	10	None			5		0
10	A-E2: Pedal Arm - Spring Carrier is designed to generate a defined force hysteresis.	Generated force hysteresis is too small	Driver foot fatigue - customer dissatisfied (5)	5	1	Low hysteresis due to debris affecting the pedal force transfer ramp surface to the spring carrier from incomplete gaskets (1)	1	P: Designed with gasket variations in mind (2); D: Leakage test for proper seal - Hella test 4.5.1.5;	2	10	None			5		0

Figura 18.6-Fragmento FMEA Pedal de Acelerador-Fonte: HELLA AG

Seq No	Item / Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	Class	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	O C C	Current Design Controls	D E T	R P N	Recommended Action (s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results			
													Actions Taken	New SEV	New OCC	New RPN
11	A-E11: Pedal Arm - Spring Carrier is designed to guarantee silent operation	Unacceptable actuating forces	Exceeds noise specifications (5) Customer dissatisfied (5)	5		High friction due to debris affecting transfer ramp surface from incorrect material selection and incomplete gaskets (1)	1	P: Proven Carryover design (1); P: Material choice considered for debris resistance (2); P: Tolerance stack-up calculation (3); D: Service life test over temperature: He a test 5.6 (5); D: Heia durability test	1	5	None					
12	A-F2: Pedal Arm - Friction Element is designed to generate a defined force hysteresis.	Generated force hysteresis is too small	Driver foot fatigue - customer dissatisfied (5)	5		Low hysteresis due to debris affecting the movement of the Friction Element from the housing (1)	1	P: Proven Carryover design (1); P: Material choice considered for debris resistance (2); P: Tolerance stack-up calculation (2); D: Service life test over temperature: He a test 5.6 (5); D: Heia durability test	1	5	None					
13	A-J7: Pedal Arm - Brush Carrier is designed to translate pedal position into equivalent electrical information	Output signal is different pedal position	Engine speed decreases or increases without driver intention (10)	10		Pedal Arm breaks Brushes do not achieve final position (3); Brush Carrier breaks and does not reach required position (3); Brush Carrier falls off and does not reach required position (3)	3	P: Material choice considered for required strength (2); P: Strength calculation (2); D: Force test: He a test 5.6 (5); D: Service life test over temperature: He a test 5.6 (5); D: Heia durability test	2	60	None			10		0
14	A-J8: Pedal Arm - Brush Carrier is designed to reach full travel electrical position.	Full electrical output signals prematurely	Unwanted downshift of the automatic transmission Customer dissatisfied (5)	5		Fit of the brush carrier is not keyed to pedal arm due to problem radial or axial play with the pedal arm (3)	3	P: Calculation of tolerances (2); D: Heia assembly trials (5); D: Service life test over temperature: He a test 5.6 (5); D: Electrical function tests: Heia test 3.1	2	45	None				5	0

Figura 18.7-Fragmento DFMEA Pedal da Acelerador-Fonte: HELLA AG

Line No	Item / Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	Class	Potential Cause(s) / Mechanisms of Failure	O C C	Current Design Controls	D E T	R P N	Recommended Action (s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results			
													Actions Taken	New SEV	New OCC	New RPN
15	A-412: Pedal Arm -- Vehicle Carpeting is designed to provide proper clearance to surrounding components	Short pedal travel	Unable to reach Wide Open Throttle Customer Dissatisfied (5)	5		Interference of pedal arm to the carpeting	1	P: Pad location designed to GM requirements; 2) D: Customer release (5); D: Vehicle durability testing (5); D: Hella measurements (5)	2	15	None			5		0
16	A-P12: Pedal Arm -- Brake Pedal Pad is designed to provide proper clearance to surrounding components	Driver's foot hits brake pad and accelerator pad simultaneously	Unintended Acceleration during braking operation Safety (10)	10		Below minimum required lateral separation from Brake Pad to Accelerator Pad (1)	1	P: Pad location designed to GM requirements; 2) D: Customer release (5); D: Vehicle dynamic offset test (5); D: Hella measurements (5)	2	20	None			10		0
17	A-R3: Pedal Arm - Driver Shoe is designed to ensure a comfortable operational feeling	Low or high adherence of the shoe on the pedal pad	Actuation of pedal difficult (5)	5		Pad profile design incorrect for foot location and rotation (1); Pad texture depth is either too deep or too shallow (1)	1	P: Pad profile designed to GM requirements; 2) P: Pad texture to GM requirements; 2) D: Customer release (5); D: Vehicle durability test (5)	2	10	None			5		0
18	A-R12: Pedal Arm -- Driver Shoe is designed to provide proper clearance to surrounding components	Interference of Pedal Pad Arm with shoe during brake apply operation	Unintended Acceleration during braking operation Safety (10)	10		Insufficient clearance of accelerator pedal arm to extreme brake apply shoe placement (1)	1	P: Pad location designed to GM requirements; 2) D: Customer release (5); D: Vehicle dynamic offset test (5); D: Hella measurements (5)	2	20	None			10		0
19	B-C5: Housing -- Housing Cover is designed to avoid a lag from the pedal return to idle	Returnability per FMVSS-124 not guaranteed	No return to idle (1)	10		High friction at bearings due to temperature and humidity of the Housing and Housing Cover bearings not being coated affect the mating parts from rotating (1)	1	P: Designed with gasket variations in mind; 2) C: Leakage test for proper seal; 3) test 4 5 * 5	2	20	None			10		0

Figura 18.8-Fragmento do FMEA Pedal do Acelerador-Fonte: HELLA AG.

18.4.2 Diagrama de Interação

Nesta altura é importante definir os diagramas de interação, utilizados para melhor visualização das dependências entre os tipos, causas e efeitos das falhas nos diversos itens de um produto ou sistema. O diagrama é mostrado na Figura 18.9.

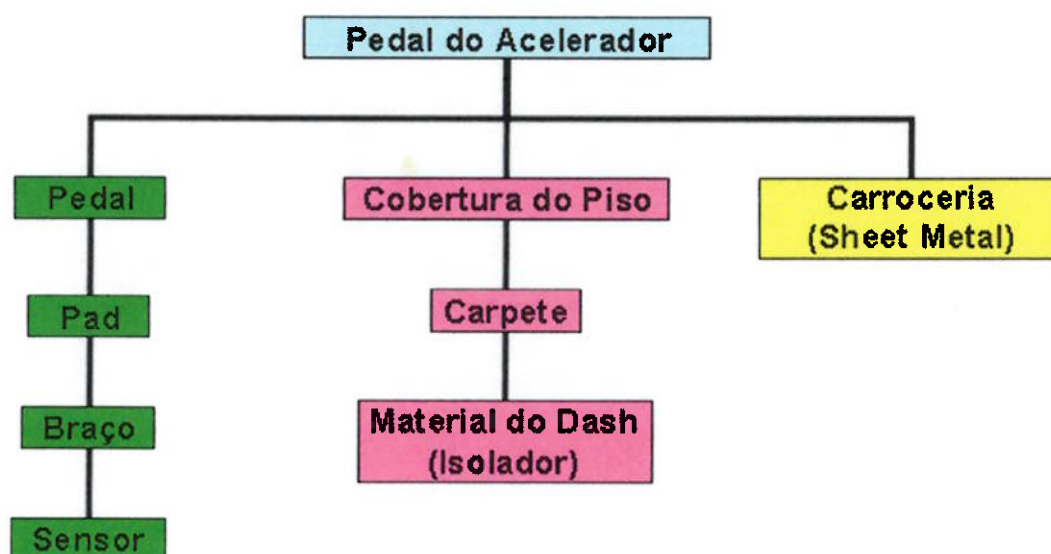


Figura 18.9 - Diagrama de interação do pedal de acelerador

18.4.3 Função de Transferência

A abordagem de projeto nesta etapa se baseou em pesquisas com clientes:

- Utilização de técnicas de regressão para achar as relações entre a voz do cliente e requisitos de projeto;
- Comparação dos resultados com dados dos concorrentes;
- Avaliação da norma interna da companhia, aqui chamada de GMX, que especifica os requisitos do até então tido como “bom projeto” para pedal de acelerador.

18.4.4 Avaliação dos parâmetros críticos à qualidade (CTQ) pelos clientes

O grupo de projeto preparou veículos com diferentes calibrações de mola de retorno que foram avaliados por dez voluntários não engenheiros durante dois dias. Os resultados estão mostrados nos gráficos abaixo. Através da avaliação dos voluntários foi possível, através de métodos de regressão, traçar curvas que refletem as variações dos requisitos CTQs em relação à impressão que causam no cliente.

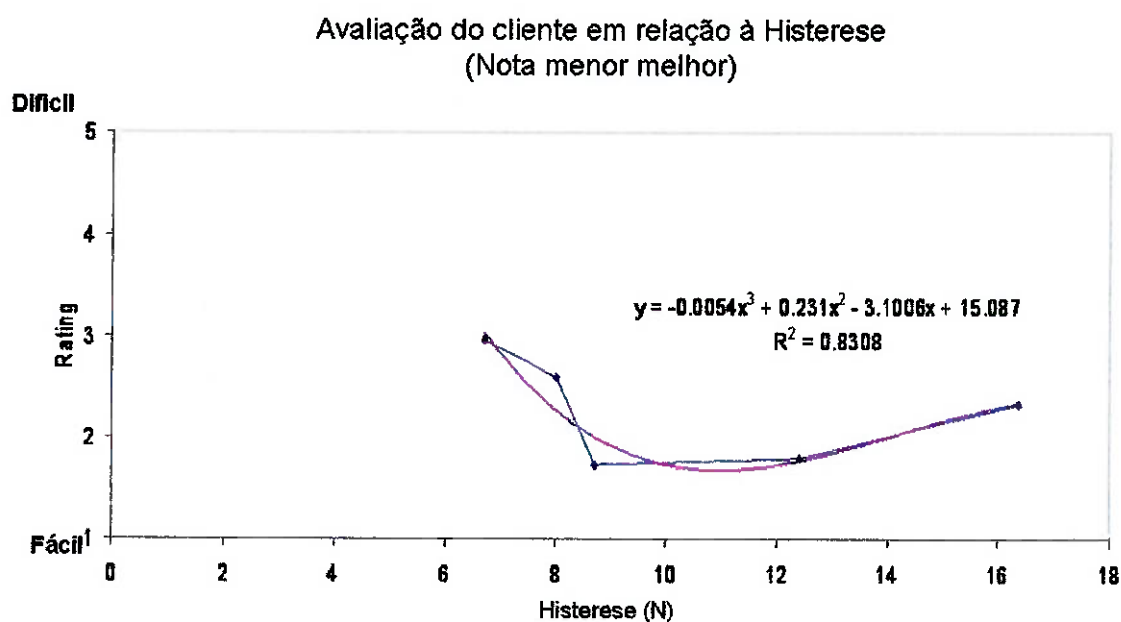


Gráfico 18.1-Avaliação do cliente para a força de histerese-adaptada pela Intranet GM

Avaliação do cliente em relação a Força Inicial
(Nota média melhor)

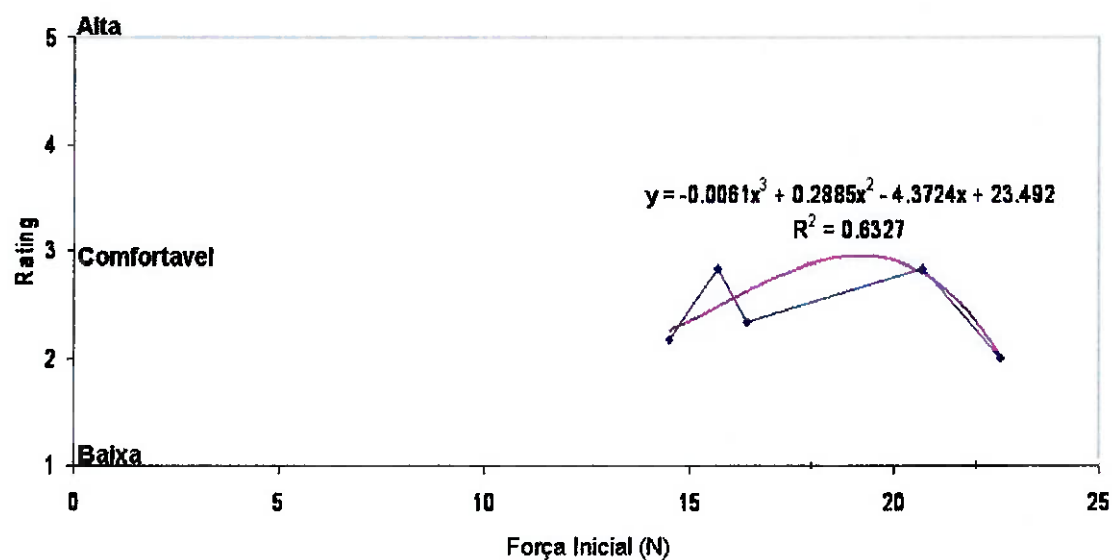


Gráfico 18.2-Avaliação do cliente para força inicial-adaptado Intranet GM

Avaliação do cliente em relação a Força de Hard Stop
(Nota menor melhor)

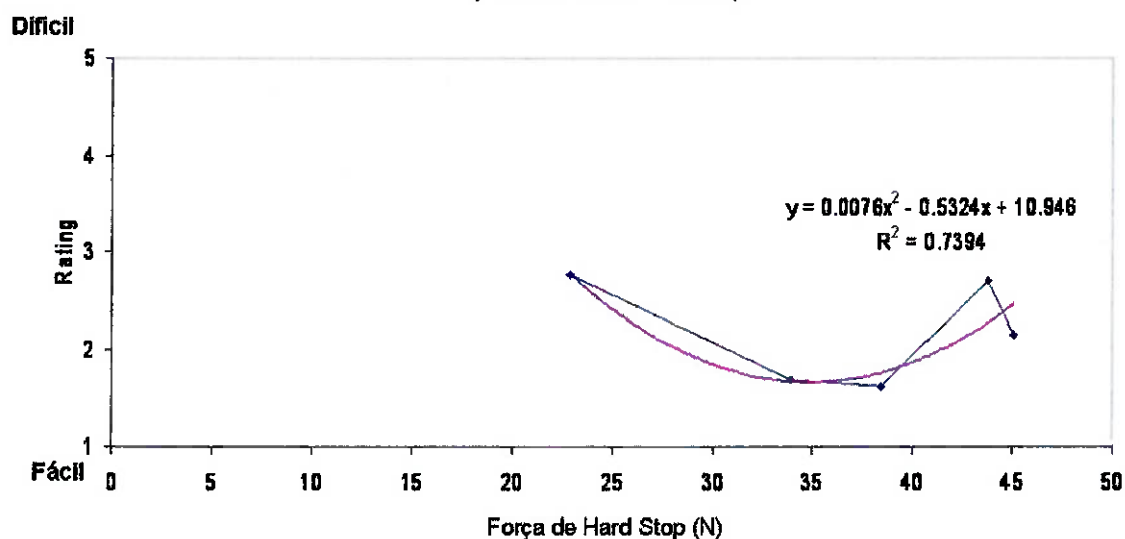


Gráfico 18.3-Avaliação do cliente para força de fim de curso-adaptado Intranet GM

Avaliação do cliente em relação ao deslocamento para Hard Stop
(Nota menor melhor)

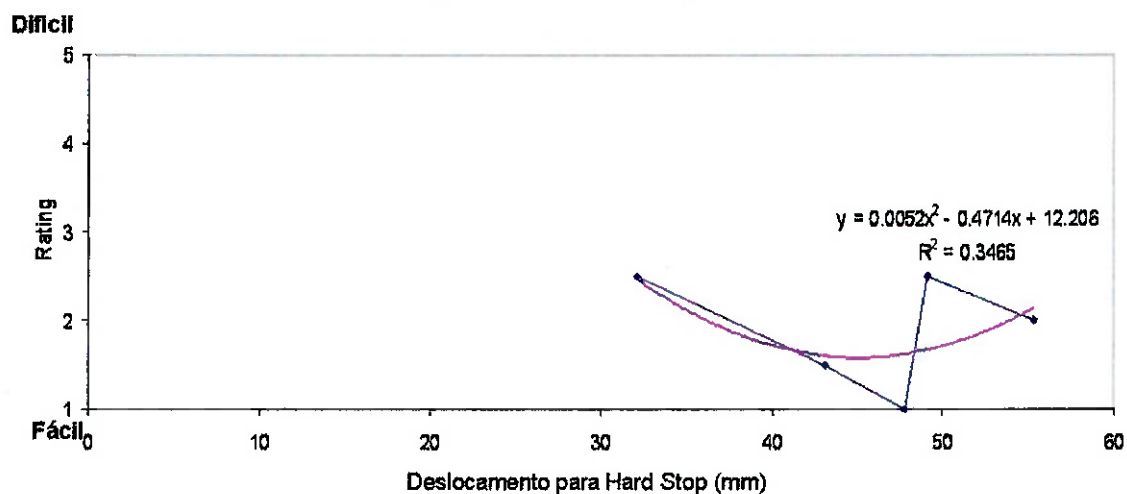


Gráfico 18.4-Avaliação do cliente para deslocamento até fim de curso-adaptado Intranet GM

Os dados coletados foram aproximados por curvas com o formato da Função Perda de Taguchi (Cap.15.2). Através destas equações de curva, utilizou-se a abordagem da função de transferencia e da engenharia robusta para avaliar o que acontece com a aceitação do produto se suas especificações sofrem alterações para fora do nominal.

18.4.5 Comparação do parâmetro Histerese com a concorrência

Após ter-se analisado os quatro parâmetros CTQ, o grupo focou o parâmetro histerese da força aplicada no pedal para acelerar o carro e a força com a qual a mola de retorno traz o pedal de volta para sua posição inicial. Nos gráficos abaixo, a histerese é dada pela distancia entre as curvas de Força vs. Deslocamento, como ilustrado no Gráfico 18.5.

A função perda de Taguchi já foi avaliada para o parâmetro em questão nos testes mostrados no item anterior. Nesta etapa, o grupo de projeto comparou a histerese do pedal de determinado veículo da GM com o de outras montadoras.

A pontuação J.D. Power referenciada em todos os gráficos é a avaliação de uma empresa norte americana chamada *J.D. Power and Associates* que classifica diversos produtos de várias indústrias, de acordo com criticas e pesquisas realizadas diretamente junto aos clientes. Neste trabalho, quanto menor o valor da pontuação, melhor.

O Gráfico 18.5 abaixo mostra a curva levantada para o veículo da Toyota.

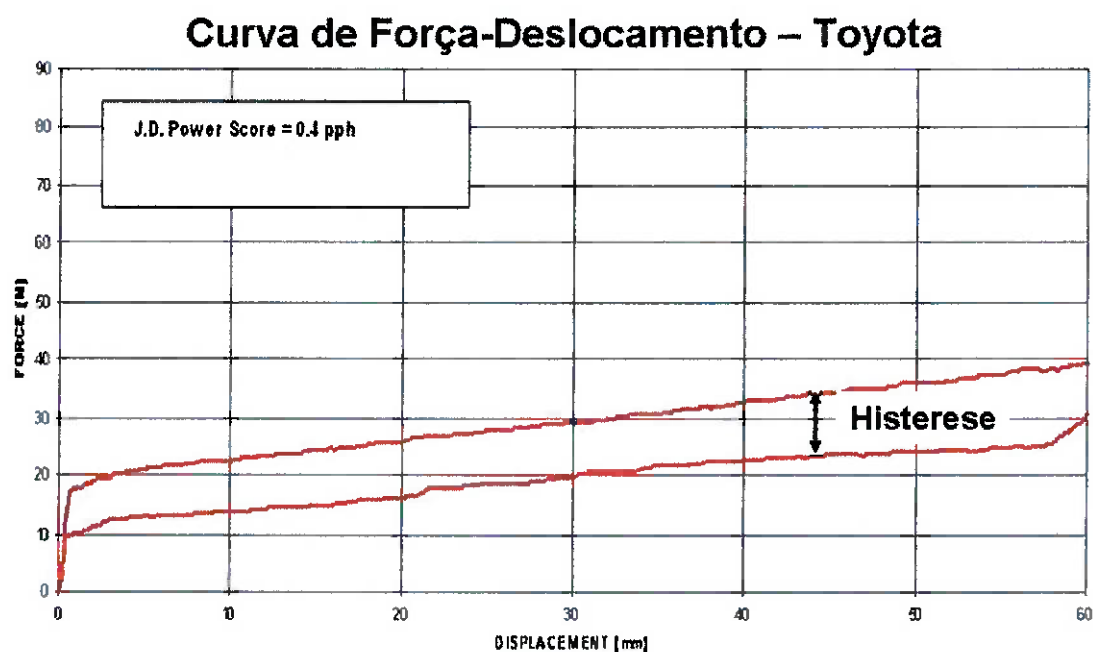


Gráfico 18.5- Força vs. deslocamento Toyota

Tido como o que apresenta as melhores características, o gráfico da Toyota foi comparado com o gráfico dos valores da norma GMX que recomenda os valores de parâmetros de projeto de um pedal de acelerador. As três curvas da norma representam o valor proposto nominal e as tolerâncias.

Percebe-se que a norma está próxima dos valores medidos no carro da montadora japonesa, mas existem diferenças na parte inicial das curvas. Nota-se também que o pedal japonês não tem o *kick-down*, enquanto que a norma GMX prevê este acessório. O Gráfico 18.6 mostra os resultados.

A comparação entre a Toyota e a GMX é apenas qualitativa, pois até o término deste estudo a pontuação J.D. Power Score ainda não havia sido dada à pedais com especificações da GMX.

Curva de Força-Deslocamento – Toyota vs. GMX

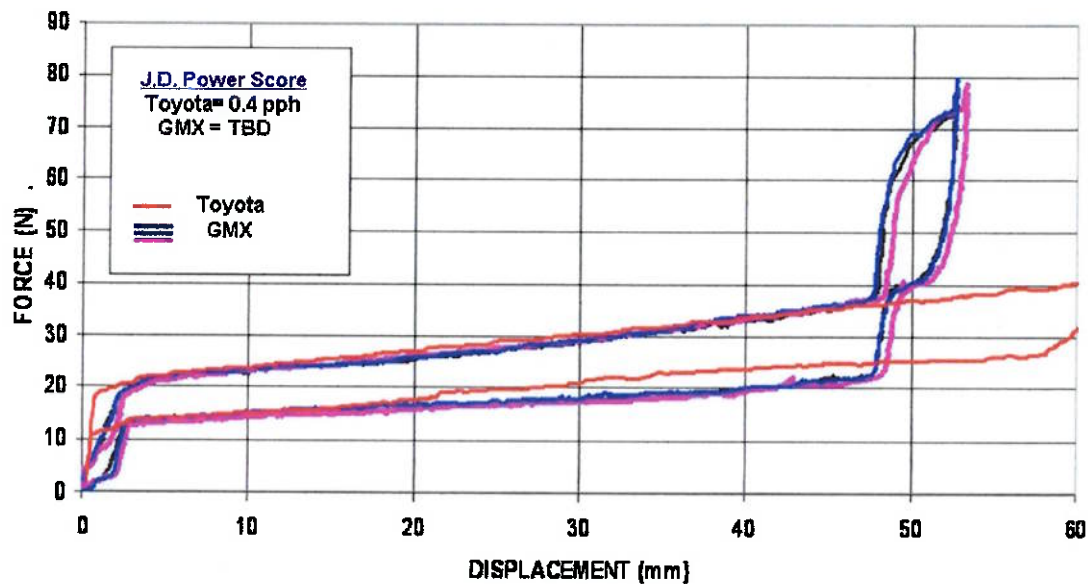


Gráfico 18.6-Força vs. deslocamento Toyota-GMX

Foi feita também comparação do veículo da Toyota com o veículo Volkswagen, mostrada no Gráfico 18.7. A área que mostra um salto na força de acionamento do pedal corresponde ao *kick-down*. O veículo da Toyota apresenta uma pontuação melhor.

Curva de Força-Deslocamento – Toyota vs. VW

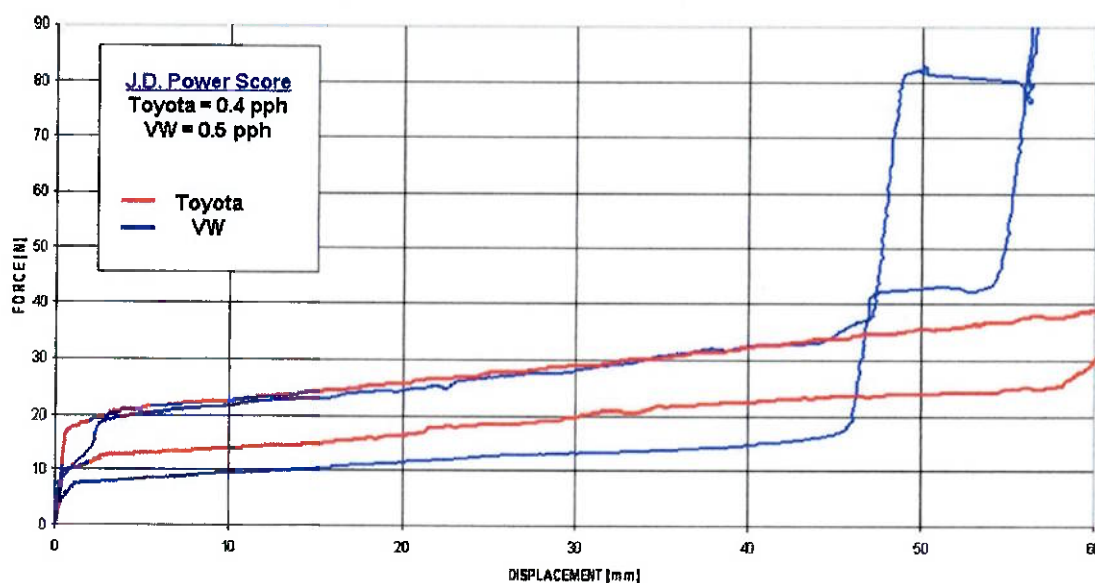


Gráfico 18.7-Força vs. deslocamento Toyota-VW

Finalmente, comparou-se o veículo atual da GM com o da Toyota. A diferença é muito grande, o que o Gráfico 18.8 e a pontuação J.D. Power mostram claramente.

Curva de Força-Deslocamento – Toyota vs. GM

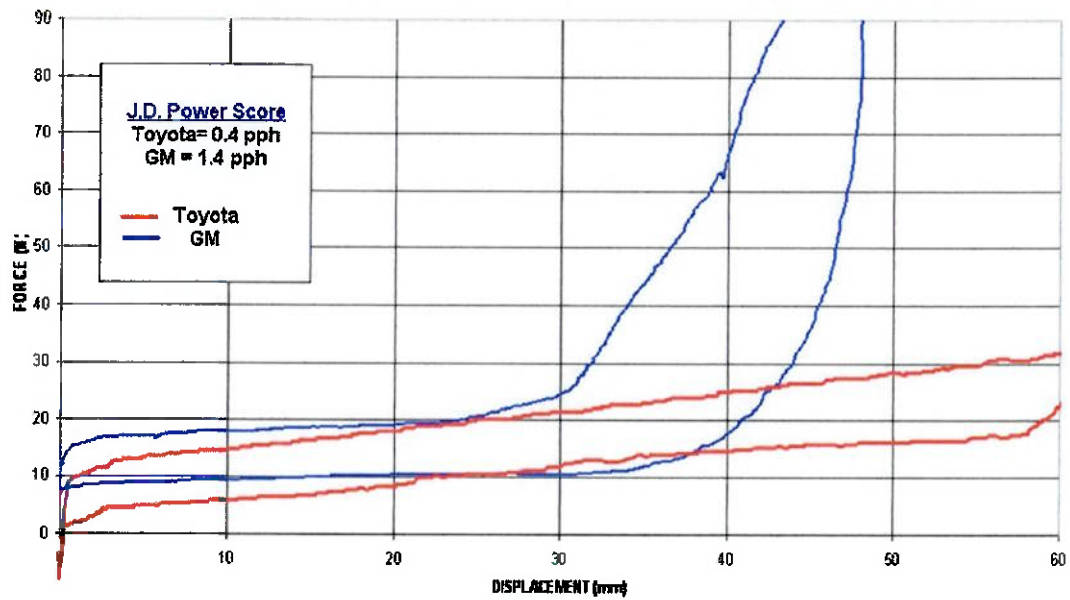


Gráfico 18.8-Força vs. deslocamento Toyota-GM

18.5 IDDOV – FASE 4: OTIMIZAR

18.5.1 Projeto de Parâmetros e Tolerâncias

Através das ferramentas utilizadas no trabalho chegou-se às conclusões mostradas na Tabela 18.3.

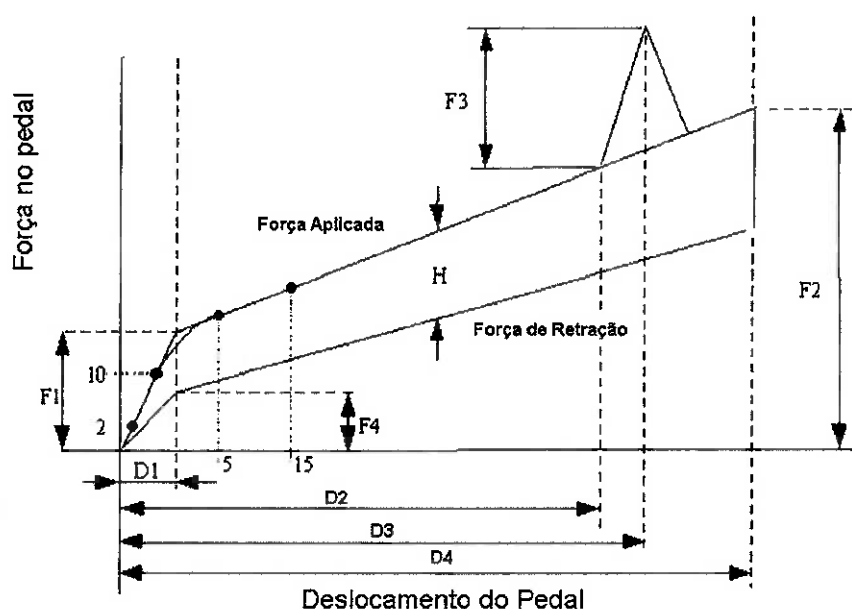


Figura 18.10-Gráfico ilustrativo Força vs. Deslocamento do pedal

Tabela 18.3-Resultados do Estudo (adaptada GM)

Descrição	Símbolo	Unidade	Sugerido pelo Estudo
Força Inicial	F1	N	20,0 +/- 2,0
Força com pedal em fim de curso (full travel stop)	F2	N	38,0 +/- 4,0
Força de Kick-Down	F3	N	40,0 +/- 6,0
Força de retorno reserva a -29C	F4	N	≥ 5,0
Força de Histerese	H	N	$H \geq 0,45 \times \text{Força aplicada}$
Deslocamento inicial	D1	mm	≤ 4,0
Deslocamento para iniciar força de Kick-Down	D2	mm	$0,8 D4 \leq D2 \leq 0,85 D4$
Deslocamento para pico força de Kick-Down	D3	mm	$D2 \leq D3 \leq D2+2,0$
Deslocamento para fim de curso (full travel stop)	D4	mm	50,0 +/- 2,0

Como mostram o Gráfico 18.1, Gráfico 18.2, Gráfico 18.3 e Gráfico 18.4, as notas dadas pelos clientes para as configurações dos pedais geraram pontos que foram aproximados por parábolas. Através das equações que regem estas parábolas, puderam-se calcular os pontos de máximo ou mínimo. O problema é que para alguns casos, a parábola interpolada apresentou um R quadrado baixo e não foi possível definir como nominal o valor exato obtido através da derivação das equações de cada curva. A solução foi definir como valores nominais os que estivessem mais próximos dos pontos interpolados.

No Gráfico 18.2, por exemplo, o ponto de mínimo calculado através de derivadas é 18N, mas a curva tem um R quadrado de 63%. O valor nominal sugerido é 20N por estar mais próximo dos pontos obtidos da avaliação do cliente.

Já para definição das tolerâncias para cada valor nominal utilizou-se a primeira derivada das curvas obtidas. Quando o módulo da derivada é menor, as tolerâncias podem ser maiores. Um exemplo é a definição das tolerâncias da força para atingir o fim de curso do pedal, mostrada no Gráfico 18.3. As derivadas em torno do ponto nominal (38N) são pequenas e a tolerância proposta é de mais de 10% do valor nominal (4N), para mais e para menos.

18.6 IDDOV – FASE 5: VERIFICAR

Este projeto não gerou um produto novo e por isso não necessitou de nenhum controle de produção. A verificação das especificações de projeto geradas será feita quando um pedal que as seguir for instalado em veículos e analisado por clientes e engenheiros.

18.7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Os resultados da Tabela 18.3 podem ser utilizados em qualquer plataforma de carros de passeio e caminhões, de acordo com o grupo de projetos. Com sua aplicação, espera-se melhorar custos com garantia, baixar o custo do projeto de futuros pedais por ter uma peça comunizada para todas as aplicações e garantir ganho de mercado por melhorar a satisfação do cliente com o produto (*Esperado* no modelo de Kano).

Como próximos passos, os resultados deste devem ser analisados e validados em campo e deve-se conduzir um estudo sobre a parte do sensor de deslocamento do pedal de acelerador e do ganho do sistema para completar as especificações de todo conjunto, não apenas da parte mecânica.

19 CONCLUSÕES FINAIS

Os objetivos principais deste trabalho foram alcançados: estudar e apresentar uma visão geral do Design for Six Sigma e aprofundar-se mais na metodologia IDDOV, explicando algumas de suas ferramentas. Foram também analisados pontos críticos de implementação, partindo de empresas que já aplicam o DFSS.

O tema foi proposto por um dos gerentes da Engenharia de Produtos da GM, onde realizei meu estágio durante o ano de 2005, pois o assunto, apesar de empregado a cerca de cinco anos pela matriz americana, ainda é muito pouco conhecido aqui no Brasil e o presente trabalho servirá como uma primeira leitura para os engenheiros da área.

Quanto ao estudo de caso apresentado ao fim deste relatório, desenvolveu-se a partir de uma apresentação fragmentada do projeto feito pela GM americana e houve alguma dificuldade para entendimento completo deste pela falta de informações divulgadas.

Encontrou-se bastante informação na Intranet da empresa, mas poucos artigos técnicos mais completos, muitos deles desenvolvidos pela Ford.

Apesar das dificuldades encontradas, o trabalho contribuiu significativamente para o entendimento do poderoso processo de desenvolvimento de produtos e processos que é o DFSS. As principais contribuições foram:

- A metodologia do DFSS não está bem definida como acontece com a do Seis Sigma. O trabalho focou no IDDOV, mas também fez resenhas de outras metodologias;
- Apesar de deixar claro que existem inúmeras ferramentas aplicáveis no DFSS, o presente trabalho aprofundou-se em um número muito reduzido destas, aquelas tidas na literatura encontrada como essenciais;
- Teve-se muita dificuldade em integrar as ferramentas de cada fase, pois encontrou-se pouquíssima informação sobre como fazê-lo. Buscou-se elaborar um modelo visual desta, mostrado na Figura 10.1.

- Estudo de caso mostrando aplicação do Design for Six Sigma, que permitiu a consolidação e a prática da teoria e de algumas das ferramentas citadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Soderborg, Nathan R., **Challenges and Approaches to Design for Six Sigma in the Automotive Industry**, #2005-01-1211, 2005 SAE International.

Hu, M., Yang, K., **Transfer Function Development in Design for Six Sigma Framework-Part I**, #2005-01-1215, 2005 SAE International.

Hu, M., Pieprzak, J., Glowa, J., **Essentials of Design Robustness in Design for Six Sigma (DFSS) Methodology**, #2004-01-0813, 2004 SAE International.

Creveling, C. M., Slutsky, J. L., Antis, D., **Design for Six Sigma in technology and product development**, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2003.

Hu, M., Barth, B., Sears, R., Pieprzak, J., **Six Sigma Disciplines Utilizing Design for Six Sigma Strategy in Automotive Applications**, #2004-01-1751, 2004 SAE International.

Ouchi, Fabio Y., **Estudo do DFSS (Design for Six Sigma): A qualidade no desenvolvimento de novos produtos e processos**. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

Hu, M., Barth, B., Sears, R., **Six Sigma Disciplines in Automotive Applications**, #2004-01-0684, 2004 SAE International.

<http://qav.gm.com/dfss/index.html>

<http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA194587?text=design+for+six+sigma>

Akao, Y., **QFD Integrating Customer Requirements into Product Design**, Productivity Press, 1990.

http://www.tech-encyclopedia.com/term/six_sigma

CHOWDHURY, Subir., **Design for Six Sigma: the revolutionary process for achieving extraordinary profits**. Dearborn, Estados Unidos, 2002.

MOURA, Eduardo C., **O Desenvolvimento de Produtos**. Banas Qualidade – junho de 2002.

BREYFOGLE III, F.W., **Implementing Six Sigma**, John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1999.

<http://www.mazur.net/triz/>

VTB Consultoria e Treinamento S/C Ltda., **FMEA**, São Paulo, 1993.

Phadke, M.S., **Quality Engineering Using Robust Design**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

<http://www.dnh.mv.net/ipusers/rm/loss.htm>

JURAN, J.M., **Juran's Quality Control Handbook**, McGrawHill, 4 ed., 1989.

<http://www.hq.nasa.gov/office/hqlibrary/ppm/ppm31.htm>

BALESTRASSI, P.P., **Identificação de Padrões em Gráficos de Controle Estatístico de Processo**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2000.

<http://www.jdpower.com/cc/index.jsp>

Hella KG Hueck & Co., **Hella Electronics for Modern Vehicles**, Catálogo de peças.

<http://www.timdavis.co.uk/Imeche.pdf>

PUGH, S., **Total Design-Integrated Methods for Successful Product Engineering**, Addison-Wesley Publishers Ltd., Grã-Bretanha, 1991.

KAZUO, O.; ASAKA, T.; **Handbook of Quality Tools – The Japanese Approach**, Productivity Press Inc., 1990.