**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aplicação da metodologia *DFMA* – *Design for
Manufacturing and Assembly* no projeto e fabricação de
aeronaves**

GUSTAVO FRANCO BARBOSA

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Vila Gonçalves Filho

São Carlos

2007

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, com amor, admiração e gratidão pela incansável atenção e incentivo ao estudo, por todo apoio ao longo do período do curso e na elaboração deste trabalho e por sempre estarem presentes quando necessário.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem a presença dele a realização deste trabalho não seria possível.

Ao Prof. Dr. Eduardo Vila Gonçalves Filho, pela atenção e apoio durante o processo de definição e orientação, além da colaboração sempre construtiva e incentivadora desse trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos – USP, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À minha esposa Liliam pela dedicação e colaboração nos momentos mais difíceis.

Ao meu filho Leonardo pela paciência e compreensão de muitos finais de semana sem lazer e pelas minhas horas de ausência.

Aos colegas e níveis de liderança aos quais estive subordinado na EMBRAER durante o transcorrer do curso, pelo entendimento, disponibilidade e confiança depositada.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui, meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS E QUADROS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 OBJETIVO	15
1.4 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO	16
2 A INDÚSTRIA AERONÁUTICA	17
2.1 HISTÓRIA DA AVIAÇÃO	17
2.2 INDÚSTRIA AERONÁUTICA NO MUNDO	19
2.3 INDÚSTRIA AERONÁUTICA NO BRASIL	22
2.3.1 PERÍODO DE 1930 À 1969	22
2.3.2 PERÍODO DE 1970 À 1994	25
2.3.3 PERÍODO DE 1995 ATÉ HOJE	28
2.4 A FABRICAÇÃO AERONÁUTICA	31
2.4.1 INTRODUÇÃO	31

2.4.2 CRITÉRIOS PARA MONTAGEM DE AERONAVES	34
2.4.3 FASES DO PROCESSO PRODUTIVO	37
3 DFMA, CONCEITOS, REGRAS E APLICAÇÃO	46
3.1 HISTÓRIA DO DFMA	46
3.2 DESIGN FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY – DFMA	48
3.3 FASES DO PROJETO DO PRODUTO	49
3.4 APLICAÇÃO DO DFMA NO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	52
3.5 RESISTÊNCIAS ENCONTRADAS DURANTE A IMPLEMENTAÇÃO DO DFMA	55
3.6 PRINCÍPIOS E REGRAS DO DFMA	57
3.7 DESIGN FOR EXCELLENCE – DFX	67
3.8 SOFTWARE DFMA - BOOTHROYD DEWHURST INC.	83
3.9 CONCLUSÕES	85
4 DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DO PRODUTO	86
4.1 INTRODUÇÃO	86
4.2 ENGENHARIA SIMULTÂNEA	87
4.3 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO X TIMES DE TRABALHO	89
4.4 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA	91
4.5 FASES DE UM PROJETO AERONÁUTICO	100
5 GUIA DE PROCESSO PARA PROJETO E FABRICAÇÃO DE AERONAVES ..	104
5.1 INTRODUÇÃO	104
5.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS	106
5.3 UTILIZAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE AUXÍLIO	109
5.4 DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMO GUIA	111
5.5 GUIA DE PROCESSO PARA DFMA	112
5.6 QUADROS DE VERIFICAÇÕES PARA ANÁLISE	118
5.7 APLICAÇÃO DOS QUADROS DE VERIFICAÇÕES	150
6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	152
6.1 CABLAGENS ELÉTRICAS – INTERFACE ENTRE ASA E FUSELAGEM	152

7 CONCLUSÃO	158
7.1 CONCLUSÕES SOBRE A METODOLOGIA DFMA	158
7.2 CONCLUSÕES SOBRE A FERRAMENTA DESENVOLVIDA	160
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. O 14-bis de Alberto Santos Dumont.....	18
FIGURA 2.2. Rebitadora automática utilizada na junção de fuselagens.....	33
FIGURA 2.3. Linha móvel de montagem final do Boeing 777.....	34
FIGURA 2.4. Conceito de montagem em linha.....	36
FIGURA 2.5. Conceito de montagem em doca.....	37
FIGURA 2.6. Processo de fabricação de uma aeronave.....	38
FIGURA 2.7. Fuselagem traseira do Airbus A380 deixando o gabarito.....	39
FIGURA 2.8. Montagem estrutural de um painel do Boeing 747.....	39
FIGURA 2.9. Pré-equipagem dos segmentos de um Boeing 747.....	40
FIGURA 2.10. Junção das fuselagens de um Boeing 767.....	41
FIGURA 2.11. Equipagem de sistemas de um Boeing 737.....	42
FIGURA 2.12. Instalação dos motores de um Boeing 767.....	43
FIGURA 2.13. Linha de montagem do Boeing 737.....	43
FIGURA 2.14. Pintura de uma aeronave comercial.....	44
FIGURA 2.15. Aeronave Airbus A320 pronta para o cliente TAM.....	44
FIGURA 3.1. Estrutura da aplicação do DFMA no processo do projeto.....	53
FIGURA 3.2. Redução de tempo quando aplicado no início do projeto.....	54
FIGURA 3.3. Peças padronizadas.....	60
FIGURA 3.4. Métodos comuns de fixação.....	61
FIGURA 3.5. Montagem empilhada ou unidirecional.....	62
FIGURA 3.6. Peças com características de autolocalização.....	63
FIGURA 3.7. Peças muito pequenas, escorregadias, pontiagudas e flexíveis.....	64
FIGURA 3.8. Peças simétricas em relação as suas possibilidades de montagem.....	65
FIGURA 3.9. Peças possíveis de ficarem presas e emaranhadas.....	65
FIGURA 3.10. Design for Excellence (DFX).....	68
FIGURA 3.11. Curva da Banheira.....	72
FIGURA 4.1. Desenvolvimento departamental do produto.....	88
FIGURA 4.2. Interação entre departamentos.....	91
FIGURA 4.3. Modelos CAD utilizados na concepção do Boeing 787.....	97
FIGURA 4.4. Centro de realidade virtual.....	98
FIGURA 4.5. Simulação de gabaritos, plataformas e ergonomia.....	99

FIGURA 4.6. Fases de um projeto aeronáutico	100
FIGURA 5.1. Requisitos para análise na fase de concepção (fase II)	114
FIGURA 5.2. Requisitos para análise na fase de detalhamento (fase III)	114
FIGURA 5.3. Desdobramento dos macro-processos em quadros de verificações	116
FIGURA 5.4. Denominação dos quadros de verificações	117
FIGURA 5.5. Simplificação de projeto	120
FIGURA 5.6. Estudo de acessibilidade na montagem	123
FIGURA 5.7. Estudo ergonômico na manufatura digital	123
FIGURA 5.8. Compatibilidade entre projetos de estruturas e sistemas	126
FIGURA 5.9. Localização da bateria da aeronave	129
FIGURA 5.10. Selagem de interface e filete	133
FIGURA 5.11. Modelo genérico de estrutura do produto	136
FIGURA 5.12. Desenho e lista de peças	138
FIGURA 5.13. Desenho e roteiro de operações	141
FIGURA 5.14. Diagrama de precedências	144
FIGURA 5.15. Plataforma de trabalho e acesso à aeronave	146
FIGURA 5.16. Estudo de Layout	149
FIGURA 5.17. Momento de aplicação dos quadros de verificações	150
FIGURA 5.18. Guia de Processo para DFMA	151
FIGURA 6.1. Projeto sem conectores de interface	153
FIGURA 6.2. Comparação entre projetos	154
FIGURA 6.3. Concepção do novo projeto da cablagem (cabo elétrico)	155

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1 – Cronologia dos acontecimentos históricos.....	19
TABELA 5.1 – Exemplo dos problemas de DFMA.....	108
QUADRO 01 – Número de peças na montagem.....	119
QUADRO 02 – Acessibilidade e ergonomia na montagem.....	121
QUADRO 03 – Compatibilidade entre sistemas e estrutura.....	124
QUADRO 04 – Facilidade na manutenção.....	127
QUADRO 05 – Utilização de peça ou conjunto similar.....	130
QUADRO 06 – Compatibilidade de materiais.....	132
QUADRO 07 – Estrutura do produto.....	135
QUADRO 08 – Desenhos de produto.....	137
QUADRO 09 – Roteiros de operações.....	139
QUADRO 10 – Diagrama de precedências.....	142
QUADRO 11 – Recursos de apoio ao solo.....	145
QUADRO 12 – Layout da linha de montagem.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DFM	Design for Manufacturing
DFA	Design for Assembly
DFX	Design for Excellence
CTA	Centro Tecnológico da Aeronáutica
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
MIT	Massachusetts Institute of Technology
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
TQM	Total Quality Managment
CEP	Controle Estatístico de Processo
QFD	Quality Function Deployment
DIP	Desenvolvimento Integrado do Produto
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CRV	Centro de Realidade Virtual
CAPP	Computer Aided Process Planning
PDM	Product Data Managment
BS	Boletim de Serviço
EAS	Equipamento de Apoio ao Solo
MO	Mão-de-obra
HE	Hora-extra
HH	Hora homem

RESUMO

BARBOSA, G.F. (2007). *Aplicação da metodologia DFMA – Design for Manufacturing and Assembly no projeto e fabricação de aeronaves*. São Carlos. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A Indústria Aeronáutica no Brasil tem se desenvolvido de modo acelerado em termos de desenvolvimento tecnológico e dos processos de fabricação aplicados. Com isso, tem se buscado melhores resultados durante o desenvolvimento do projeto e fabricação de aeronaves, visando uma melhor avaliação dos processos de fabricação, montagem, manutenção, confiabilidade e fatores humanos (ergonômicos). O intuito é aperfeiçoar a fabricação e simplificação da montagem dos conjuntos, de modo a facilitar a manufatura dos componentes que formarão o produto depois de acabado e tornar a montagem dos produtos aeronáuticos com o menor custo e da forma mais otimizada possível. Sendo assim, este trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta que utiliza os conceitos de DFMA para aplicação específica no projeto e fabricação de aeronaves. O objetivo da ferramenta é auxiliar os Engenheiros que atuam nas fases de desenvolvimento do avião, para que benefícios de facilidade de montagem possam ser alcançados com a utilização dos quadros de verificações. O trabalho inicia-se com a história da aviação, da indústria aeronáutica no mundo e no Brasil, e uma revisão teórica dos conceitos e princípios da metodologia DFMA. Em seguida é apresentado o ambiente da indústria aeronáutica, incluindo o processo de desenvolvimento integrado do produto, a implementação de projetos nestes segmentos e as fases de fabricação de uma aeronave. Na sequência é apresentada a ferramenta de auxílio que foi desenvolvida em forma de quadros de análises, elaboradas com as regras e verificações a serem seguidas durante a criação do projeto, com o objetivo de consolidar os conhecimentos de manufatura e prevenir problemas futuros de montagem. Um estudo de caso é apresentado para evidenciar e comparar os resultados obtidos pela não aplicação efetiva dos conceitos da metodologia DFMA no desenvolvimento do projeto inicial, com os benefícios alcançados após a modificação do projeto baseado na aplicação dos conceitos de projeto para manufatura e utilização das tabelas. Por fim, os resultados são discutidos e a conclusão estabelecida.

Palavras chave: DFMA, Aeronaves, Projeto, Manufatura, CAD, Desenvolvimento integrado do produto.

ABSTRACT

BARBOSA, G.F. (2007). *Application of DFMA – Design for Manufacturing and Assembly methodology on aircrafts design and manufacturing*. São Carlos. 165p. Dissertation (Master Degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Brazilian Aeronautical Industry has been developed faster and faster in terms of technology development and manufacturing processes. Thus, it has been planning to reach better results during the aircraft development and manufacturing phases, aiming to better evaluation of manufacturing processes, assembly, maintenance, capability and human factors (ergonomics). It is expected to improve the manufacturing and simplify the assembly to become easier the manufacturing of parts that will make the aircraft final assembly with low costs, high quality and the best optimized condition. So, the main objective of this study is to develop a guideline which uses the DFMA concepts for specific application on aircrafts design and manufacturing. The main goal of the guideline is to drive the engineers who work on aircraft development phases, about the manufacturing benefits that can be achieved when using the check list table of the guideline. This study starts with the aviation history and world and Brazilian aeronautical industries and a theoretical review of the principles and concepts of the Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) methodology. Next, the study describes the aeronautical industry environment, including the process of product integrated development, the implementation of projects in this sector and the airplane manufacturing phases. Subsequently, it has shown the guideline routine, which was developed in form of check list tables that contain rules and steps to be followed during the design creation and attempts to consolidate manufacturing knowledge and to prevent possible assemblies discrepancies. A case study is also presented to evident and makes the comparison between the results of aeronautical design that had been developed without DFMA concepts and post benefits reached after the project revision using the design for assembly concept and guideline tables. Finally, the results are discussed and the conclusion established.

Keywords: DFMA, Aircraft, Design, Manufacturing, CAD, Product Integrated Development.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO

1.1 Introdução

Com o advento da globalização, as empresas fabricantes de aeronaves estão enfrentando o aumento da pressão do mercado, o que tem induzido estas empresas a se preocuparem constantemente em melhorar a qualidade, encurtar o ciclo de desenvolvimento dos produtos, reduzir custos, garantir o prazo de entrega e ,acima de tudo, obter a satisfação dos clientes. Estas empresas precisam tomar decisões confiáveis e eficientes antecipadamente, planejar e gerenciar melhor o processo industrial, desde a fase conceitual do desenvolvimento do produto, a implementação e execução final na linha de produção e posterior assistência técnica.

Na busca constante da eficiência operacional e melhor produtividade, o primeiro passo dado pelas organizações foi melhorar o sistema produtivo. Com a evolução técnica, atualmente, muitas empresas passaram a implementar programas de garantia da qualidade da conformidade do produto. No entanto, sobressaem-se aquelas empresas que desenvolvem produtos diferenciados e com qualidade.

Frente a isso, muita atenção está sendo direcionada ao processo de projeto, pois a qualidade não pode ser inserida num produto a não ser que tenha sido projetada nele. Um resultado foi a descoberta da importância dos custos de montagem, manufatura, fabricação, quantidade de componentes do produto, garantia de qualidade e até de despesas gerais de almoxarifado que acabam onerando o custo final do produto. Elevou-se então, o mérito dos

princípios de uma das metodologias de projeto mais importantes, com o *DFMA (Design for Manufacturing and Assembly)*, originado na Europa nos anos 70, cujo objetivo é simplificar o projeto do produto, reduzir a quantidade de componentes e tempo de montagem, alcançar a maior produtividade, melhorar a qualidade e reduzir custos (Souza, 1998).

O objetivo do *DFM (Design for Manufacturing)* é desenvolver um produto que atenda todos os requisitos funcionais, tenha baixo custo de produção e que também seja de fácil manufatura. Esta técnica é composta de vários princípios, conceitos, regras e recomendações que guiam o projetista para o desenvolvimento do melhor projeto de produto do ponto de vista da fabricação. Já o *DFA (Design for Assembly)* tem por objetivo racionalizar a etapa de montagem por meio da redução do número de peças, analisando separadamente a função, forma, material e montagem de cada uma e assim desenvolver um produto funcional, simples e com baixo custo de produção. Deste modo, a aplicação desta metodologia durante o desenvolvimento de produtos faz com que o custo total de desenvolvimento e o prazo para disponibilizar o produto ao mercado sejam reduzidos, aumentando assim a competitividade do mesmo.

Neste sentido, este trabalho apresenta-se na forma de expor alguns parâmetros e considerações dos pontos mais importantes a serem verificados na fase de projeto preliminar do produto, focando nos pontos mais evidentes que possibilitarão a elaboração de um projeto com características que facilitem a manufatura do avião, organizando os conhecimentos de desenvolvimento integrado do produto no âmbito de Engenharia Simultânea, sob a ótica do DFMA. Além disso, a metodologia *DFMA (Design for Manufacturing and Assembly)* pode auxiliar a integração das áreas de desenvolvimento do produto (Projeto e Engenharia) e áreas produtivas de fabricação das partes e montagens (Produção), visando sempre ações preliminares preventivas, rápidas e eficientes durante a fase de projeto que evitem problemas na linha de montagem.

1.2 Justificativa

Baseado em dados, registros, experiências práticas adquiridas nas atividades de suporte à produção, entrevistas com técnicos montadores e de manutenção, com foco nas linhas de fabricação de peças, segmentos, montagem e manutenção de produtos aeronáuticos de vários projetos e modelos de aviões, evidencia-se uma grande quantidade de problemas causados pela não utilização efetiva da metodologia DFMA durante o desenvolvimento de produtos, o que ocorre desde a fase do anteprojeto até o detalhamento final dos desenhos e que contribui para o aumento dos ciclos de produção, eventuais problemas com não-qualidade e conseqüentemente custos elevados que são agregados ao produto final acabado.

Preocupado com isso, optamos por desenvolver uma abordagem mais específica da metodologia do DFMA na indústria aeronáutica, com o propósito de promover uma difusão e fortalecimento da utilização da metodologia no ambiente de desenvolvimento de produtos de uma empresa fabricante de aeronaves, baseado na aplicação dos conceitos de projeto para manufatura e acima de tudo na melhoria da troca de informações, interfaces, estreitamento e fortalecimento da relação entre as áreas de Engenharia, Projeto, Ferramental e Processos das equipes que atuam no ambiente de Engenharia Simultânea, com a experiência das equipes que apóiam diretamente as áreas de produção.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta DFMA que possa auxiliar os Engenheiros de Produto e Processos durante as fases de concepção e detalhamento dos projetos aeronáuticos.

1.4 Estrutura e Organização

Este presente trabalho está dividido em 7 capítulos.

O primeiro capítulo introduz o assunto e apresenta o objetivo do trabalho.

Os próximos três capítulos fazem parte da *REVISÃO BIBLIOGRÁFICA* do trabalho. O objetivo desta seção é apresentar um histórico da aviação e um apanhado geral das indústrias aeronáuticas no Brasil e no mundo, além de introduzir definições, conceitos e princípios da metodologia DFMA, DFX (Design for Excellence) e Engenharia Simultânea.

O capítulo 5 situa o leitor no ambiente aeronáutico, apresentando os conceitos básicos do processo de desenvolvimento integrado do produto neste ramo, com foco na manufatura, as ferramentas utilizadas e a forte relação com a linha de montagem de aeronaves, além de outros tópicos mencionados.

O capítulo 6 apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta DFMA para auxiliar os Engenheiros de Produto e Processos durante as fases de concepção e detalhamento dos produtos aeronáuticos com foco para uma manufatura simples, fácil e barata.

O último capítulo traz os comentários finais, conclusões e recomendações para futuros desenvolvimentos e aprimoramentos a serem aplicados em novos projetos de aviões.

CAPÍTULO 2

2 A INDÚSTRIA AERONÁUTICA

2.1 A história da aviação

O desejo de mover-se no ar imitando os pássaros nasceu na mente do homem em épocas bastante remotas, como pode ser comprovado em documentos antigos, bem como nas lendas do passado longínquo.

A mais famosa dessas lendas é a de Dédalo e Ícaro. Conta a lenda que ambos foram chamados pelo rei Minos da Grécia para construírem o Palácio do Minotauro. Para que não revelassem o segredo do labirinto, foram aprisionados.

Dédalo construiu dois pares de asas de penas e cera. Dédalo e Ícaro conseguiram fugir da prisão voando. Ícaro, porém, entusiasmado com o voo, chegou muito perto do sol e o calor derreteu a cera soltando as penas. Ícaro caiu no mar e morreu.

É impossível determinar com certeza quando o homem tentou o voo pela primeira vez, mas a história da aviação é muito recente, contando aproximadamente um século e meio. O primeiro filme fotográfico apareceu em 1825. Em Berlim, em 1895, o filme animado teve sua primeira exibição pública. Assim os acontecimentos primordiais da aviação estão relativamente bem documentados.

Bem menos conhecida, por ser mais antiga que a do avião, é a história do aeróstato (balões e dirigíveis). Inscrições e textos antigos indicam que balões de ar quente e pipas gigantes teriam sido empregados em batalhas pelos chineses antes da era cristã com o intuito de observar a zona de combate.

A partir daí, vários outros dirigíveis trouxeram inovações importantes enquanto o avião tomava forma e os estudos aerodinâmicos iam evoluindo.

A partir de 1903, estimulado por seu sucesso com dirigíveis, Santos Dumont passou a dedicar-se ao estudo do voo de um aparelho mais pesado do que o ar. Construiu seu primeiro aparelho motorizado em 1905, mas este se recusou a voar. No ano seguinte, fez algumas alterações em sua máquina e também acrescentou ao aparelho um motor mais potente. Durante as primeiras experiências públicas com o estranho biplano de cauda na frente, no campo de voo de Bagatelle, perto de Paris, a 13 de setembro de 1906, ele levantou voo sozinho e voou cerca de 8 metros. A 23 de outubro, perante a Comissão Técnica do Aeroclube da França, realizou seu primeiro voo oficial com o aparelho, o qual chamou de 14-Bis (Figura 2.1), percorrendo a distância de 220 metros em 12 segundos, seis metros acima do solo. Era a primeira vez que, perante testemunhas, um homem fazia erguer-se do solo por seus próprios meios um aparelho mais pesado do que o ar.

Figura 2.1. O 14-bis de Alberto Santos Dumond

(Fonte: site Centenário do 14-bis, www.14bis.mil.br)

A tabela mostrada a seguir retrata a cronologia das invenções e acontecimentos históricos que marcaram época, desde as primeiras idealizações até o a realização do 1º voo oficial.

TABELA 2.1 – Cronologia dos acontecimentos históricos

<i>Ano</i>	<i>Autor</i>	<i>Criação</i>
<i>1842</i>	<i>Willian Samuel Henson</i>	<i>Avião de Henson</i>
<i>1852</i>	<i>Henri Giffard</i>	<i>Dirigível de Giffard</i>
<i>1853</i>	<i>Jorge Cayley</i>	<i>Planador de Cayley</i>
<i>1890</i>	<i>Otto e Gustav Lilienthal</i>	<i>Planador de Lilienthal</i>
<i>1896</i>	<i>Samuel Langley</i>	<i>Aeródromo de Langley</i>
<i>1897</i>	<i>Clement Ader</i>	<i>Avon II de Ader</i>
<i>1901</i>	<i>Alberto Santo Dumont</i>	<i>Balão nº 6 de Dumond</i>
<i>1903</i>	<i>Irmãos Wright</i>	<i>O aparelho Wright</i>
<i>1906</i>	<i>Alberto Santos Dumond</i>	<i>O 14-bis</i>

2.2 A indústria aeronáutica no mundo

O desejo de dominar as forças naturais e conseguir voar com o auxílio de algum aparelho sempre fascinou o Homem.

Depois do célebre vôo em 23 de outubro de 1906 no Campo de Bagatelle, em Paris, quando Santos Dumont pela primeira vez no mundo demonstrou em público o vôo de uma aeronave mais pesada que o ar, este fascínio tornou-se obsessão e houve uma verdadeira corrida para aperfeiçoar e desenvolver novos tipos de aeronaves.

Estava nascendo a indústria aeronáutica no mundo.

A construção de aviões ganhou o primeiro grande impulso durante a primeira grande guerra e consolidou-se como indústria durante a segunda guerra mundial.

Portanto o primeiro uso em escala industrial na construção de aeronaves foi com fins

militares, seja para transporte de pessoas e cargas, seja para utilização como arma de combate.

A construção de aeronaves (motores e partes) é um dos mais importantes setores de indústria manufatureira de bens duráveis, pois apresenta um alto valor agregado – nos Estados Unidos, por exemplo, representa 1,88% de todos os bens duráveis produzidos.

Também é o setor que mais fomenta o desenvolvimento tecnológico e que mais emprega mão-de-obra especializada, como engenheiros, pesquisadores e técnicos.

Muitos países consideram a fabricação de aviões como tendo um papel fundamental na segurança nacional. Isto provavelmente se deve ao fato da origem militar da construção de aeronaves e também à influência de inovação tecnológica em outros setores industriais associados (Seitz e Steele, 1985).

A indústria aeronáutica norte-americana tem dominado o mercado mundial de construção de aeronaves desde o final da segunda guerra mundial.

Isto pode ser explicado pelo legado tecnológico deixado no fim da guerra e pelos seguintes fatores adicionais:

- Uma saúde econômica global do país, que permitiu e encorajou um agressivo e efetivo programa de desenvolvimento tecnológico em projetos e fabricação de aviões serviços e operações;
- Uma contínua e produtiva relação entre governo, companhias aéreas e fabricantes;
- Um esforço agressivo por parte das companhias aéreas e fabricantes de aviões para continuamente melhorar o nível do transporte aéreo, o que resultou em inúmeras vantagens para o passageiro, tais como tempo da viagem, o custo e a segurança; e
- Conseqüentemente, um rápido crescimento do transporte aéreo, tanto doméstico quanto internacional (Seitz e Steele, 1985).

Em 1970 os europeus fundaram a Airbus, um consórcio entre empresas da França, Inglaterra, Alemanha e Espanha, para tentar fazer frente às empresas norte-americanas, principalmente na construção de aeronaves da categoria acima de 100 assentos, em que as empresas Boeing e McDonnell Douglas dominavam o mercado.

O primeiro produto da Airbus foi o A300, que teve excelente aceitação pelas companhias aéreas e conseguiu uma boa penetração no mercado.

Embora, este consórcio tenha sido bem sucedido, ainda hoje a diferença é enorme: as empresas norte-americanas, juntas, detêm 70% do mercado de construção de aeronaves com capacidade superior a 100 passageiros, enquanto os outros 30% pertencem à Airbus.

Em julho de 1998 foi concretizada a compra da McDonnell pela Boeing, num negócio de US\$ 15,5 bilhões. O fato causou um forte mal-estar entre os Estados Unidos e a Comunidade Européia. Este mal-estar só foi amenizado quando a Boeing concordou em suprimir os contratos de exclusividade com três grandes companhias aéreas norte-americanas e em manter separada a divisão de aviões militares da Douglas, para poder demonstrar que os subsídios governamentais utilizados por esta divisão não serão utilizados em projetos de aeronaves civis.

O mercado mundial de construção de aeronaves sofreu uma recessão em meados da década de 80 principalmente nos Estados Unidos, o principal mercado consumidor.

Esta recessão só acabou no início dos anos 90, devido, principalmente, à desregulamentação feita pelo governo norte-americano no transporte aéreo doméstico, e também aos incentivos dados pelo governo às companhias aéreas, para aumentar o atendimento a cidades e comunidades menores.

O reflexo desses procedimentos pode ser apontado não apenas na redução das tarifas, mas também na procura pelos vôos – uma década atrás o preço da passagem São Paulo – Nova Iorque, em classe econômica, não saía por menos de US\$ 2200,00, hoje o preço da

passagem é de menos de US\$ 1000,00.

O Brasil também está tomando ações para desregulamentação do transporte aéreo brasileiro, pois, tem um dos mercados mais ativos do mundo, tanto que sempre participou do organismo da ONU que reúne os 10 países mais importantes para aviação comercial em todo mundo. Este grupo é responsável pela regulamentação e controle da aviação, navegação e segurança aérea em todo o mundo.

Por tudo isto, a tendência do mercado mundial é de crescimento, levando-se em consideração somente as empresas que fazem linhas regulares de transporte de passageiros. Agregando-se as companhias de *charter* e o transporte de carga, a estimativa na taxa de crescimento eleva-se para 7% ao ano. (Banco Internacional de Desenvolvimento / O Estado de São Paulo, Editorial de 12/08/1997).

Os mercados mais promissores nestas projeções são o asiático, o da Oceania e o mercado doméstico brasileiro, que já mostra sinais de mudanças, com as atuais quedas das tarifas.

Portanto podemos concluir que o mercado é atrativo para novos empreendimentos. Esses investimentos, porém, devem ser feitos com extremo cuidado, uma vez que neste setor industrial o custo de desenvolvimento de um novo produto é extremamente elevado – o que não permite erro aos que se arriscam a investir na construção de aeronaves.

2.3 A indústria aeronáutica no Brasil

2.3.1 Período de 1930 à 1969

O histórico da indústria aeronáutica brasileira remonta à década de 30, uma vez que um significativo número de aeronaves foi projetado e produzido no período de 1930 à 1950.

As principais dificuldades encontradas pelos empreendedores da época foram a limitação do mercado, que estava restrito apenas ao governo, e a falta de uma política industrial de longo prazo para o setor.

A primeira produção em serie de aeronaves no Brasil foi feita pela Companhia de Navegação Costeira e, posteriormente, pela Fábrica Nacional de Aviões – ambos empreendimentos feitos pelo armador Henrique Lage.

O interesse de Lage pela construção de aviões vinha desde 1920. Porém somente em 1935, com apoio do governo de Getúlio Vargas, ele conseguiu por em prática seu plano.

Os modelos que alcançaram um pequeno sucesso comercial foram o M-7 e M-9, dos quais foram produzidas 26 e 40 unidades, respectivamente. O responsável pelo projeto destes aviões foi o engenheiro Antônio Guedes Muniz, um dos primeiros brasileiros a obter o título de engenheiro aeronáutico.

Lage continuou a produção até 1948, sendo os modelos HL-1, com 106 unidades produzidas, e o HL-6, com 60 unidades produzidas, os de maior expressão. O projeto destes aviões foi de responsabilidade de René Marie Vandaele, um belga que veio para o Brasil em 1933 trabalhar na Companhia de Navegação Costeira a convite de Muniz.

Em 1942 surge a Companhia Aeronáutica Paulista (CAP), do industrial Francisco Pignatari, que produziu vários modelos oriundos de projetos da divisão de aeronáutica do Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) da Universidade de São Paulo (USP). Porém o modelo de maior sucesso comercial foi o CPA-4 “Paulistinha”, que atingiu a produção de 777 unidades no período de 1943-48.

Na década de 50 ocorreu outro empreendimento no interior de São Paulo a partir do esforço de José Carlos de Barros Neiva, piloto e projetista que fundou a Sociedade Construtora Aeronáutica Neiva.

A Neiva iniciou suas atividades retomando e atualizando o projeto do Paulistinha

cedido pela CPA, mas o projeto mais marcante para o seu desenvolvimento tecnológico foi o avião “Regente”, a primeira aeronave brasileira produzida em metal.

No período de 1961 à 1971 a Neiva produziu 280 unidades do Paulistinha e entre 1961 à 1971, produziu 120 unidades do Regente em duas versões.

A fábrica do Galeão nasceu da necessidade da Marinha resolver o problema de manutenção de seus aviões. Isto porque antes da criação do Ministério da Aeronáutica, em 1941, o Exército e a Marinha mantinham separados seus destacamentos de aviação.

A Marinha, então, firmou um acordo com a empresa alemã Focke Wulf Flugzeugbau, segundo o qual a Marinha construiria os pavilhões industriais do Galeão e a empresa alemã forneceria equipamentos, ferramental e mão-de-obra técnica especializada para treinar os operários brasileiros. Estes empreendimentos privados surgiram de uma situação conjuntural, a guerra, que de certa forma funcionou como uma reserva de mercado para as indústrias nacionais.

Com o fim da guerra as empresas brasileiras não conseguiram competir com as empresas estrangeiras, que colocaram no mercado o excesso de produção de aviões bélicos por um preço bem inferior.

Quanto ao governo, pode-se afirmar que sempre foi o maior incentivador na formação de empreendimentos para construção de aeronaves, seja com principal cliente ou mesmo como fabricante, como na Fábrica do Galeão, onde foram fabricados diversos modelos, principalmente sob licença da Alemanha e Inglaterra.

Esta fase inicial foi extremamente importante, pois deu origem a uma mão-de-obra especializada e também formou uma massa crítica com um alto grau de conhecimento técnico, requisitos muito úteis para a consolidação da indústria aeronáutica no país (Cabral, 1987).

Com base nas falhas ocorridas neste período inicial e principalmente no fato que a

indústria aeronáutica brasileira ainda não tinha se consolidada, o governo resolveu tomar medidas de mais longo prazo para tentar implementar uma política que enfim consolidasse a indústria de construção de aeronaves no país.

O marco histórico nesta direção foi a criação, em 1945, do CTA – Centro Técnico da Aeronáutica, hoje Centro Técnico Aeroespacial. O primeiro instituto do CTA foi o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), uma escola para formação de engenheiros que teve como primeiro reitor o professor Richard H. Smith, do Massachusetts Institute Technology (MIT). Smith veio para o Brasil a convite do Tenente Coronel Casimiro Montenegro Filho, idealizador do CTA, para auxiliá-lo na formação do plano básico do CTA e na organização do ITA. Este processo de formação continuou até a década de 60 – tanto que nesta época os brasileiros compunham o maior grupo de estrangeiros que estudavam engenharia aeronáutica na França.

Em 19 de agosto de 1969, em São José dos Campos, foi criada a EMBRAER, uma empresa de economia mista em que o governo detinha, por razões legais, pelo menos 51% do capital volante. (Cabral, 1987)

2.3.2 Período de 1970 à 1994

A criação da EMBRAER foi o passo definitivo para a consolidação da indústria aeronáutica no Brasil, que iniciou a sua produção em série basicamente com três projetos.

O primeiro foi o EMB-110, o “Bandeirante”, um bimotor com capacidade para 19 pessoas; o segundo foi o EMB-200, o “Ipanema”, um monomotor para uso agrícola; e finalmente o EMB-326, o “Xavante”, um jato para treinamento avançado, apoio tático e ataque ao solo.

As principais razões que explicam o rápido crescimento da EMBRAER são:

- Em nenhum destes três projetos a empresa teve que arcar com gastos de desenvolvimento, pois o EMB-110 e EMB-200 foram desenvolvidos e projetados pelo Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) do CTA, enquanto o EMB-326 foi desenvolvido e projetado pela Aermachi, uma empresa italiana;
- A encomenda, por parte do governo, de 35 unidades do EMB-110 e 175 unidades do EMB-326;
- A transferência de todos os técnicos do IPD para a nova empresa, possibilitando à EMBRAER assumir de imediato a capacitação técnica na fase de projeto (Cabral, 1987);

O período compreendido entre 1970 e 1985 pode ser considerado a melhor fase da indústria de construção de aeronaves brasileira, principalmente após a EMBRAER e CTA terem conseguido a aprovação do projeto EMB-110 em órgãos homologadores de tráfego aéreo de outros países, como o *Federal Aviation Administration* (FAA), dos EUA, e o *Civil Aviation Authority* (CAA), da Inglaterra.

Os principais produtos da EMBRAER, desde a sua fundação, podem ser divididos em três categorias: aviação comercial, aviões leves (aeronaves pequenas, com capacidade de 08 pessoas) e aviação militar.

No final da década de 80 o mercado de aviões enfrentou uma forte recessão.

Aliado a isto houve um erro de estratégia na empresa, que foi o projeto de um avião de 20 lugares, o CBA-123, desenvolvido em parceria com a *Fábrica Militar de Aviones* – FMA, da Argentina.

Nesta época a empresa já possuía um produto líder de vendas o EMB-120, dentro da categoria de 30 passageiros. O erro estratégico foi não perceber que o mercado estava mais

interessado em uma aeronave maior, ao invés de uma com menos de 30 assentos.

O CBA-123 não passou da produção de dois protótipos e, com isto, todo o seu custo de desenvolvimento não foi amortizado na fase de produção em série.

A empresa também realizou um drástico corte de funcionários: em agosto de 1989 houve uma demissão coletiva de aproximadamente 4.000 funcionários, reduzindo seu quadro funcional de 12.000 para 8.000 empregados e posteriormente as demissões continuaram, até chegar ao número de 3.200 empregados em 1994.

Novamente a indústria aeronáutica brasileira estava em difícil situação, com seu futuro totalmente incerto.

O Governo Federal, considerando que já havia feito tudo a seu alcance para implementar esta indústria no país, resolver iniciar, em 1992, o processo de privatização da empresa. Esse processo terminou em 7 de dezembro de 1994, quando a EMBRAER foi transferida para a iniciativa privada.

O capital da empresa hoje constituído de 50% de ações preferenciais e 50% de ações ordinárias. As ações preferenciais que dão direitos a voto são controladas por um consórcio constituído por:

- Grupo Bozano Simonsen (25%): um dos principais conglomerados brasileiros, com atuação nas áreas financeira, mineral, imobiliária, agrícola e industrial. O grupo participa de 41 empresas, entre controladas direta ou indiretamente e coligadas.
- Previ – Caixa de Previdência do Banco do Brasil (10%): uma instituição pioneira responsável pelo maior fundo de pensão do Brasil, com 145 mil associados e reservas de US\$ 12 bilhões. Tem participação em 90 empresas.
- Sistel – Fundação Telebrás de Seguridade Social (10%): segundo maior fundo de pensão do Brasil; com cerca de 300 mil participantes e capital de mais de

US\$ 2,7 bilhões;

- Governo Federal (4,5%): o Estado participa através das ações do Ministério da Aeronáutica;
- Clube de Investimento dos Empregados da EMBRAER (CIEMB) (0,5%) – Clube formado por empregado da empresa.

2.3.3 Período de 1995 até hoje

A partir de 1995 as esperanças da indústria aeronáutica brasileira foram depositadas no projeto EMB-145, hoje ERJ-145.

Esta aeronave realizou o seu primeiro voo em 11 de agosto de 1995 e desde esta data seu sucesso tem sido notório, com uma excelente performance operacional e com um preço extremamente competitivo. No período de dois anos tornou-se o modelo mais vendido de sua categoria, apresentando atualmente uma quantidade de mais de 900 unidades fabricadas e entregues.

O sucesso deste projeto veio consolidar o objetivo perseguido desde a década de 30, que era estabelecer uma indústria aeronáutica independente no Brasil.

A partir dos atentados terroristas ocorridos contra os Estados Unidos em 11 de setembro de 2001, o setor Aeroespacial, em especial, o mercado de aviação comercial passa por um processo de profunda transformação. Com poucas exceções, as companhias de transporte aéreo defrontaram-se com o desafio de rapidamente ter que se adequar à redução da demanda por seus serviços, à redução dos investimentos e à baixa oferta de financiamentos internacionais, levando-as a redefinir suas estratégias.

Este processo de transformação tem causado enormes prejuízos operacionais em várias companhias aéreas, com perda de empregos, pedidos de concordata e, inclusive, levando uma

fabricante de aeronaves à insolvência.

Junto a este cenário, o desaquecimento das principais economias de todo o mundo e a revelação de vários casos de improbidade administrativa e de adoção de práticas financeiras incorretas, acarretou uma crise de confiança no mercado financeiro.

Graças a uma estratégia bem-sucedida de geração de caixa operacional, a EMBRAER teve condições de se posicionar, desde o início deste novo cenário, ao lado de seus clientes, flexibilizando e apoiando operações financeiras que permitiram que aeronaves fossem recebidas no seu devido tempo. Como resultado, conquistou o reconhecimento dos clientes, reforçando ainda mais uma relação de parceria, essencial no mundo aeronáutico.

A despeito da conjuntura macroeconômica desfavorável, a EMBRAER manteve seu curso de ação estratégica voltada para o futuro, com seu rumo traçado e alicerçado na confiança em suas capacidades essenciais, nas parcerias com clientes e fornecedores e na expansão de sua presença global. Ao longo destes últimos anos, manteve um elevado nível de investimentos em tecnologia, desenvolvimento de novos produtos, capacitação e expansão industrial, produtividade e, ainda, na permanente qualificação e motivação dos seus empregados.

Como resultado efetivo do desenvolvimento de novos produtos, ocorreu no dia 19 de fevereiro de 2002 o primeiro voo do protótipo do EMBRAER 170. Esta aeronave foi totalmente projetada, desenvolvida e construída em apenas 28 meses, por centenas de engenheiros e técnicos da EMBRAER e 16 Parceiros, além de outros 22 principais fornecedores de equipamentos e componentes principais, o EMBRAER 170 não somente inova no uso de novos conceitos, como o da fuselagem em forma de “dupla bolha”, que oferece maior espaço e conforto aos passageiros, além da aplicação da tecnologia *fly-by-wire*, cujos comandos elétricos primários são gerenciados por computador.

No segmento de Defesa, a EMBRAER entregou à Força Aérea Brasileira (FAB) os

cinco primeiros aviões que fazem parte do Sistema de Vigilância da Amazônia, o SIVAM. Foram quatro aeronaves EMB 145 SA para emprego no sistema de Alerta Aéreo Antecipado e Controle e uma EMB 145 RS para Monitoramento Remoto.

Expandindo a presença global da EMBRAER, e ainda mostrando a disposição da empresa em angariar novos mercados, foi assinado, em 2 de dezembro de 2002, em Beijing – China, acordo entre a Embraer e as empresas chinesas Harbin Aircraft Industry Group Co. e Hafei Aviation Industry Co. Ltda., ambas subsidiárias controladas pela China Aviation Industry Corporation II - AVIC II, para a constituição de uma Joint Venture, com 51% das ações com a EMBRAER, cuja planta será localizada na cidade de Harbin – nordeste da China e destinada à montagem final, comercialização e suporte pós venda de aviões da família ERJ 145, para o mercado chinês. Esta empresa recebeu o nome de Harbin Embraer Aircraft Industry Company, Ltda.

O novo cenário da aviação comercial no mundo, conforme mostram os estudos de mercado, será construído em novas bases confirmando a tendência de migração de passageiros de aeronaves maiores para equipamentos de menor porte e de tecnologia moderna, através de um processo de racionalização de rotas e maior eficácia operacional. É neste novo cenário que se encaixa a nova família de jatos EMBRAER, adicionando à bem sucedida família dos ERJ 145, os produtos na faixa de 70 a 108 assentos (aeronaves da família 170 e 190).

A EMBRAER está ampliando ainda, sua participação rumo à pesquisa de novos mercados, colocando no mercado aeronaves executivas para transportar de 6 à 9 pessoas. A EMBRAER estima que exista uma demanda para esta categoria de 3000 jatos e o objetivo da empresa é colocar a primeira aeronave em operação até o ano de 2008 e conquistar 30% deste mercado.

2.4 A Fabricação Aeronáutica

2.4.1 Introdução

A indústria aeronáutica atende a dois mercados: civil (aviões utilizados pelas companhias de tráfego aéreo para transporte de passageiros e cargas) e militar (aviões utilizados para treinamento de pilotos e defesa de territórios), onde aeronaves de diferentes modelos e tamanhos são produzidas.

O processo de fabricação de peças, subconjuntos e montagem de aviões é considerado diferenciado em relação aos outros setores da indústria, no que se refere à capacidade tecnológica, mão-de-obra e regulamentações.

O nível tecnológico exigido para a produção aeronáutica é alto, pois existe uma grande exigência nos padrões de qualidade, confiabilidade e desempenho de seus produtos, o que conseqüentemente requer uma mão-de-obra especializada e qualificada, e que na maioria das vezes é escassa no mercado, necessitando de investimentos em treinamento de pessoal. Outro fator relevante neste ramo é que as curvas de aprendizado parecem não se verificar na produção aeronáutica, porque embora tenda a ocorrer um ganho de aprendizado na produção de uma determinada aeronave, toda vez que ocorre uma modificação significativa na concepção dos produtos ou nos processos de fabricação, tende a iniciar-se um novo período de aprendizado para a produção.

Alem disso, diferentemente de outros setores industriais de produção seriada ou contínua, onde a informatização tem penetrado maciçamente em todas as fases do processo produtivo e onde as novas formas de organização do trabalho estão revolucionando os métodos tradicionais, a fase de montagem de aeronaves conserva características de produção quase artesanal, intensiva em mão-de-obra qualificada e baseada no saber especializado dos

trabalhadores.

Os produtos possuem elevado valor unitário e alto valor agregado e são fabricados em séries relativamente pequenas. Seu ciclo de vida é relativamente alto e a assistência técnica pós-venda é um fator extremamente importante nas decisões de aquisição. As transações são poucos freqüentes, mas de alto valor, sendo comum a produção por encomenda e a existência de uma alta interação entre vendedores e compradores. O mercado de aeronaves está contido num processo de internacionalização, pois os padrões de segurança e desempenho no campo da aviação civil são estabelecidos mediante acordos internacionais. Desta forma, mesmo na improvável situação em que um avião pudesse ser projetado apenas para o mercado interno de um determinado país, ainda assim ele teria que atender aos requisitos e normas internacionais para aquela classe de aviões. Esta situação faz com que a indústria aeronáutica seja uma indústria intrinsecamente internacionalizada, uma vez que mesmo quando orientada para um mercado interno, ela tem que produzir em um patamar de qualidade e desempenho semelhante à fronteira internacional, ao contrário do que ocorre em outros setores, como a indústria automobilística, por exemplo.

Os principais avanços tecnológicos neste campo estão focados na automação das montagens e usinagem de peças em alta velocidade.

Toda a estrutura do avião durante a sua vida útil é altamente exigida em relação à fadiga. Portanto, a grande maioria das fixações na montagem de um avião são feitas com rebites, diferentemente da montagem de um carro, onde o elemento de fixação que predomina é a solda.

A operação de fixação por rebites exige no momento da montagem, a execução de outras operações como: furar, escarear e rebarbar. Isto fez com que a automação no setor aeronáutico não acompanhasse o mesmo desempenho do setor automobilístico, onde a fixação por solda não apresenta sub-operações no momento da montagem.

Atualmente as máquinas de rebiteagem automática conforme exemplo mostrado na Figura 2.2, aumentaram os seus desempenhos, pois as primeiras máquinas apesar de apresentarem uma rebiteagem de qualidade superior à executada pelo homem, tinham uma produtividade inferior à do homem e apresentavam uma limitação quanto à forma das partes a serem juntadas. Atualmente as máquinas modernas apresentam uma produtividade maior do que o homem e não tem limitações quanto à forma das peças a serem unidas.

O uso da automação nas indústrias aeronáuticas é crescente, sendo que uma das últimas novidades neste assunto, refere-se à automação dos gabaritos de junções. Gabarito de junção é o local onde é feita a união das partes que formam a fuselagem do avião, assim como a união das asas com esta mesma fuselagem.

Rebitadora
automática

FIGURA 2.2. Rebitadora automática utilizada na junção de fuselagens

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

Outro avanço em desenvolvimento tecnológico é a execução da montagem final de aviões em linha móvel de montagem. Esta é a ultima manifestação das empresas em relação à manufatura enxuta. “A linha móvel é a ferramenta mais poderosa disponível para identificar e eliminar desperdícios no sistema de produção”, diz Elizabeth Lund, diretora de produção do

Boeing 777. A linha em movimento dirige o sistema, pois faz com que os problemas se tornem visíveis e cria um senso de urgência em resolver a causa raiz de todos os problemas.

Para fazer com que a linha se movimente durante a montagem final, o avião é puxado para frente através de um reboque engatado ao trem de pouso auxiliar (dianteiro). O reboque possui um sensor ótico que segue uma linha branca ao longo do chão. A Figura 2.3 exemplifica a utilização de linha de montagem final móvel na montagem do Boeing 777.

FIGURA 2.3. Linha móvel de montagem final do Boeing 777

(Fonte: revista *Assembly*, dez. 2006)

2.4.2 Critérios para montagem de aeronaves

É de extrema importância a utilização de alguns critérios na montagem final para viabilizar os custos de fabricação do produto e reduzir o ciclo e Hh (hora-homem) do avião, além de gerar aumento de produtividade:

- a) Montagem dos itens caros o mais tarde possível.
 - Menor agregação de custos;
 - Redução do material em processo.

- b) Busca do menor ciclo de montagem.
 - Maior agilidade na produção;
 - Menor quantidade de produtos em montagem.

- c) Redução da utilização de espaço físico.
 - Possibilitar maiores cadências em um mesmo local;
 - *Layout* otimizado, com melhor fluxo e utilização possível.

- d) Otimização da movimentação do produto.
 - Ganho no ciclo das montagens;
 - Redução das atividades que não agregam valor.

Em função das definições básicas do produto (concepção do projeto), deve-se definir um conceito de montagem (linha, doca, com ou sem pré-equipagem, pintura com ou sem asa) e realizar um estudo em termos de:

- Melhor seqüência de montagem (digrama de precedências);
- Ciclo de montagem, ou seja, o tempo necessário para execução de cada atividade e a quantidade de mão-de-obra requerida;
- Número de posições na linha ou quantidade de docas necessárias para os aviões, definidas em função da cadência e plano de produção;
- Quantidade máxima de pessoas distribuídas por região do avião

A montagem final pode ser organizada em sistema de linha ou doca, que podem ser assim definidas:

a) Montagem em linha: é o sistema de produção que se caracteriza pela movimentação do produto e mão-de-obra fixa, durante as etapas do processo produtivo.

Este sistema é muito utilizado na indústria automobilística, onde o carro percorre a linha de montagem e os operadores permanecem em suas posições pré-determinadas.

O esquema abaixo mostrado na Figura 2.4 exemplifica o sistema de produção em linha.

FIGURA 2.4. Conceito de montagem em linha

b) Montagem em doca: é o sistema de produção que se caracteriza por posição fixa do produto e mão-de-obra volante, durante as etapas do processo produtivo.

Neste caso o produto permanece na mesma posição desde o início até a finalização da montagem. Este tipo de sistema de produção é muito comum em estaleiros.

A Figura 2.5 exemplifica o sistema de produção em docas.

FIGURA 2.5. Conceito de montagem em doca

2.4.3 Fases do processo produtivo

A montagem de um avião inicia com a fabricação das peças primárias que são: chapas metálicas, usinados, compostos, tubos, cablagens (cabos elétricos) etc. Em seguida, estas peças vão sendo unidas umas com as outras para possibilitar a formação dos subconjuntos e conjuntos estruturais (painéis, revestimentos, ferragens, longarinas, nervuras, etc).

Conseqüentemente, estes subconjuntos e conjuntos vão se agregando e tomando forma através dos gabaritos maiores e de junções, formando os segmentos.

Os segmentos por sua vez, são equipados com os sistemas do avião (ar condicionado, pneumático, combustível, hidráulico, elétrico, comandos de vôo, motor e trens de pouso). Após a realização da junção asa / fuselagem inicia-se a interligação dos sistemas, testes e montagem final. Em seguida é realizada a pintura, as atividades de preparação para vôo e posteriormente a entrega ao cliente.

A Figura 2.6 mostra o fluxo e etapas da manufatura de uma aeronave.

FIGURA 2.6. Processo de fabricação de uma aeronave

A montagem propriamente dita de um avião, inicia-se com a montagem estrutural, que é a fase onde os segmentos estruturais (seções da fuselagem) do avião são construídos.

Nesta fase, as atividades de furação, rebiteagem e selagem das peças, subconjuntos e conjuntos são predominantes. Essas montagens são executadas através da utilização de gabaritos de montagem, de modo a possibilitar o correto posicionamento e alinhamento das peças.

As Figuras 2.7 e 2.8 a seguir mostram respectivamente o içamento de uma fuselagem traseira de uma aeronave Airbus A380 que deixa o gabarito de montagem após a finalização do segmento e a execução da montagem de um painel lateral a ser utilizado com parte integrante de um segmento (anel de fuselagem) de uma aeronave Boeing 747.

FIGURA 2.7. Fuselagem traseira do Airbus A380 deixando o gabarito

(Fonte: site Airbus, www.airbus.com)

FIGURA 2.8. Montagem estrutural de um painel do Boeing 474

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

Considera-se a fase de montagem final aquela que é compreendida entre o término da montagem estrutural até a disponibilidade e entrega da aeronave ao cliente.

A montagem final é composta pelas seguintes fases:

- a) Pré-equipagem: nesta fase os grandes segmentos começam a receber os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos da aeronave. Inicia-se a instalação dos componentes e equipamentos (cablagens, tubos, cabos, guinhóis, polias, isolamentos, válvulas, dutos, etc) nos grandes segmentos (fuselagem dianteira, central, traseira, estabilizadores e asas). Ocorre também o início parcial dos testes funcionais dos sistemas instalados na pré-equipagem, como testes de vazamentos de linhas de fluido, ajustes de superfícies e regulagens de cabos de comando de voo. A Figura 2.9 ilustra a fase de pré-equipagem dos segmentos de um Boeing 474.

FIGURA 2.9. Pré-equipagem dos segmentos de um Boeing 747

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

- b) Junção das fuselagens: essa etapa é caracterizada pela ligação estrutural entre os grandes segmentos (dianteira, central e traseira) previamente equipados, dando forma à fuselagem do avião.

Esta operação é executada em um importante ferramental, chamado gabarito de junção. No momento da junção o valor agregado da aeronave na montagem (custos do produto até o determinado momento) já é significativo, ultrapassando em alguns casos 40% do custo total. A ilustração (Figura 2.10) mostra abaixo o momento da junção das fuselagens de um Boeing 767.

FIGURA 2.10. Junção das fuselagens de um Boeing 767

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

- c) Equipagem de sistemas: depois de realizada a fase da junção das fuselagens, inicia-se a interligação entre si dos sistemas do avião (elétrico, hidráulico, pneumático, comandos, etc.) instalados parcialmente nos grandes segmentos na fase de pré-equipagem. Posteriormente ocorre a instalação e testes dos demais sistemas que dependem somente da fuselagem.

A Figura 2.11 mostra a seguir um Boeing 737 em fase de equipagem de sistemas, após a finalização da junção das fuselagens.

FIGURA 2.11. Equipagem de sistemas de um Boeing 737

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

- d) Montagem final e testes: é caracterizada pela fase após a junção da asa e da fuselagem, seguida da instalação dos trens de pouso principais e auxiliar. Basicamente, compreende a interligação de sistemas entre a asa e fuselagem, instalação dos aviônicos (equipamento eletrônicos de navegação, comunicação, controle, etc.), instalação dos motores, montagem do interior e os testes funcionais. Nesta etapa ocorre o *power on*, ou seja, a energização do avião. Nesta fase o avião já começa a ser equipado conforme configuração definida pelo cliente, ou seja, todos opcionais definidos para aquele determinado cliente são instalados.

As figuras 2.12 e 2.13 mostradas abaixo ilustram a execução das atividades típicas de montagem final tais como: instalação dos motores e instalação de superfícies de comando, interiores etc., ao longo da linha de montagem final.

FIGURA 2.12. Instalação dos motores de um Boeing 767

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

FIGURA 2.13. Linha de montagem final do Boeing 737

(Fonte: site Boeing, www.boeing.com)

- e) Pintura: compreende a pintura final da aeronave, conforme logotipo e esquema de pintura definido pelo cliente em questão (Figura 2.14).

FIGURA 2.14. Pintura de uma aeronave comercial

(Fonte: site Airbus, www.airbus.com)

- f) Preparação para voo e entrega: atividades operacionais e vistorias, basicamente sem instalações. É caracterizada pela complementação dos testes que necessitam de giro de motor, compreendendo também a inspeção final, vistoria dos órgãos homologadores e vôos de produção, até a disponibilização da aeronave para entrega ao cliente (Figura 2.15).

FIGURA 2.15. Aeronave Airbus A320 pronta para o cliente TAM

(Fonte: site Airliners, www.airliners.net)

Sendo assim, este capítulo mostrou um apanhado geral da indústria aeronáutica no mundo e no Brasil, seu surgimento, a evolução no tempo, os principais acontecimentos e inovações e a condição atual nos dias de hoje. Foi também explanado o conceito de montagem aeronáutica baseado nos sistemas de produção utilizados nas indústrias desse segmento e as diferentes fases do processo produtivo, até a entrega da aeronave ao cliente.

O próximo capítulo faz um relato sobre o DFMA, seus conceitos, regras e aplicação, que foi utilizado como referência e base para o desenvolvimento da ferramenta em questão.

CAPÍTULO 3 – DFMA, CONCEITO, REGRAS E APLICAÇÃO

3.1 História do DFMA

O *Design for Manufacturing and Assembly* é uma técnica utilizada durante o desenvolvimento e melhoria de produtos, que tem como objetivo proporcionar a facilidade da manufatura e redução de custos.

Os conceitos da metodologia de *Design for Manufacturing and Assembly* começaram a serem desenvolvidos quando Eli Whitney, que trabalhava para o governo norte-americano, recebeu a incumbência de desenvolver sistema de manufatura de armas. Ele criou uma produção com peças intercambiáveis que substituiu a fabricação manual, onde nenhuma arma era igual à outra e as peças não podiam ser trocadas. Whitney reprojeteu cada peça com uma tolerância limitada e dimensões específicas e padronizadas.

Décadas mais tarde, Henry Ford, com o seu automóvel “*Model T*”, desenvolveu um revolucionário sistema de montagem, onde os veículos eram manufaturados manualmente em uma linha de produção, com peças padronizadas e projetadas para atender este processo. Deste modo, Ford atingiu um excelente resultado reduzindo custos de fabricação com alta confiabilidade, qualidade e simplicidade, tornando-se, então, um dos mais famosos engenheiros do setor automotivo.

Roger W. Boltz foi uma das primeiras pessoas a lançar as bases da metodologia DFM, apesar de ainda não utilizar esta nomenclatura. Boltz publicou diversos artigos sobre vários processos de manufatura do ponto de vista da engenharia de produtos. Em 1947, todo este

material foi compilado em um único livro chamado “*Production Process – the Producibility Handbook*”. Este livro foi editado diversas vezes até 1981.

Em 1960, a *General Electric* lançou o livro “*Manufacturing Producibility Handbook*” e começou a utilizar o termo “*Producibility*” para identificar esta técnica; anos mais tarde, este termo começou a ser substituído por *Design for Manufacturing*.

O *Design for Assembly* surgiu, tempos depois, com Geoffrey Boothroyd que ampliou a metodologia do *Design for Manufacturing* para a montagem automática, projetando o produto de forma que pudesse atender esta nova condição. O DFA, além de atender o processo automático, passou também a facilitar a montagem manual dos componentes.

Em 1968, Boothroyd, junto com A. H. Redford, publicaram o livro “*Mechanized Assembly*” em que escreveram um guia para engenheiros e projetistas com as técnicas para desenvolvimento de um produto, atendendo as condições necessárias para a montagem automática e manual.

Boothroyd ficou bastante conhecido ao lado de outro colega Peter Dewhurst, pela enorme contribuição que esta técnica trouxe para o desenvolvimento de produtos. A aplicação da metodologia DFA pode ser considerada como a mais significativa redução de custos e simplificação de produtos de todo *Design for Manufacturing*.

Atualmente, o conceito do *Design for Manufacturing* foi expandido para outras áreas, ficando genericamente conhecido como *Design for Excellence (DFX)*, que engloba o *Design for Manufacturing*, *Design for Assembly*, *Design for Higher Quality*, *Design for Cost*, *Design for Environment* entre outros.

3.2 *Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)*

O objetivo do *Design for Manufacturing (DFM)* é desenvolver um produto que atenda todos os requisitos funcionais e que também seja de fácil manufatura, o que diminuirá os custos de produção. Esta técnica é composta por vários princípios, conceitos, regras e recomendações que guiam o projetista para o desenvolvimento do melhor produto do ponto de vista da sua fabricação. Já o *Design For Assembly (DFA)* tem por objetivo racionalizar a etapa de montagem por meio da redução do número de peças e da facilidade de montagem, analisando separadamente a função, forma, material e montagem de cada uma das peças e assim desenvolver um produto simples e funcional.

Segundo Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994) “*Manufacturing*” deve ser entendido como a operação de fabricar um componente individual, enquanto “*Assembly*” é a simples montagem de mais de um componente formando o produto final; portanto, DFM e DFA devem ser entendidos e aplicados de maneira distinta. Contudo, sempre que possível, o *Design for Manufacturing* e o *Design for Assembly* devem ser usados simultaneamente, visando reduzir a complexidade e o número de peças tanto na fabricação dos componentes como na montagem final do produto e evitando que as modificações do produto sugeridas pelo DFM aumentem a dificuldade do processo de montagem, fazendo com que o DFA não possa ser aplicado na sua íntegra.

O uso do *Design For Manufacturing and Assembly* traz grandes benefícios ao produto final, tais como: melhoria na qualidade, diminuição do número total de peças, simplificação do processo de montagem e do produto, padronização, modularização, confiabilidade e significativa redução de custos de produção e incentivo ao trabalho em equipes multidisciplinares (Engenharia Simultânea).

3.3 Fases do Projeto do Produto

Kaminski (2000) define o processo de desenvolvimento de produtos com sendo: “conjunto de atividades envolvendo quase todos os departamentos da empresa, que tem como objetivo a transformação de necessidades de mercado em produtos ou serviços economicamente viáveis”. Ele ainda acrescenta que o desenvolvimento de produtos é uma atividade influenciada e que influencia fatores econômicos, culturais, sociais, tecnológicos e políticos da comunidade a que se destina, mudando hábitos, costumes e até mesmo gerando novas necessidades.

Em sua obra, Kaminski (2000) explica que o desenvolvimento de produto deve considerar todo o ciclo de produção e consumo; deste modo, propõe a divisão do processo de desenvolvimento do produto em sete etapas, que vão desde a busca das necessidades do mercado, até o descarte final do produto, conforme explicado a seguir:

1. *Estudo da viabilidade*: é primeira fase do desenvolvimento: esta etapa é a responsável por determinar as possíveis alternativas para a solução do problema, identificando as necessidades e especificando as exigências;
2. *Projeto básico*: durante esta etapa, os responsáveis devem escolher e especificar a melhor alternativa de todas as proposta anteriores;
3. *Projeto executivo*: esta fase tem por objetivo desenvolver a especificação completa do produto, bem como testá-lo e garantir que está pronto para a produção. Este período do desenvolvimento ainda é propício para realização de alterações que se tornarem necessárias, sem prejuízos econômicos. Contudo, o projeto pode ser ainda abandonado caso o produto não possua condições para a produção;

4. *Planejamento da produção / execução*: esta fase elabora o planejamento da produção, que inclui a compra de todos os equipamentos e dispositivos necessários, determinação do processo de montagem, qualificação dos fornecedores, mão-de-obra, etc;
5. *Planejamento da disponibilização ao cliente*: esta etapa tem como objetivo planejar como o produto irá chegar até o cliente; cabe ao projetista, por exemplo, definir a embalagem, o transporte e a divulgação do produto;
6. *Planejamento do consumo ou utilização do produto*: o projetista deve também prever como o produto será utilizado ou consumido; o produto deve ser de fácil manutenção, alta confiabilidade, segurança, etc.; informações de campo são extremamente valiosas para que o produto possa ser melhorado;
7. *Planejamento do abandono do produto*: o produto pode ser descartado por duas razões, a obsolescência técnica ou desgaste; o caso ideal acontece quando a obsolescência técnica e o desgaste ocorrem ao mesmo tempo; para isso, o projetista deve utilizar uma tecnologia adequada para reduzir a velocidade da obsolescência, e projetar para que a vida útil coincida com o tempo de utilização.

Sousa (1998) explica as definições das etapas do processo do projeto e afirma que o “processo deve ser baseado no conceito do ciclo de vida do produto e constituído de seis fases”:

1. *Desenvolvimento / planejamento de especificações*: fase pré-conceitual, onde o problema deve ser compreendido para permitir o desenvolvimento das suas soluções;
2. *Projeto conceitual*: a idéia do produto deve ser definida para dar prosseguimento às outras fases do processo;

3. *Projeto do produto*: o projeto conceitual é detalhado e desenvolvido completamente, ficando assim pronto para a fabricação; nesta fase o processo de planejamento da manufatura começa a ser definido;
4. *Produção*;
5. *Uso ou serviço*;
6. *Descarte ou renovação do produto*.

Pahl & Beitz (1988) subdividem as etapas em quatro fases, conforme descritas a seguir:

1. *Esclarecimento da tarefa*: as necessidades do produto são identificadas, especificando dados do projeto;
2. *Projeto conceitual*: a idéia conceitual do projeto é gerada;
3. *Projeto preliminar*: detalhes do projeto conceitual começam a ser desenvolvidos e definidos;
4. *Projeto detalhado*: o projeto preliminar é totalmente desenvolvido dando origem ao produto final;

Deste modo, pode-se notar que, apesar dos autores citados utilizarem nomenclaturas e divisões diferentes, o conteúdo das etapas do desenvolvimento é praticamente igual.

Neste contexto, podemos identificar as etapas do desenvolvimento do produto como:

1. *Identificar a necessidade do mercado consumidor*;
2. *Especificar as funções do produto*;
3. *Especificar as características principais do projeto*;
4. *Elaboração da idéia conceitual do projeto*;
5. *Detalhamento da idéia conceitual, definindo alguns detalhes do produto, como*

por exemplo, a sua forma;

6. *Desenvolvimento final do produto.*

3.4 Aplicação do DFMA no desenvolvimento do produto

Segundo Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994), o DFMA deve ser utilizado, com maior ênfase, no início da fase conceitual do projeto, pois nesta etapa, os custos de modificações são mais baixos e o tempo de duração do projeto pode ser reduzido, disponibilizando o produto mais rápido para o mercado e com um preço significativamente menor.

Deve-se salientar também a importância dos aspectos de qualidade nesta fase do projeto, visto que implementá-la em um produto já desenvolvido é muito difícil.

A Figura 3.1 mostra a necessidade da aplicação do DFMA no Projeto Conceitual com o objetivo de reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento.

Pode-se observar que estas técnicas quando aplicadas já na fase de concepção e detalhamento, fazem com que o ciclo retorne à fase do projeto conceitual, já que as sugestões para simplificação da estrutura do produto e para materiais e processos mais econômicos ainda são mais simples.

FIGURA 3.1. Estrutura da aplicação do DFMA no processo de projeto

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

Durante o projeto conceitual, as técnicas de *Design for Manufacturing and Assembly* são utilizadas para avaliar quais das concepções alternativas são viáveis para serem detalhadas no projeto preliminar. Deve-se dar atenção a informações sobre manufatura, material, produto e montabilidade.

Para uma análise eficiente, Sousa (1998) apresenta 04 técnicas que podem ser usadas: *julgamento de praticabilidade* (utiliza o bom senso da equipe), *disponibilidade tecnológica* (analisa a existência de tecnologia para se projetar o produto), *avaliação baseada no passa / não passa* (as alternativas devem atender os requisitos dos clientes internos e externos) e a *matriz de decisão* (deve ser determinada a melhor alternativa de concepção, aquela que mais se adequa aos requisitos dos clientes e que apresente a melhor condição de montagem).

Deve-se analisar, ainda, nesta fase do projeto, se as alternativas apresentadas até este ponto atendem os requisitos de funcionalidade do produto e os requisitos de manufatura e montagem. Definições mais detalhadas do projeto, como por exemplo, geometria, material, etc., serão discutidas durante o projeto preliminar e detalhado.

A Figura 3.2 compara o desenvolvimento do produto com e sem a aplicação do DFMA e confirma que a aplicação do DFMA no início do projeto reduz o tempo total de desenvolvimento.

FIGURA 3.2. Redução de tempo quando aplicado no início do projeto

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

Pode-se notar que, apesar da fase conceitual do projeto com DFMA ter um tempo de duração maior em relação ao projeto que não utiliza estas técnicas, a duração total do mesmo é consideravelmente menor, pois o tempo gasto no detalhamento do projeto e nas modificações e prototipagem são reduzidos.

3.5 Resistências encontradas durante a implementação do DFMA

Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994) comentam que o DFMA deixa de ser implementado devido a resistência humana perante a assuntos novos e desconhecidos. Escusas, como as citadas a seguir, são comumente utilizadas para justificar a não utilização da metodologia.

1. *Não tem tempo*: engenheiros comumente reclamam da falta de tempo durante o desenvolvimento de produtos e da necessidade de minimizar o tempo de projeto para manufatura.
2. *Síndrome do bebê feio*: deve-se tomar muito cuidado quando se critica um projeto / produto que outra pessoa desenvolveu; Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994) comparam a crítica ao projeto com dizer para a mãe que seu bebê é feio. Eles recomendam que os projetistas sejam convidados a participar da análise desde o início para que eles próprios possam chegar à conclusão de necessidade de modificação do projeto.
3. *Baixos custos de montagem*: é comum se ouvir que casos onde os custos de manufatura e montagem são extremamente baixos em comparação com o material envolvido não são indicados para a análise do DFMA. Deve-se lembrar, porém, que esta técnica não prevê somente a montagem ou manufatura, mas também a análise do produto. Um estudo de DFMA de um produto como este pode resultar na modificação dos componentes, reduzindo o custo final.
4. *Baixo volume*: o DFMA deve ser aplicado também para produtos com baixos volumes de produção. Existem casos onde o protótipo construído durante o desenvolvimento se torna o produto final, mesmo que sua montagem seja

complexa e difícil. A análise de DFMA, neste caso, poderia reduzir o custo de manufatura do produto.

5. *Nós temos feito isso por anos:* muitas vezes o *Design for Producibility* é confundido com o DFMA, e faz com que os projetistas acreditem que já estão aplicando a metodologia por algum tempo. O *Design for Producibility* é o detalhamento do projeto de uma peça individual de uma montagem, visando facilitar a fabricação; o maior problema é que este detalhamento ocorre no final do projeto, onde o custo das mudanças é mais alto.
6. *É somente uma análise do valor:* o DFMA é comumente confundido com a Análise do Valor, porém, embora a Análise do Valor seja uma técnica que compara e questiona o valor de cada componente do produto, eliminando e melhorando o projeto, ela se diferencia do DFMA quando da sua aplicação; a Análise do Valor é tipicamente utilizada em estágios mais avançados do desenvolvimento, enquanto que o DFMA apresenta melhores resultados quando aplicado na fase conceitual.
7. *DFMA é uma técnica que gera produtos com maior dificuldade para serviços:* esta afirmação não pode ser considerada como realidade, uma vez que a experiência mostra que produtos mais fáceis de montar também são mais fáceis para desmontar.

3.6 Princípios e Regras do DFMA

O *Design for Manufacturing and Assembly* leva em consideração a função, forma, o material e a montagem de cada peça de modo a desenvolver um produto funcional e simples, minimizando e/ou incorporando peças do sistema e reduzindo o custo do produto e da montagem. Neste contexto, foram criados vários princípios que auxiliam os projetistas a desenvolver um produto, atendendo os requisitos básicos da metodologia DFMA.

Os princípios utilizados para desenvolver um produto, dentro do contexto do DFMA, são encontrados na literatura. Os tópicos a seguir discutem as principais regras que devem ser aplicadas para conseguir um produto que atenda todas as necessidades do cliente.

1) Minimização do número de peças

Este é um dos princípios mais evidente e importante de todos, pois, com a redução do número de peças, o custo do produto, da montagem e o tempo de montagem também podem ser reduzidos, simplificando o produto final. Sempre que possível, as peças devem ser combinadas, formando o menor número possível para a montagem, eliminando operações de montagem e submontagem.

Segundo Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994), para verificar se o componente é realmente necessário no produto, as seguintes perguntas devem ser respondidas. Se a resposta for afirmativa para uma das perguntas, significa que a peça deve continuar separada das demais e que não pode ser eliminada.

1. O componente tem movimento relativo ao conjunto?
2. O material do componente deve ser diferente do material do conjunto?
3. O componente deve ser separado para permitir a desmontagem e remontagem

do conjunto?

Sousa (1998) comenta, ainda, que o componente deve permanecer separado dos demais quando existe alguma restrição técnica de manufatura e quando a combinação e eliminação dificultam o acesso a outras montagens.

Bralla (1996) cita alguns aspectos que devem ser analisados para combinar as peças de um produto:

1. Incorporar dobradiças: as dobradiças podem ser incorporadas em vários materiais plásticos e flexíveis;
2. Incorporar molas: molas podem ser incorporadas em materiais como metais, plásticos e, em alguns casos, fibras;
3. Uso de elementos de encaixe, incorporados na peça, em troca de parafusos;
4. Incorporar elementos como guias e coberturas.

Em sua obra, Bralla (1996) cita, ainda, um trecho do texto de Stoll que diz:

“Menor número de peças significa menos tudo que é necessário para manufaturar um produto. Isto inclui tempo de engenharia, desenhos e números de peças, controle de produção e inventário; número de pedidos de compra, vendedores, etc.; número de caixas, *containers*, armazém, *buffers* etc.; número de equipamentos de manuseio, *containers*, número de movimentos etc.”

2) Montagem modular ou com componente-base

A montagem com componente-base é uma técnica utilizada que visa o uso de apenas uma base para a produção de produtos diferentes; esta técnica permite também a incorporação

de componentes de fixação e características de alinhamento, facilitando a montagem e reduzindo o custo do produto.

A montagem modular tem como objetivo diversificar produtos a partir da combinação de módulos intercambiáveis e funcionalmente independentes, como por exemplo, componente-base. Este conceito traz como vantagem uma maior agilidade e flexibilidade ao processo.

3) Padronização de componentes

A padronização de componentes implica na redução da variação de peças em uma linha de montagem, redução de tempo com engenharia no desenvolvimento de novos componentes, redução no manuseio, otimização da montagem, padronização de ferramentas, redução de treinamento de pessoal e aumento da qualidade e confiabilidade do produto entre outros.

Deste modo, sempre que possível, o conceito de padronização de componentes deve ser utilizado, a fim de facilitar a montagem, diminuir custos com equipamentos, peças estocadas na linha e custo final do produto.

Este conceito deve ser amplamente utilizado quando se trata de componentes de fixação, pois, quanto mais padronizados forem, menor será o número de ferramentas, treinamento e variação na linha de montagem.

A padronização de produtos em uma mesma linha de montagem ajuda a reduzir o custo do produto final, e deve ser aplicado sempre que possível.

Quando o produto é padronizado, custos com mão-de-obra, treinamento, ferramentas, etc., podem ser reduzidos. Sousa (1998) comenta que, quando a padronização é inevitável, “sempre que possível, deve-se incorporar características para todas as variantes do produto

numa submontagem comum”.

A Figura 3.3 mostra um exemplo onde o projeto antigo foi concebido com dois tipos de parafusos diferentes para fixação, um para porca solta e o outro para porca fixa. Após a revisão do projeto (novo), houve a padronização dos prendedores, sendo que os dois lados da peça passaram a ser fixados pelo mesmo parafuso e mesma porca.

FIGURA 3.3. Peças padronizadas
(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

4) Projeto de peças com características autofixadoras

Sempre que possível, deve-se projetar peças com características autofixadoras de modo a eliminar componentes, como por exemplo, parafusos, porcas e arruelas, e facilitar a montagem e desmontagem do produto.

Segundo Sousa (1998), alguns caminhos para se usar a autofixação são:

1. Projetar encaixes em peças plásticas (exemplo: *snap*s);
2. Criar características do tipo *tab-in-slot* em chapas metálicas de modo a utilizar

o menor número de fixadores.

A Figura 3.4 representa o aumento do custo do projeto em função da complexidade de montagem, ou seja, quanto maior o número de prendedores, mais caro o produto final.

FIGURA 3.4. Métodos comuns de fixação

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

5) Montagem empilhada ou unidirecional

Durante o projeto de um produto, deve-se sempre dar preferência para a montagem unidirecional, utilizando sempre a lei da gravidade, ou seja, de cima para baixo. A montagem empilhada ou unidirecional reduz o número de reorientações do componente durante a sua montagem, facilitando o processo de fabricação.

A Figura 3.5 mostra um exemplo de montagem unidirecional, onde a peça base (peça inferior), recebe as demais peças de forma seqüencial de cima para baixo, facilitando a orientação das demais e minimizando erros de montagem.

FIGURA 3.5. Montagem empilhada ou unidirecional

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

6) Projetar peças com características de autolocalização

Os projetistas devem, sempre que possível, desenvolver componentes com características de autolocalização, visando uma montagem precisa, sem ajustes, rápida e fácil. Peças com estas características reduzem o tempo de montagem e aumentam a qualidade do produto, além de permitirem que a montagem seja feita automaticamente por um equipamento.

Características de autolocalização podem ser conseguidas no componente por intermédio de chanfros, rebaixos etc.

A Figura 3.6 ilustra a diferença entre dois projetos, um concebido com características de autolocalização para facilitar a montagem (B) e outro que não possui (A). Um exemplo disso é a inclusão de chanfros na peças do projeto (B), que tem por finalidade facilitar os

encaixes proporcionando uma montagem mais precisa, simples e sem ajustes, ao contrário do projeto (A) que não possui estas características.

FIGURA 3.6. Peças com características de autolocalização

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

7) Minimização de níveis de montagem

Deve-se prever a possibilidade de submontar componentes de um produto antes da sua montagem final. Esta técnica simplifica o processo de fabricação e documentação e facilita o layout da fábrica, além de aumentar a flexibilidade da programação da produção.

A submontagem de componentes, além de facilitar a manufatura, traz também benefícios para o cliente, pois este processo aumenta a qualidade e confiabilidade do produto e facilita e simplifica a manutenção do mesmo.

8) Facilidade de manipulação de peças

Deve-se projetar componentes com peso reduzido e que permitam fácil manipulação, facilitando a montagem e reduzindo o tempo com a operação.

Segundo Sousa (1998), os principais fatores que afetam a manipulação são:

1. Geometria: pode ser simplificada pelo emprego de formas regulares;
2. Rigidez: evitar materiais macios, moles, pontiagudos ou frágeis;
3. Peso: evitar componentes pesados;
4. Não utilizar peças muito pequenas, muito grandes ou escorregadias que possam dificultar o manuseio;

A Figura 3.7 ilustra as condições das peças que afetam a manipulação.

FIGURA 3.7. Peças muito pequenas, escorregadias, pontiagudas e flexíveis

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

5. Peças simétricas reduzem a orientação e a ocorrência de falhas durante a montagem; se a simetria não for possível, projetar características obviamente assimétricas; a Figura 3.8 exemplifica a seguir as características de simetria.

FIGURA 3.8. Peças simétricas em relação suas possibilidades de montagem

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

6. Não utilizar peças que possam ficar presas ou emaranhadas (Figura 3.9);

FIGURA 3.9. Peças possíveis de ficar presas e emaranhadas

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

7. Considerar o empacotamento individual das peças
8. Usar furos ovais para evitar ajustes;
9. Usar as propriedades elásticas dos plásticos como uma vantagem;
10. Facilitar o acesso ao componente, maximizando o espaço disponível;
11. Evitar utilizar peças que necessitem serem manipuladas por duas ou mais mãos.

9) Projeto para estabilidade

Deve-se evitar projetar peças que possam se movimentar durante a montagem; as peças devem permanecer estáticas durante a operação. Deste modo, o operador não precisa se preocupar e perder tempo com o processo, pois os componentes envolvidos permanecerão imóveis durante a montagem, não havendo risco de perdê-los.

10) Minimização da necessidade de ajustes

A eliminação, ou redução, de ajustes durante a montagem ajuda a diminuir o tempo do processo, facilitar a manufatura e aumentar a qualidade e confiabilidade do produto; deste modo, esta técnica deve ser adotada sempre que possível.

Definir corretamente as tolerâncias geométricas das peças, de modo a possibilitar as montagens fáceis, ideais e livres de necessidades de ajustes na montagem.

11) Otimização da seqüência de montagem

A seqüência de montagem deve ser determinada através da coerência na montagem do

produto. Quanto mais otimizado for, melhor será a manufatura do produto, reduzindo tempo e facilitando a sua montagem.

Uma das técnicas utilizadas para determinar a seqüência de montagem é determinar a seqüência de desmontagem; segundo Sousa (1998), duas suposições são feitas:

1. Desmontagem é um processo no qual cada peça pode ser retirada da estrutura, sem prejudicar a estrutura da submontagem;
2. A seqüência de montagem é o inverso da seqüência de desmontagem.

Segundo Sousa (1998), uma seqüência eficiente é aquela que:

1. Possui o menor número de passos;
2. Evita o risco de danificar as peças;

Evita posições instáveis ou inseguras para o produto, operários ou equipamentos durante a montagem.

3.7 Design for Excellence (DFX)

Atualmente, o mercado consumidor exige muito mais do produto do que apenas o preço mais atrativo trazido pela aplicação do DFMA. Em função da grande concorrência e para atrair a atenção dos clientes, o produto deve possuir também outros atributos.

Neste contexto, surgiu o *Design for Excellence (DFX)*, que é definido por Bralla (1996) como sendo uma “*base de conhecimentos para aproximar ao máximo o projeto do produto das suas características desejáveis, como alta qualidade, confiabilidade, facilidade de manutenção, segurança, facilidade de uso, preocupação com o meio ambiente, redução do prazo de disponibilização para vendas e ao mesmo tempo reduzindo os custos de manufatura*”

e manutenção do produto”.

O *Design for Excellence (DFX)* é uma metodologia desenvolvida para estabelecer regras, procedimentos e métodos, de modo a guiar os projetistas para um produto que atenda todos os requisitos esperados pelo mercado consumidor.

O esquema representado na Figura 3.10 mostra a abrangência da técnica DFX. Pode-se notar que apesar do DFX ter sido desenvolvido através do sucesso dos conceitos da metodologia DFMA, o seu escopo passou a englobar também esta técnica. Verifique-se ainda que o DFM e o DFA se completam, formando o DFMA.

FIGURA 3.10. Design for Excellence (DFX)

A sigla DFX possui vários significados. Segundo Bralla, DFX significa “*projeto par todos os fatores que o produto deve ter*” e “*projeto para a excelência*”; para Meerkamm (1994), DFX significa “*projeto para propriedades*”.

Alguns dos elementos DFX serão discutidos nos tópicos a seguir.

1) Design for Higher Quality

Corbett et al. (1991) definem qualidade como “*satisfazer ou exceder as expectativas do cliente*”. A qualidade do produto existe quando este é capaz de desempenhar as funções determinadas em projeto nas condições especificadas, atingindo a completa necessidade do mercado consumidor em relação aquele produto.

Kaminski (2000) afirma que “*para que um produto tenha desempenho satisfatório em serviço, é necessário que o projeto tenha qualidade intrínseca, ou seja, se o produto for produzido de acordo com o projeto, ele apresentará confiabilidade, disponibilidade, segurança, qualidade, etc*”.

Portanto, para que o produto possa ser produzido conforme o projeto, este dever atender os requisitos de manufatura; deste modo, torna-se necessária a aplicação do DFMA e do *Design for Higher Quality*, durante o desenvolvimento do produto, para se alcançar uma qualidade desejada pelo mercado consumidor.

Deve-se lembrar ainda que muitas dessas modificações sugeridas pelo DFMA, além de trazerem redução de custos e facilitarem a fabricação, auxiliam também no aumento da qualidade do produto. Porém, algumas sugestões propostas pelo DFMA podem acarretar na perda da qualidade, neste caso, esta alternativa deve ser analisada cuidadosamente para evitar impacto no produto e na sua manufatura.

Outro aspecto que deve ser analisado é a redução de custos de manufatura, garantia e manutenção dos produtos com o aumento da qualidade. Bralla (1996) afirma que a qualidade reduz custos relacionados a retrabalhos e produtos rejeitados; e, por outro lado, aumenta significativamente as vendas e o volume de produção.

Bralla (1996) afirma, ainda, que a qualidade do produto pode ser medida de acordo com a satisfação do cliente. Quando o produto atende todos os requisitos do consumidor,

pode-se dizer que possui alta qualidade. Alguns aspectos podem se utilizados para avaliar a qualidade do produto, como por exemplo: facilidade de uso e manutenção, economia, segurança etc.

Segundo Bralla (1996), o produto alcança a qualidade ideal quando sua performance plena ocorre nas seguintes situações:

1. Toda vez que é utilizado;
2. Sob condições específicas de operação determinadas em projeto;
3. Por toda sua vida;
4. Sem problemas colaterais causados por má qualidade de suas peças.

O usuário deve estar ciente que não é apenas o projeto que garante a alta qualidade dos produtos, e sim todas as etapas da vida deste, que vão desde o desenvolvimento do produto até sua produção, distribuição, uso e manutenção. Deve-se notar ainda que a maior parte das falhas que ocorre durante a produção está relacionada à falha de projeto, sistema e métodos de montagem e não ao operador; portanto, a qualidade deve ser garantida durante o desenvolvimento do produto e processo.

Assim todo o processo de fabricação deve ser cuidadosamente executado, por todos os envolvidos, para garantir a qualidade do produto em mais esta etapa da sua vida. Deste modo, a metodologia do Gerenciamento da Qualidade Total (*Total Quality Managment – TQM*) é aplicada.

Dentro do escopo do TQM, a empresa deve fazer com que todos os funcionários envolvidos entendam as reais necessidades do cliente, além de incorporar a filosofia de melhorias contínuas durante toda a vida do produto, para garantir que as expectativas do cliente sejam sempre atendidas.

Além do comprometimento dos funcionários, desde o desenvolvimento do produto até sua produção e venda, Bralla (1996) ainda cita outras ferramentas e conceitos que devem ser

utilizados no controle da qualidade da produção para atender plenamente a filosofia do TQM, como por exemplo:

1. CEP (Controle Estatístico de Processo): é uma ferramenta que utiliza a estatística para identificar e corrigir falhas no processo que afetam a qualidade do produto;
2. Esforço para eliminar erros, cuja meta é a perfeição;
3. Prevenção dos defeitos antes mesmo que eles possam ocorrer;
4. Melhorias contínuas do produto e qualidade;
5. *QFD (Quality Function Deployment)*: um sistema utilizado para traduzir os requisitos desejados pelo mercado consumidor para todas as áreas e etapas da fabricação do produto, incluindo desenvolvimento do projeto, engenharia de produtos, manufatura, *marketing*, vendas e distribuição.

2) Design for Reliability

A confiabilidade do produto pode ser definida como: “*A medida da habilidade de um produto operar com sucesso, quando solicitado, por um período de tempo pré-determinado, e sob condições ambientais específicas. É medida com uma probabilidade*” (*European Organization For Quality Control, 1965*).

Em outras palavras, a confiabilidade representa a probabilidade do produto, sistema ou processo funcionar, quando necessário, e por um período de tempo pré-determinado, respeitando as características funcionais, temporais e ambientais determinadas em projeto.

A confiabilidade pode ser medida também pela taxa de falhas ou pelo tempo que leva até um determinado componente falhar; acontece sempre quando este não atende as condições esperadas de funcionamento, dentro das características para as quais ele foi projetado.

Deve-se considerar, durante o projeto, que a confiabilidade está diretamente relacionada com o número de componentes existentes no produto; quanto maior, menor será a confiabilidade, pois a possibilidade de ocorrência de uma falha aumenta proporcionalmente. Pode-se sugerir, nesta fase, um estudo de DFMA visando reduzir o número de peças e facilitar a montagem deste produto, evitando falhas e aumentando a confiabilidade final.

A curva da banheira, como é conhecida e mostrada na Figura 3.11 a seguir, representa o comportamento da taxa de falhas de um determinado componente ou sistema em função do tempo. Este nome é dado devido ao formato da curva, que, na maioria das vezes, possui a forma de uma banheira; a exceção é dada apenas aos sistemas que possuem redundância.

A curva da banheira pode ser dividida em três regiões. A primeira representa a fase onde o sistema apresenta falhas prematuras, causadas principalmente por problemas ocorridos durante montagem ou por componentes com defeitos. Pode-se notar que no início a taxa de falhas é elevada, mas decresce com o tempo. A segunda região possui taxa de falhas constante e a chance de falhar passa a ser aleatória, não mostrando indícios de que irá ocorrer. A terceira região representa o fim da vida operacional do sistema, a taxa de falhas cresce devido ao envelhecimento funcional dos componentes, fadiga e corrosão.

FIGURA 3.11. Curva da banheira

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight (1994)).

O projeto do produto deve ser eficiente a ponto de prevenir que ocorram falhas prematuras, causadas por montagem ou componentes defeituosos. Deste modo, a primeira região da curva da banheira pode ser significativamente reduzida ou até mesmo eliminada.

Neste contexto, o DFMA desponta, ao lado do *Design for Reliability*, como uma ferramenta para simplificar o projeto do produto, facilitando a sua montagem, evitando que erros causem a “morte” prematura dos componentes do produto e aumentando assim a confiabilidade.

Em sua obra, Bralla (1996) define algumas regras que podem aumentar a confiabilidade de produtos, como por exemplo:

1. Simplificar ao máximo o produto e conseqüentemente a sua montagem; desta forma a confiabilidade será automaticamente aumentada, uma vez que a probabilidade de erro é diminuída com a redução da complexidade;
2. Aumentar a confiabilidade dos componentes do produto;
3. Projetar produtos de fácil manutenção preventiva e pró-ativa e reparos; deste modo, a falha de alguns componentes se torna menos crítica;
4. Prever possíveis problemas ambientais no projeto, como por exemplo: calor externo, umidade, interferências etc.;
5. Padronizar peças, utilizar componentes encontrados no mercado em troca de projetos;
6. Projetar pensando na montagem e prevenindo possíveis falhas causadas por operadores;
7. Projetar produtos que possam ser testados facilmente.

Deve-se, porém evitar que a aplicação cega de regras de DFMA afete a confiabilidade do produto e vice-versa. Bralla (1996) cita algumas regras de DFMA e confiabilidade que

podem conflitar entre si, tais como:

1. *Tolerâncias maiores*: o aumento das tolerâncias do produto facilita sua fabricação e montagem; porém, aumentam as variações dos componentes, podendo causar impactos na qualidade, performance e confiabilidade do mesmo;
2. *Eliminação de ajustes*: a eliminação dos ajustes na produção implica na modificação do dimensional dos componentes; porém, para garantir uma confiabilidade e qualidade adequada, o controle de produção dos componentes deve ser rigoroso, evitando variações;
3. *Redundância*: a redundância muitas vezes é utilizada para aumentar a confiabilidade; quando um componente importante falha, existe outro para suprir a função. Este princípio da confiabilidade vai contra à redução do número de peças proposto pelo DFMA.

Resumindo, as regras de DFMA e confiabilidade devem ser analisadas cuidadosamente para evitar que modificações propostas para atender o DFMA impliquem na redução da confiabilidade e qualidade do produto.

3) Design for Serviceability and Maintainability

O *Design for Serviceability and Maintainability* visa desenvolver o produto que apresente facilidade de manutenção e serviços durante toda a sua vida.

Os custos de manutenção de um produto podem causar a insatisfação do cliente, e é por esta razão que este aspecto deve ser amplamente abordado durante o desenvolvimento do projeto do produto.

Na maioria dos casos, a aplicação do DFMA e a consequência simplificação do produto faz com que automaticamente a manutenção deste seja beneficiada. Porém, apenas o DFMA não é suficiente para resolver problemas de manutenção do produto, o que torna necessária a aplicação de princípios específicos para esta finalidade.

Em sua obra, Bralla (1996) cita algumas regras que devem ser aplicadas quando se objetiva melhorar e reduzir custos de manutenção e serviços, como por exemplo:

1. Aumento da confiabilidade: conforme comentado no item que trata sobre a confiabilidade, quando maior for o número, menor será a probabilidade do componente ou produto falhar e, portanto, menor será a necessidade de manutenção;
2. Projetar produtos garantindo que os componentes que necessitam de manutenção periódica estejam visíveis, com fácil acesso, inspeção e sejam simples de serem testados;
3. Projetar módulos que possam ser trocados, facilitando a manutenção. As principais vantagens do uso de módulos são: a simplicidade de substituição, facilidade de testar o componente e redução de estoque e inventário, pois, muitas vezes, um mesmo módulo pode ser utilizado em mais de um tipo de produto. Deve-se, porém, atentar para o fato que muitas vezes o custo de um módulo é superior a um único componente e sua manutenção; cada caso deve ser analisado separadamente e adotado quando vantajoso;
4. Sempre que possível, utilizar peças padronizadas e fáceis de encontrar no mercado;
5. Projetar sistemas auto-diaagnosticáveis para facilitar a manutenção;
6. Projetar componentes que impeçam a montagem errada durante a

manutenção;

7. Incluir avisos através de inscrições técnicas que indiquem a necessidade de manutenção ou revisão do produto;
8. Providenciar manuais que indiquem e orientem a manutenção do produto.

4) Design for Safety

Design for Safety é mais uma metodologia do DFX e tem como objetivo garantir a segurança do produto, do ponto de vista da manufatura, do uso e do descarte.

Assim como a confiabilidade e a qualidade, a segurança é um atributo que deve nascer com o produto, pois implementá-lo depois é muito complicado e, algumas vezes, até impossível.

Segundo Bralla (1996), não existe produto algum que possa ser considerado totalmente seguro. Variações nas condições de uso, falta de entendimento do produto por parte do cliente e outros fatores fazem com que sempre exista um risco para a segurança. O projetista deve, porém, encontrar um equilíbrio entre os custos de manufatura, outros atributos desejados e o custo da segurança do produto.

Sempre que for identificado algum ponto de possível risco de acidente durante o mau uso, o projetista deve informar o usuário através de avisos no produto e no manual; porém, estas falhas devem ser evitadas ao máximo com a aplicação de sistemas de segurança adicionais.

As empresas devem estar cientes de que não é apenas o projeto que torna o produto mais ou menos seguro; a manufatura pode causar falhas imperceptíveis que ocasionam falta de segurança para o usuário. Durante a sua fabricação, o produto deve ser testado de modo a garantir o seu correto funcionamento.

Bralla (1996) cita algumas regras que devem ser aplicadas quando se objetiva melhorar a segurança de produtos, como por exemplo:

1. Projetar mecanismos e dispositivos que evitem acidentes em caso de falha do produto;
2. Desenvolver sistemas que evitem acidentes em caso de falha humana durante o uso do produto;
3. Eliminar quinas pontiagudas e afiadas que possam causar cortes e machucados no usuário;
4. Projetar capas protetoras, onde existam movimentos mecânicos, para evitar a entrada de objetos estranhos e mãos, e proteger durante a manutenção do produto;
5. O projetista deve garantir o aterramento de produtos elétricos para evitar choques nos usuários;
6. O projetista deve utilizar materiais com alta resistência a impacto, principalmente quando se trata de produtos para crianças, a fim de evitar que, em uma queda, o produto se quebre formando quinas, pontas afiadas, etc, que possam causar ferimentos.

5) Design for the Environment

O *Design for the Environment*, ou *Green Design*, como também é conhecido, foi elaborado visando aliviar os recentes problemas de poluição e destruição do meio ambiente.

Além dos benefícios conhecidos, o advento da tecnologia e urbanização das cidades trouxe também graves problemas para o meio ambiente, que estão sendo notados recentemente; a poluição do ar, água e solo e o desmatamento florestal são as principais

preocupações dos cientistas e da população de todo o planeta.

Porém, os projetistas têm trabalhado no desenvolvimento de produtos que agredam menos o ambiente. Ainda não se pode falar em eliminar componentes e materiais responsáveis pela poluição, mas na redução de tudo aquilo que possa gerar alguma consequência para a natureza.

O *Design for the Environment* orienta projetistas no desenvolvimento de produtos que não causem, ou causem menos, efeitos prejudiciais para a natureza durante todo o seu ciclo de vida, o que inclui a manufatura, uso e descarte.

Em sua obra, Kaminski (2000) comenta sobre a preocupação das empresas em manter o seu mercado consumidor, que agora procura por produtos que não prejudiquem o meio ambiente e diz ainda, que o lucro ou prejuízo das empresas está diretamente relacionado aos três reflexos imediatos, citados a seguir:

1. “pressão do mercado consumidor, que pode implicar a rejeição do produto ou a preferência pelo produto concorrente”;
2. “cobrança de instituições públicas e privadas, que pode se traduzir em multas ou penalidades”;
3. “ganho econômico, evitando desperdícios e reaproveitamento produtos”.

As discussões sobre o *Design for the Environment* geraram uma outra necessidade: a de se desenvolver produtos em que a separação dos materiais recicláveis fosse fácil e barata. Descobriu-se que a reciclagem poderia render lucros para as empresas, no sentido do reaproveitamento de materiais usados e na redução de custos resultante da diminuição dos depósitos; porém, a reciclagem se torna cara quando a separação dos materiais é difícil e, pensando nisso, foram elaborados o *Design for Recycling* e o *Design for Disassembly*, ou seja, projetos pensando na reciclagem e na desmontagem dos produtos.

A reciclagem de materiais nem sempre é uma boa solução para a reposição de matéria-

prima para o mercado. Alguns materiais necessitam de muita energia para reciclar, tornando-os inviáveis do ponto de vista do meio ambiente e do custo.

Bralla (1996) descreve o escopo do *Design for the Environment* como sendo o desenvolvimento de produtos, considerando os seguintes aspectos:

1. Matéria-prima: reduzir a poluição do ar, água e terra causada durante a extração da matéria-prima, que possa de alguma maneira prejudicar os trabalhadores, do local, e a famílias que vivem nas proximidades;
2. Manufatura: reduzir a poluição do ar, água e terra causada por materiais gasosos, líquidos e sólidos provenientes do processo de fabricação do produto. Reduzir a poluição sonora na fábrica;
3. Distribuição e Vendas: reduzir a poluição causada durante o transporte e manuseio do produto;
4. Uso: reduzir a poluição do ar, água e terra causada pela emissão de gases durante o uso do produto, pelo vazamento de fluidos e gases de refrigeração, bem como a poluição sonora;
5. Descarte: reduzir ou eliminar a poluição do ar, água e terra causada pelo descarte inadequado de produtos radioativos, fluidos e gases poluentes.

Bralla (1996) cita algumas regras que podem ser aplicadas durante o desenvolvimento de produtos, para que colaborem na preservação do meio ambiente durante a sua manufatura, uso e descarte, como por exemplo:

1. Os projetistas devem evitar ao máximo o uso de materiais tóxicos no produto e na sua manufatura;
2. Os projetistas devem desenvolver produtos que possam ser reciclados após o uso;

3. Minimizar o número de peças no produto é uma outra técnica utilizada para favorecer o meio ambiente, pois, à medida que o número de componentes é reduzido, a poluição e a energia utilizadas para a fabricação e reciclagem também serão reduzidas;
4. Minimizar o número de materiais diferentes no produto visando facilitar a reciclagem;
5. O projetista deve utilizar o menor número de parafusos e porcas para facilitar e reduzir o tempo de desmontagem do material para reciclagem;
6. Escolher materiais compatíveis que possam ser reciclados juntos quando a minimização das peças não puder ser aplicada;
7. Padronizar os componentes para facilitar a reutilização em produtos similares;
8. Identificar a composição da matéria-prima do componente na própria peça para facilitar a reciclagem, por exemplo, em plásticos.

6) Design for User-Friendliness

Design for User-friendliness pode também ser chamado de *Design for Human Factors* e *Design for Ergonomics*. Esta metodologia, que também faz parte dos objetivos do *Design for Excellence*, auxilia os projetistas no desenvolvimento de produtos que são de fácil entendimento por parte de seus clientes, seguros, ergonômicos, confiáveis e que atinjam a satisfação do cliente.

Bralla (1996) afirma que *User-friendliness* deveria ser o primeiro objetivo do projeto do produto, já que a intenção de todos os produtos é atender as necessidades do usuário. Ele diz ainda que o *User-friendliness* maximiza a utilidade do produto, melhorando sua eficiência, segurança e conforto; produtos famosos pela sua facilidade de uso, geralmente, são mais

fáceis de comercializar.

Shneiderman e Gross's *apud* Bralla (1996) citam os maiores objetivos, do ponto de vista da utilização, como por exemplo:

1. Curto período de aprendizado de operação do produto;
2. Baixa taxa de erros de operação pelos usuários;
3. Aumento da satisfação do cliente;
4. Maximizar a facilidade de uso.

O desenvolvimento de um produto “amigável” para o cliente implica no conhecimento prévio do usuário a quem se destina. O projetista deve saber qual será o mercado consumidor deste produto e identificar suas dificuldades, desejos e necessidades.

Com o objetivo de desenvolver um produto que atenda os requisitos do *Design for User-friendliness*, Bralla (1996) criou alguns princípios para serem aplicados durante o desenvolvimento do produto, como por exemplo:

1. O produto deve ter suas funções simplificadas, de modo que necessite de um número menor de atividades e conhecimentos do usuário para a utilização;
2. O controle do produto deve parecer óbvio para o usuário, de modo que uma pequena ação dele resulte no resultado desejado. O produto não deve confundir o usuário;
3. O projetista deve prever mecanismos que evitem o uso incorreto do produto;
4. Uma das maneiras de evitar erros durante a utilização do produto é colocar instruções visíveis para que o usuário possa ter acesso mais rápido e fácil;
5. A utilização de funções já conhecidas pelo usuário é uma das maneiras de fazer com que o produto se torne amigável.

7) Design for Short Time-to-Market

Design for Short Time-to-Market pode ser definido como sendo o desenvolvimento de um projeto em que se gasta o menor tempo possível para disponibilizar o produto para o mercado consumidor, este período de tempo é contado a partir da idéia de modificar ou desenvolver um produto até o momento em que este é comercializado, ou seja, liberado para o mercado. As empresas devem analisar cada caso separadamente, pois algumas vezes é mais vantajoso gastar mais para adiantar o desenvolvimento que economizar, mas atrasar a liberação do produto para vendas. Bralla (1996) cita em seu livro que uma empresa americana realizou um estudo em que mostra que um produto que entra no mercado seis meses atrasado, com os gastos dentro do planejado, perde cerca de 33% de lucro em um período de 5 anos; já um produto que é lançado no tempo determinado, mas com um gasto extra de 50%, tem seu lucro reduzido em apenas 4% no mesmo espaço de tempo.

Bralla (1996) cita, ainda, algumas vantagens da redução do tempo de desenvolvimento do produto e sua conseqüente disponibilização para vendas, como por exemplo: aumento do mercado consumidor, devido a sua disponibilização adiantada; redução de custos de desenvolvimento, por diminuir gastos com alterações e retrabalhos de projeto; aumento da chance de desenvolver um produto que atinja a satisfação e preferência do mercado consumidor; liberação da equipe de desenvolvimento para trabalhar em um outro projeto mais cedo etc.

A aplicação da engenharia simultânea, durante o desenvolvimento do projeto, permite que várias atividades aconteçam ao mesmo tempo, adiantando a finalização do projeto e sua liberação para o mercado consumidor e redução nos custos de desenvolvimento; pode-se citar como exemplo as seguintes atividades: o planejamento da manufatura, a antecipação de problemas e correção no início do desenvolvimento, a compra e desenvolvimento de

dispositivos e equipamentos.

A utilização de *softwares* simuladores do produto e da manufatura, como, por exemplo, CAD/CAM (*computer-aided design* e *computer-aided manufacturing*), é outra maneira de reduzir o tempo de desenvolvimento do projeto. As respostas do produto e da sua manufatura acontecem quase que instantaneamente, facilitando a correção de problemas, acarretando na redução do prazo e custo de desenvolvimento.

Bralla (1996) cita algumas regras com objetivo de reduzir o prazo de desenvolvimento e liberar o produto mais rapidamente para o mercado consumidor, como por exemplo:

1. Uso de computadores padronizados reduz o tempo de desenvolvimento, testes, aprovação e de entrada em produção de um componente novo;
2. Uso de sistemas, procedimentos e materiais padronizados e existentes reduzem o tempo de negociação e testes;
3. Uso de sistemas modulares, especialmente se estes já são utilizados por outros produtos;
4. Fazer certo na primeira vez, ou seja, evitar erros que demandem tempo para serem corrigidos, atrasando o projeto;
5. Projetar o produto que não necessite de ferramentais que exigem um alto prazo de desenvolvimento.

3.8 Software DFMA – Boothroyd Dewhurst Inc.

Atualmente, as empresas têm buscado ferramentas que demandem o mínimo tempo de treinamento e aplicação, trazendo grandes benefícios. Pensando nisso, vários *softwares* de DFMA foram desenvolvidos visando ainda reduzir o tempo de desenvolvimento de produtos e facilitar a aplicação de metodologias de análises e verificação de projetos.

Entre todos os *softwares* existentes no mercado, um dos mais utilizados e conhecido é o “*Design for Assembly (DFA-BDI)*”, desenvolvido em 1982 pela empresa Boothroyd Dewhurst, Inc (BDI), para ser utilizado em desenvolvimento de produtos.

Além deste software, a BDI desenvolveu outras ferramentas que também auxiliam no desenvolvimento de produtos, tais como o *Design for Manufacturability (DFM)*, *Design for Service (DFS)* e o *Design for Environment (DFE)* que são *softwares* utilizados por empresas que desejam melhorar, otimizar e reduzir custos de seus produtos, durante a produção, uso e descarte.

O *DFA-BDI* analisa os componentes do produto como o objetivo de identificar peças desnecessárias, determinar o tempo e custo de montagem. O *DFM-BDI* visa selecionar materiais e processos de fabricação de peças isoladas do projeto, bem como estimar o custo de cada componente e o investimento para sua fabricação. O *DFS-BDI* é uma ferramenta utilizada a fim de reduzir custos e aprimorar as condições de manutenção de um produto. O *DFE-BDI* tem sido utilizado para reduzir os impactos do produto no meio ambiente, seja durante sua fabricação, uso ou descarte.

O *software DFA-BDI* quantifica o tempo de montagem, custos de mão-de-obra, simplifica a estrutura do produto, reduz custo de peças e de montagem e melhora a qualidade do produto durante o seu desenvolvimento.

Para uma análise de DFA por meio deste software é necessário que o projetista entre com os seguintes dados: (a) peças, (b) movimentos, (c) operações, (d) ferramentas, (e) manuseio, (f) sequência de montagem, (g) carga e capacidade da fábrica, (h) custo da mão-de-obra, (i) investimentos para compra de equipamentos e (j) dificuldades de inserção e montagem.

O resultado final da análise apresenta relatórios com sugestões para modificação do produto de forma que atenda os princípios da metodologia do DFA, identifica peças

desnecessárias, quantidade total de peças, tempo de montagem, custo de manufatura e investimento necessário.

O *software Design for Assembly (DFA-BDI)* foi uma das primeiras ferramentas computacionais criadas para aplicação da metodologia, com o propósito de auxiliar o usuário na estimativa de custo de montagem manual de um produto, bem como estudar diversas alternativas para simplificar, reduzir custos, otimizar a montagem e aprimorar o produto final.

3.9 Conclusões

Sendo assim, esse capítulo trouxe um relato sobre o DFMA, seus conceitos, regras e aplicações. Mostrou também as dimensões do DFX, sua abrangência e elementos para que o produto atenda todos os requisitos esperados pelo mercado consumidor. E finalmente foi feita uma breve explanação a respeito do *software DFMA – Boothroyd Dewhurst Inc.*

O capítulo seguinte mostrará as definições e conceitos de desenvolvimento integrado do produto no âmbito da Engenharia Simultânea e times multidisciplinares, as ferramentas associadas e fases de um projeto aeronáutico onde os conceitos de DFMA devem ser aplicados para que melhores resultados de manufatura sejam alcançados.

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DO PRODUTO

4.1 Introdução

Pode-se afirmar que o DFMA alcança melhores resultados quando associado a outras metodologias conhecidas, como por exemplo, a Engenharia Simultânea.

A utilização da Engenharia Simultânea no desenvolvimento do produto tem como objetivo a composição de grupos de trabalhos interdepartamentais, compostos por pessoas experientes em desenvolvimento de projetos, planejamento da manufatura, engenharias de processos e sistemas, ferramental, qualidade etc., que atuam no desenvolvimento e comprometidos em trabalho integrado.

Sendo assim, os engenheiros que compõem a equipe de desenvolvimento devem analisar vários pontos importantes, não apenas para o produto, mas também para os requisitos quem visam a obtenção de um produto projetado com o melhor custo, assegurando a melhor combinação entre as especificações e necessidades de produtividade, qualidade, suprimentos, prazos, engenharia e suporte ao cliente. A equipe deve atuar na fase de desenvolvimento do produto e deverá ficar alocada na área de Projeto.

A prática de execução de atividades integra processos, planejamento, organização e faz uso de ferramentas adequadas. Permite que todos os esforços de desenvolvimento sejam integralmente considerados, de forma simultânea e eficiente, ao longo de todo o processo de desenvolvimento.

4.2 Engenharia Simultânea

O desenvolvimento de um novo produto não é uma tarefa fácil para os projetistas. Neste momento, os engenheiros devem analisar vários pontos importantes, não apenas para o produto, mas também para a manufatura, vendas, assistência técnica, qualidade, etc.; porém, os engenheiros de produto não possuem conhecimentos suficientes para resolver problemas das outras áreas envolvidas.

O principal objetivo da formação de um grupo heterogêneo, que podem aproveitar experiências de diferentes profissionais com diversos pontos de vista sobre o projeto de um mesmo produto, reside na otimização do processo de desenvolvimento e no projeto de produtos que atendam requisitos funcionais, técnicos, de manufatura, marketing, etc.

Em sua obra, Bralla (1996) cita três modelos do processo de desenvolvimento de produtos no que tange ao relacionamento interdisciplinar:

1. *Over the wall*: representa o modelo onde a engenharia de produto e de manufatura não trabalham em conjunto durante o desenvolvimento, ou seja, os departamentos ficam localizados em áreas diferentes. Os projetistas trabalham em seu setor, e em seguida enviam os desenhos referentes ao novo produto para a engenharia de manufatura elaborar os roteiros de montagem. Esta que não foi envolvida e não teve nenhuma participação e interferência durante o desenvolvimento do projeto, agora terá que enfrentar possíveis problemas para garantir a fabricação e montagem do produto.

A Figura 4.1 é citada por vários autores conceituados e representa esta divisão clara entre os departamentos.

FIGURA 4.1. Desenvolvimento departamental do produto

(Fonte: Bralla (1996))

2. *The sign-off procedure*: nesta fase, a engenharia de manufatura aprova o projeto final do produto antes da liberação para a produção;
3. Engenharia Simultânea: a engenharia de produto, manufatura e outros departamentos, igualmente importantes, participam do desenvolvimento do produto desde o início.

Vale ressaltar que o fato de ter ocorrido uma evolução na comunicação entre os departamentos não garante que, ainda hoje, não existam empresas onde o produto é desenvolvido apenas pela engenharia de projeto, sem nenhuma participação dos outros departamentos.

Podem-se citar como benefícios decorrentes da engenharia simultânea os seguintes aspectos:

1. Redução de custos, uma vez que os problemas são encontrados mais rapidamente durante o desenvolvimento em que os custos de modificações não são ainda elevados;

2. Redução no prazo de desenvolvimento e planejamento da produção, pois estas duas etapas acontecem simultaneamente;
3. O resultado final do produto é consideravelmente superior devido ao fato de pessoas com diferentes pontos de vista estarem participando do desenvolvimento;
4. Maior compatibilidade entre o produto e a manufatura, uma vez que o desenvolvimento considera os aspectos relevantes ao processo de fabricação.

Bralla (1996) cita, também, algumas desvantagens e considerações importantes que devem ser analisadas na implementação da Engenharia Simultânea, como por exemplo:

1. Dificuldade de gerenciar times de trabalho em relação a projetistas individuais;
2. Dificuldade de algumas pessoas, consideradas ótimas projetistas, em trabalharem em grupo;
3. Custo de reunir um grupo de especialistas no desenvolvimento de um projeto;
4. Possibilidade de desenvolver um projeto, utilizando softwares e atendendo os requisitos do DFMA e DFX, sem a aplicação da Engenharia Simultânea.

4.3 Desenvolvimento de produto x times de trabalho

A Engenharia Simultânea é utilizada durante o desenvolvimento integrado do produto através de times que fazem parte da estrutura organizacional da empresa e que devem ser divididos em funcional e matricial. Isso se dá pela necessidade que as empresas tem de serem cada vez mais competitivas no mercado, onde os métodos e ferramentas utilizadas no desenvolvimento de um novo produto precisam estar sempre em evolução.

Assim sendo, devemos garantir uma participação mais ampla de todas as áreas da

empresa, no momento adequado, reduzindo assim custos de desenvolvimento, manufatura, manutenção, operação e serviços.

Na estrutura funcional, os profissionais são agrupados pela área de atuação, formando departamentos que se reportam aos gerentes funcionais. Pode-se citar como exemplo os departamentos de Engenharia de Manufatura, Engenharia de Produto, Suprimentos, etc.

A estrutura matricial tem a função de integrar os profissionais de diferentes departamentos funcionais, a fim de otimizar os recursos e o desenvolvimento do trabalho. Vale salientar que os gerentes funcional e matricial possuem o mesmo grau de hierarquia, mas atuam em áreas e funções diferentes.

Um time é composto por um pequeno número de pessoas compromissadas, pois um grupo jamais se torna um time até que todos os seus membros estejam realmente de acordo com os objetivos, missão e abordagem do time. O comprometimento gera confiança entre os membros, e cria as condições necessárias para que os objetivos sejam atingidos com um propósito, metas de performance e abordagem comum, com conhecimentos complementares, que definem uma forma organizada de trabalho onde seus componentes se sentem mutuamente responsáveis pelos resultados que produzem.

Além disso, as pessoas devem ser consideradas como o bem mais importante (atitude, habilidade, conhecimento), pois gera incentivo ao relacionamento (times multidisciplinares) e é o meio para que cada decisão seja tomada levando em consideração as virtudes que buscamos para o produto e o processo na visão de um todo (negócio).

A maior arma do time é a comunicação entre seus membros. Se não houver comunicação eficiente, não há time, mesmo que as pessoas estejam co-localizadas.

O alinhamento e o trabalho multidisciplinar devem ser buscados desde o início do processo de desenvolvimento, e é essencial para o sucesso do projeto.

Normalmente as pessoas tendem a comportarem-se como ainda estando nas áreas

funcionais, ignorando que fazem parte de uma equipe multidisciplinar. Sem perder a especialização, os envolvidos devem quebrar o “gap” que aparece quando trabalham isoladamente. A Figura 4.2 exemplifica que abrangência das ações superam o espaço anteriormente visualizado e agora são pessoas que podem contribuir de forma mais ampla com a organização, interagindo com todos os envolvidos, buscando soluções corporativas.

FIGURA 4.2. Interação entre departamentos

4.4 Desenvolvimento de produto na indústria aeronáutica

O desenvolvimento de produtos na indústria aeronáutica está em evolução e melhoria contínua, buscando sustentar a competitividade das empresas fabricantes de aviões.

Não existem publicações disponíveis de como se encontra a situação do desenvolvimento de produto na indústria aeronáutica. O modelo discutido abaixo é baseado na experiência prática do autor no desenvolvimento integrado de produto de vários modelos de aeronaves no Brasil e visitas em outras indústrias fabricantes de aviões e fornecedores.

No desenvolvimento do produto aeronáutico os fatores como: tempo, qualidade, custo, meio ambiente e logística, são sempre considerados em cada decisão tomada. Todas as

decisões, grandes e pequenas, são fundamentadas nos fatores buscados para o produto, pois impactam na competitividade da empresa:

- *Custo/Preço:* no que se refere a custos, devemos ter sempre em mente que existem dois grandes objetivos a serem atingidos por cada um dos envolvidos no desenvolvimento de um novo avião. 1) A obtenção de um produto que tenha o menor custo de ciclo de vida possível para o cliente (custo financiamento, custo operacional, custo manutenção, custo aquisição, custo com treinamento, etc.). 2) A minimização dos custos de desenvolvimento. Observe que o mais importante é o impacto que as decisões geram para o custo do ciclo-de-vida do produto. Devemos ter sempre em mente que o custo de ciclo-de-vida é o principal critério utilizado pelo cliente na hora da compra.
- *Tempo:* em mercados competitivos e globalizados, como o mercado aeronáutico, a lucratividade de um produto é extremamente sensível ao momento de entrada do produto no mercado. A entrada atrasada pode simplesmente representar o fracasso do produto. Portanto é essencial que todos os itens sejam planejados e executados dentro do prazo estabelecido.
- *Qualidade:* a qualidade do produto é fundamental e deve ser estabelecida em sintonia com tempo e custo. A robustez do produto, e do processo de manufatura, são definidos durante o desenvolvimento, e são atributos essenciais para assegurar a qualidade.
- *Logística:* os produtos são desenvolvidos de forma conjunta, com parceiros situados em vários outros países. O mercado é diverso e localiza-se em todas as partes do mundo. O processo de manufatura é complexo e requer uma preocupação com movimentação de partes, com envio de itens e com apoio

operacional. Em cada novo projeto, devera ser atentado para todos os aspectos logísticos envolvidos em cada uma das fases do projeto.

- *Meio Ambiente:* o desenvolvimento de produtos menos agressivos ao ambiente é o desafio. Essa tendência é clara, principalmente na Europa e Estados Unidos. Por isso, deve ser sempre levado em consideração os possíveis impactos ambientais em todas as decisões ao longo do desenvolvimento.

Outro ponto importante no desenvolvimento de um projeto aeronáutico é a estruturação das fases. Isso mostra claramente o que está envolvido no esforço de desenvolvimento, suas atividades, suas interdependências, seus marcos, o planejamento, as ferramentas utilizadas, seus objetivos, etc.

Cabe lembrar que a estruturação não bloqueia ou elimina a criatividade.

Comprovadamente estudos em universidades comprovaram de forma consistente, que times trabalhando de forma estruturada geram soluções mais criativas e melhoram a qualidade se comparado a times que não trabalham de forma estruturada, usando a intuição.

Desta forma podemos citar alguns pontos como vantagens:

- O Problema é entendido antes de ser abordado;
- Várias soluções são geradas (e não apenas uma);
- Uma solução é escolhida segundo critérios (o impacto da solução é avaliado);
- A Solução é refinada e detalhada seguindo procedimentos (menos erros, menos re-trabalho, foco nas virtudes);
- As pessoas não perdem tempo discutindo "COMO" as coisas devem ser feitas, e sim fazendo.

Geralmente a estruturação é baseada segundo quatro dimensões fundamentais, de forma a possibilitar o uso sistemático dos recursos disponíveis.

1) Processos: o processo de desenvolvimento integrado de produtos corresponde ao conjunto de atividades que permitem o desenvolvimento do produto de forma integrada e o gerenciamento das tarefas ao longo do processo. Os envolvidos, ao final, terão definido e especificado o produto como um todo. Uma maneira de representar de forma estruturada esse conjunto de atividades é através da modelagem dos processos, ou seja, através de modelos específicos podemos representar todo o conteúdo levantado na modelagem, bem como mapear todas as interfaces entre os diferentes processos das diversas áreas funcionais da empresa. As atividades do processo de desenvolvimento são agrupadas, por afinidades nos seguintes sete (7) sub-processos:

- a) *Estabelece e gerencia atividades*: atividades que possibilitam o planejamento de todo o processo, a criação das diretrizes, e o gerenciamento destas atividades ao longo do desenvolvimento do produto. As atividades desse sub-processo são fortemente amarradas às atividades de planejamento e diretrizes do projeto;
- b) *Identifica requisitos e desenvolve especificações*: atividades que permitem a identificação, o registro e o entendimento dos requisitos (mercado, clientes, autoridades) necessários ao desenvolvimento e também à geração das especificações para o atendimento a estes requisitos;
- c) *Executa projeto conceitual e definições*: atividades que asseguram o desenho conceitual do produto e levam ao surgimento das definições necessárias ao detalhamento dos objetos pertinentes;
- d) *Executa detalhamento do projeto*: atividades que traduzem especificações e definições em descrições finais do produto;

- e) *Desenvolve, Implementa, analisa e valida testes*: atividades que possibilitam a comprovação do atendimento aos requisitos dentro de parâmetros aceitáveis;
 - f) *Conduz certificação*: atividades de gerenciamento do processo de certificação do produto;
 - g) *Executa atualizações do produto*: atividades de execução das mudanças no produto. Este sub-processo remete ao início.(a), onde toda a cadeia recomeça.
- 2) Planejamento: em projetos complexos, que envolvem metas audaciosas e restrições de recursos, um planejamento integrado se torna fundamental. O planejamento integrado permite a utilização racional dos recursos disponíveis, e ainda o controle eficiente dos custos e do andamento do projeto. O sucesso depende fortemente do cumprimento dos prazos estabelecidos para cada atividade definida no planejamento. Cabe ao time a avaliação contínua dos recursos e monitoramento dos prazos na execução das atividades.
- 3) Organização: a organização adequada facilita a obtenção dos objetivos estabelecidos, possibilitando o controle eficiente dos recursos, e uso das habilidades corretas. Todas as atividades relativas ao desenvolvimento do produto são estabelecidas, planejadas, executadas e controladas por times multidisciplinares. É comum a adoção da organização matricial balanceada em sua forma de trabalho. O uso mais eficiente de times multidisciplinares e co-localizados também agiliza no processo de tomada de decisões. A existência de uma estrutura organizada, com equipes montadas segundo uma estrutura de trabalho bem estabelecida, com identificação de responsabilidades e escopo dos pacotes de trabalho claras e bem disseminadas. A Engenharia Simultânea é

utilizada durante o desenvolvimento do produto através de um time que faz parte da estrutura organizacional da empresa, e que deve estar dividido em funcional e matricial. Na estrutura funcional, os profissionais são agrupados pela área de atuação, formando departamentos que se reportam aos gerentes funcionais. Pode-se citar como exemplo os departamentos de Engenharia de Manufatura, Engenharia de Produto, Marketing, Compras, etc. A estrutura matricial tem a função de integrar os profissionais de diferentes departamentos funcionais, a fim de otimizar os recursos e o desenvolvimento do trabalho. Vales salientar que os gerentes funcional e matricial possuem o mesmo grau de hierarquia, mas atuam em áreas e funções diferentes. O time interdepartamental formado para desenvolver um novo produto, utilizando a metodologia DFMA, deve-se reportar ao gerente matricial, e os profissionais individuais devem se reportar aos seus respectivos gerentes funcionais. Esta estrutura colabora para uma melhor otimização dos recursos disponíveis para o desenvolvimento do produto em questão.

- 4) Ferramentas: no processo de desenvolvimento de produtos, cada atividade é conduzida e suportada por ferramentas apropriadas. As ferramentas utilizadas incluem não somente aquelas baseadas em computador (CAD, CAE, PDM, base de dados), mas também o conjunto de métodos, técnicas, metodologias, práticas e princípios de trabalho, igualmente aplicáveis ao estabelecimento, execução e controle de atividades e tarefas no contexto do desenvolvimento integrado do produto.
 - CAD (Computer Aided Design) - Ferramenta utilizada para a criação de documentação geométrica (modelamento) das partes, elementos e sistemas do produto. A Figura 4.3 mostrada abaixo exemplifica a

utilização de softwares CAD durante as fases de concepção e detalhamento do projeto.

FIGURA 4.3. Modelos CAD utilizados na concepção do Boeing 787

(Fonte: Apresentação estrutural da Boeing)

- CAE (Computer Aided Engineering) - Conjunto de ferramentas utilizadas para análises estruturais, de fadiga, aeroelasticidade, aerodinâmica, mecanismos.
- CAM (Computer Aided Machine) - Conjunto de ferramentas utilizadas para o processo de manufatura.
- CRV (Centro de Realidade Virtual) - Ferramenta utilizada para visualização de alta performance da maquete digital do produto e do processo, etc. (Figura 4.4).

FIGURA 4.4. Centro de realidade virtual

(Fonte: site Embraer, www.embraer.com.br)

- Manufatura Digital (Simulação em computador do processo de manufatura) - Conjunto de ferramentas utilizadas em simulação em computador para avaliação, otimização e validação dos fluxos de processos produtivos.

A Figura 4.5 exemplifica uma simulação digital referente às condições de montagem das semi-asas de uma aeronave comercial de grande porte. Com este recurso é possível visualizar os acessos necessários para montagem, avaliar a concepção dos recursos como plataformas e dispositivos de apoio ao operador, além de auxiliar nas análises das características ergonômicas em que os operadores estarão submetidos durante as atividades produtivas.

FIGURA 4.5. Simulação de gabaritos, plataformas e ergonomia

(Fonte: revista Aerospace Testing International, mar. 2006)

- CAPP (Computer Aided Process Planning) - Suporte ao planejamento do processo produtivo.
- DFX (Design for X) - Onde o X pode ser Manufatura, Montagem, Custo, Qualidade, Tempo, Suporte Técnico, e vários outros. O DFX permite que aspectos importantes do produto sejam analisados e decididos de forma sistemática, no início do processo de desenvolvimento.
- PDM (Product Data Management) Gestão de dados do produto – é uma tecnologia que permite que se armazenem informações de produtos da empresa para que todos possam acessar a última versão, evitando assim redundâncias e erros que normalmente surgem, quando se trabalha em equipe, com diversas pessoas compartilhando as mesmas informações (tais como desenhos CAD, dados, cálculos, etc.).

4.5 Fases de um projeto aeronáutico

O processo de desenvolvimento de um novo avião é dividido em 05 fases bem definidas, com produtos bem especificados para o final de cada fase.

As fases são subsequentes e devem ser completadas e aprovadas pelos departamentos de planejamento, engenharia de manufatura, manufatura, marketing, projeto, compras, qualidade e finanças, para autorizar o início das atividades posteriores.

A Figura 4.6 mostra todas as fases do processo, desde a fase de desenvolvimento de produto até a fase de término da fabricação.

FIGURA 4.6. Fases de um projeto aeronáutico

Fase 1 - Definições iniciais

É a fase onde os requisitos de alto nível (mercado, cliente, manufatura, suporte ao cliente, etc...) são identificados e é definida a configuração básica do produto. Nessa fase ocorre o desdobramento das necessidades e oportunidades de um determinado segmento do mercado de aviação em características primárias e relevantes ao produto a ser desenvolvido, de modo a atingir os objetivos de negócio da empresa.

Posteriormente, os requisitos são utilizados como instrumento de gestão do desenvolvimento do produto, controlando a qualidade do desenvolvimento.

Os pontos mais importantes desta fase são: planejamento geral do programa, diretrizes e definições básicas do produto, etc.

Fase 2 - Concepção do Produto

Esta fase é onde se busca o refinamento e validação da configuração inicialmente escolhida. Neste momento é definido o plano detalhado do projeto, montagem e interfaces.

Assim como na fase anterior, cada decisão tomada aqui irá impactar todo o restante do processo de desenvolvimento, muitas vezes de forma irreversível.

Uma das atividades mais importantes dessa fase é a definição das interfaces entre os times. Todas as atividades são executadas de forma co-localizada visando maximizar os benefícios de uma definição integrada. Tal definição é fundamental para o sucesso de um programa envolvendo vários parceiros.

Nesta fase os parceiros (quando existirem) trabalham juntos buscando refinar e validar a configuração inicialmente escolhida, com a definição dos esboços básicos de projeto, montagem e interfaces. Os sistemas da aeronave, estrutura, ferramental, tecnologias de

produção e processos, itens de reposição e manutenção devem ser definidos e documentados via maquete digital e lista preliminar de material de cada montagem.

Uma das atividades mais importantes que ocorre nesta fase é a definição das interfaces entre os times de trabalho, com a utilização dos documentos de controle de interface, ou seja, o escopo de trabalho e divisão de responsabilidades de cada departamento envolvido no projeto. Todas as atividades são executadas de forma simultânea por esses times de trabalho que formam o DIP, e analisadas criticamente visando maximizar os benefícios de uma definição integrada, a qual é fundamental para o sucesso de um programa envolvendo vários parceiros.

Nessa fase ocorrem diversas revisões de concepção de projeto que devem focar nos requisitos, alternativas e adequação de projeto, análise de montagem, manufatura, suporte ao produto, qualidade e logística.

Os produtos mais importantes desta fase são: modelo geométrico 3D validado, estrutura prévia do produto, definições do produto, planos de produção, ferramental, qualidade, certificação, publicações, ensaios, certificação, manutenção e equipamentos de apoio ao solo.

Fase 3 - Detalhamento do Projeto

Nesta fase ocorre o completo detalhamento de todos os objetos do projeto, incluindo modelos geométricos, roteiros de fabricação, especificação do ferramental, GSE, manuais, catálogos e recomendações de provisionamento.

Essa fase faz uso intensivo de ferramentas computacionais (CAD, CAE, PDM, etc...) para o cumprimento dos prazos.

Os protótipos são fabricados, ensaiados e a aeronave certificada.

Fase 4 - Produção

A seriação corresponde à fase onde as aeronaves são produzidas e entregues. As melhorias são implementadas para evolução da aeronave e o suporte ao cliente é fornecido.

Mudanças (correções e re-alimentação) são presentes durante essa fase, especialmente no período inicial da seriação.

Fase 5 - Phase-out

Nesta fase a aeronave não é mais fabricada, mas a manutenção da frota operacional é dada até o final da responsabilidade contratual.

Peças de reposição continuam sendo procuradas, fabricadas e entregues.

Atividades de mudanças são ainda presentes nessa fase, incluindo correções (oriundas de órgãos homologadores, ou a pedido de clientes) e re-alimentação.

Os resultados dessa fase são: relatório detalhado com indicações de itens que devem ser mantidos para suporte da frota e disposição dos demais (peças, gabaritos, desenhos, relatórios, etc.), BS (boletins de serviços) implementadas.

Com isso, esse capítulo reportou as definições e conceitos de desenvolvimento integrado do produto e times multidisciplinares, as ferramentas utilizadas no desenvolvimento de um projeto aeronáutico e um breve descritivo de cada uma das fases, desde a concepção até a saída da aeronave de operação.

O capítulo seguinte irá apresentar a ferramenta DFMA desenvolvida para auxiliar os engenheiros de produto e processo no desenvolvimento de um novo avião, onde os conceitos de DFMA são aplicados para tornar as atividades de manufatura e manutenção da aeronave, as mais simples possíveis.

CAPÍTULO 5 – GUIA DE PROCESSO PARA PROJETO E FABRICAÇÃO DE AERONAVES

5.1 Introdução

Casos práticos evidenciados por profissionais da área da aviação como: engenheiros, mecânicos, eletricitas, operadores e clientes, demonstram inúmeras dificuldades durante a realização das atividades e serviços em aeronaves.

Experiências práticas adquiridas nas linhas de produção de empresas fabricantes de aviões, execução de tarefas de manutenções corretivas e preventivas de aeronaves em centro de serviços, oficinas e aeroportos, aplicações de boletins de serviços e revisões em aviões já entregues à clientes e preparação de aviões para vôo, e também por intermédio de informações provenientes de revistas específicas de aviação, relatórios técnicos, consultas, pesquisas e mídia, têm mostrado muitas vezes que o desenvolvimento de produtos tem sido tradicionalmente elaborado sem verificar e avaliar cuidadosamente a montabilidade, a facilidade de fabricação, usabilidade, confiabilidade, fatores humanos, etc.

Estas análises devem ser realizadas efetivamente antes do início da fabricação do protótipo ou da fase de produção, com objetivo de validar se o projeto está realmente atendendo os requisitos de manufatura e montagem. Isso pode evitar o aumento do tempo de reprojeção por motivo da necessidade de revisões futuras do produto e que encarecem o produto final.

O momento mais indicado para a aplicação do DFMA é nas fases 2 (concepção) e 3

(detalhamento), contudo para a metodologia DFMA, a fase de concepção é tão importante quanto a de detalhamento, na qual realmente tornam-se efetivas as definições iniciais do produto, avaliando a estrutura, a geometria global das partes e os materiais, assim como as estratégias do DFMA.

No decorrer das fases, onde os diferentes segmentos estruturais e sistemas da aeronave são desenvolvidos, o processo de fabricação deve ser analisado, a fim de garantir que o projeto atenda todas as necessidades de manufatura. Modificações de projeto posteriores podem ainda ser realizadas, porém os custos e impactos são mais elevados.

Estas fases são responsáveis pela definição da estrutura da aeronave, componentes e sistemas, como, por exemplo, os cabos elétricos (cablagens), ar condicionado, trem de pouso, etc. A partir deste momento, a Engenharia de Manufatura começa suas atividades, desenvolvendo ferramentas e equipamentos adequados para as montagens e testes, os processos de fabricação dos componentes da aeronave, a estrutura preliminar do produto e a seqüência de montagem do avião.

O protótipo de validação é a primeira aeronave do modelo a ser construído. Muitas vezes, falhas e melhorias do projeto são identificadas nesta fase de implementação do produto na linha de montagem, causando gastos inesperados para a empresa e dificultando o aprendizado da produção. Sendo assim, se gasta muito para corrigir todos os pontos falhos detectados na produção, antes do início da segunda aeronave.

Baseado nas premissas descritas acima e com foco em conceber um produto que seja de fácil manufatura, é de extrema importância que os conceitos da metodologia DFMA sejam aplicados e difundidos neste ramo da indústria. Para que a aplicação da metodologia seja facilitada, é recomendável uma efetiva exploração dos recursos e ferramentas de desenvolvimento de produtos disponíveis no mercado. Além disso, é necessária uma participação efetiva da Engenharia de Manufatura desde o início do desenvolvimento.

5.2 Levantamento dos dados

Todos os problemas de projeto do produto devem ser identificados e reportados durante a fabricação da primeira aeronave (protótipo) em uma base de dados da empresa, de modo que a realimentação seja dada ao projeto para correção dos desenhos afetados e incorporação rápida da modificação na linha de montagem, visando solucionar os problemas no menor tempo possível.

Baseado nas discrepâncias evidenciadas e reportadas durante a fase de fabricação das primeiras aeronaves de vários modelos, foi possível identificar os casos dos problemas mais críticos que geram impactos significativos na montagem estrutural (segmentos) e montagem final dos aviões.

A montagem estrutural se resume nas montagens dos conjuntos estruturais como asas, fuselagens e estabilizadores. A montagem final contempla a instalação dos sistemas nos segmentos estruturais, junção da asa na fuselagem, interligação entre sistemas e testes funcionais.

Sendo assim, cada problema reportado foi analisado de modo a caracterizar a natureza de sua causa e em seguida, classificado conforme o tipo de impacto gerado à produção; para isso, cada impacto foi enquadrado conforme o seguinte critério de classificação: (a) dificuldade de montagem, (b) ajuste de peças e conjuntos, (c) ergonomia e (d) treinamento.

Entende-se que a dificuldade de montagem evidenciada na linha de montagem final é decorrência de falhas que deveriam ter sido detectadas com a aplicação eficaz da metodologia DFMA durante o desenvolvimento de produto.

Verificou-se que os problemas de projeto encontrados ocorreram em virtude da maior parte das peças utilizadas estarem em fase de validação do processo de fabricação. As discrepâncias mais frequentes foram: desenhos com problemas de cotas, materiais e

representação gráfica e também problemas de incompatibilidade entre os projetos de estruturas e sistemas, em virtude de análises virtual não eficiente. Além disso, foram evidenciados problemas de acessibilidade e de dificuldades de remoção e desmontagem das peças em casos de necessidade para manutenção.

Casos de peças que necessitaram de ajustes foram encontrados durante a fase do protótipo (primeira aeronave do modelo produzido), nos quais os desenhos são corrigidos para o próximo produto a ser montado.

Além disso, a fase de montagem da primeira aeronave protótipo, é também uma fase de treinamento dos operadores; na qual o processo de montagem, bem como as particularidades do novo produto são ensinadas para aqueles que irão trabalhar na produção em série da aeronave em questão. Deste modo, é também esperado que ocorram pequenos problemas devido à “falta” de treinamento até que a produção entre em regime de cadência com pessoal treinado.

Outro fator considerado é a questão da acessibilidade e ergonomia. Observou-se que em alguns casos uma peça não podia ser montada corretamente devido à dificuldade de acesso, ou pela necessidade de excessivo esforço físico do operador, ou ainda pela dificuldade de posicionamento da peça.

As falhas levantadas que não se enquadravam em nenhuma das situações mencionadas foram classificadas como Outros.

A Tabela 5.1 mostra alguns exemplos de como os problemas foram classificados, sendo que a quantidade total de homens-hora na solução dos problemas em tempo hábil na linha de montagem foi substancial. O ciclo de resolução dos problemas detectados na linha de montagem engloba desde a emissão do documento de não-conformidade, análise da discrepância e definição da solução, até a incorporação da solução na aeronave.

Tabela 5.1 – Exemplo dos problemas de DFMA

<i>PROBLEMA</i>	<i>CAUSA</i>	<i>CLASSIFICAÇÃO</i>
<i>Dificuldade de instalação da porca do parafuso de fixação do mancal do eixo do sistema das portas</i>	<i><u>Problema de Projeto</u> - definição incorreta no projeto da porca. Deveria ser porca fixa ao invés de solta.</i>	<i>Dificuldade de montagem – DFMA (acessibilidade)</i>
<i>Atrito da bomba de combustível com rebite da fuselagem.</i>	<i><u>Problema de Projeto</u> - Falha de análise zonal na interface estrutura e sistemas da aeronave.</i>	<i>Dificuldade de montagem – DFMA (interferência)</i>
<i>Porta de acesso atrita com carenagem de fechamento da asa.</i>	<i><u>Problema de Projeto</u> - Falha na definição das tolerâncias entre as peças adjacentes.</i>	<i>Dificuldade de montagem – DFMA (tolerância)</i>
<i>Mangueira de combustível atrita com perfil da estrutura.</i>	<i><u>Problema de Precedência</u> - Definição incorreta da sequência de montagem do sistema.</i>	<i>Dificuldade de montagem – DFMA (precedência)</i>
<i>Furo com diâmetro diferente do especificado no desenho da nervura da semi-asa.</i>	<i><u>Erro de Mão-de-obra</u> - Ovalização do diâmetro do furo pelo chapeador</i>	<i>Inexperiência do operador – Treinamento</i>

Os exemplos acima nos permitiram constatar casos que poderiam ter sido evitados, ou ao menos percebidos, durante o desenvolvimento de produtos, se a metodologia DFMA tivesse sido aplicada em estágios anteriores de projeto e desenvolvimento. Na linha de montagem final, a maioria dos problemas identificados está relacionada com falhas evitáveis ou previsíveis por meio da aplicação do DFMA.

Outro aspecto importante que verificamos foi a diminuição das ocorrências de discrepâncias relacionadas com DFMA no decorrer do tempo de fabricação de um mesmo modelo de avião, ou seja, conforme a cadência (número de aviões fabricados por mês) da produção aumenta, os problemas diminuíram em virtude das correções de projeto realizadas durante a fase de produção da aeronave protótipo.

Notamos mais uma vez que a maior parte dos problemas analisados ocorreu logo durante a fabricação do avião protótipo ou do primeiro da série. Isto nos permite acreditar que

estes casos, decorrentes de falhas tão evidentes e com implicações negativas tão óbvias, poderiam ter sido facilmente detectadas antecipadamente nas fases de desenvolvimento.

É certo que outros casos continuaram aparecendo, porém, em sua maioria, foram problemas e discrepâncias menos evidentes e decorrentes de fatores humanos, como erros durante a fabricação de peças primárias, mas que naturalmente apresentaram tendência decrescente no decorrer no plano de produção da aeronave.

É importante ainda frisar que todos os problemas encontrados durante a montagem do primeiro avião protótipo, devem ser solucionados antes do início da produção em série, ou seja, corrigidos em paralelo com a fabricação do protótipo. Porém, não se pode negar que o custo da correção do projeto no início da montagem final é muito maior que se efetuado antecipadamente durante a fase de concepção e detalhamento do projeto.

5.3 Utilização de uma ferramenta de auxílio

Com base nas necessidades de aplicação da metodologia DFMA junto à manufatura e desenvolvimento de produtos, foram analisados e selecionados os fatores positivos e negativos da aplicação de uma ferramenta de análise, bem como as razões que dificultam a utilização.

Fatores positivos da aplicação de ferramentas de análise:

- Indicações de sugestões para modificações de projeto
- Redução de tempo de projeto do produto
- Flexibilidade na manipulação dos dados
- Banco de dados com os desenhos atualizados
- Praticidade para consultas

Fatores negativos da aplicação de ferramentas de análise:

- Dificuldade de aplicação da ferramenta;
- Custo elevado para aquisição da ferramenta;
- Tempo de treinamento elevado.

Razões que dificultam a utilização da ferramenta:

- Falta de tempo;
- Falta de pessoal especializado;
- Falta de ferramentas adequadas.

Entretanto, as empresas atuais fabricantes de aeronaves perante a competitividade global, tem como objetivo a aplicação do DFMA no desenvolvimento do projeto para reduzir o número de peças do produto, reduzir os custos com a manufatura, aumentar a padronização de peças e ferramentas para serem utilizadas em vários modelos de aviões, aumentar a facilidade de montagem, além de aumentar a qualidade do produto.

Sendo assim, concluímos que a ferramenta ideal para a aplicação da metodologia DFMA na indústria aeronáutica é aquela que, além das funções apresentadas, atendessem os seguintes requisitos:

- Permite ser utilizada sem necessidade de despende um longo tempo com treinamento;
- Possui baixo custo de aquisição;
- É de fácil utilização, ou seja, *user-friendly* (amigável);
- Possibilitar tempo de análise reduzido.

As evidências apresentadas até aqui nos mostraram que: (a) a metodologia DFMA deve ser utilizada durante o desenvolvimento integrado dos produtos; (b) que os projetistas iriam se beneficiar de uma ferramenta para sua aplicação; (c) que a maior dificuldade na utilização de *softwares* e ferramentas dedicadas é a falta de tempo e de pessoal qualificado e dedicado a esta atividade; (d) que o alto custo de aquisição de ferramentas inibe seu uso.

5.4 Desenvolvimento de uma ferramenta como guia

Conforme comentamos nos capítulos anteriores, existe uma grande resistência humana na implementação de conceitos novos e desconhecidos.

Mencionamos no item “3.5 Resistências encontradas durante a implementação do DFMA”, as mais freqüentes razões para a não utilização do DFMA em novos projetos.

Analisando os dados reportados e evidenciados pela produção, manutenção e cliente e através da experiência profissional obtida durante participação do desenvolvimento de produto, fabricação, manutenção e assistência técnica de vários modelos de aviões, percebemos que a resistência humana, ou simples falta de motivação, à implementação da metodologia DFMA é ainda maior quando essa se dá por intermédio de um *software*. Nesta condição, os funcionários precisam ser treinados e passar por uma fase de familiarização com o *software* e com a metodologia ao mesmo tempo, o que demanda mais tempo e dificulta ainda mais a implementação.

Visando facilitar a aplicação dos conceitos de DFMA, desenvolvemos uma ferramenta simples, em forma de quadros de verificação dos pontos importantes a serem analisados e explorados, que servisse como guia durante o desenvolvimento do produto.

A ferramenta criada pode ainda ser utilizada como instrumento de treinamento para novos funcionários e aqueles que necessitam apenas de noções básicas sobre a metodologia

DFMA, sem, no entanto precisar se aprofundar em ferramentas complexas.

5.5 Guia de Processo para DFMA

O Guia de Processo para DFMA consiste de uma série de 12 quadros, com as verificações a serem seguidas e utilizadas como guia de auxílio aos Engenheiros de Projeto e Manufatura durante as fases de concepção e detalhamento do produto.

A ferramenta desenvolvida define os requisitos de DFMA específicos aplicados no projeto aeronáutico e a seqüência lógica dos passos a serem seguidos e verificados durante a execução do projeto. O objetivo é garantir uma manufatura fácil e simples, além de proporcionar uma qualidade intrínseca ao produto já durante a fase de concepção, evitando assim, problemas durante a montagem final e necessidades de modificações de última hora.

É importante destacar que o Guia de Processo para DFMA é uma ferramenta desenvolvida principalmente para o projeto do produto, visando sanar as dificuldades encontradas na fase de montagem final de aeronaves, visto que esta etapa da produção demanda grande quantidade de mão-de-obra e o prazo de entrega geralmente é curto. Contudo, devido ao fato de utilizar os princípios básicos do DFMA, pode ser também aplicada em outras operações de fabricação e montagem de conjuntos, como, por exemplo, peças primárias e subconjuntos.

Sendo assim, e considerando a aplicação efetiva dessa ferramenta nas fases citadas acima, espera-se que bons resultados também sejam observados nas fases posteriores de manutenção e operação dos aviões.

Para cada uma das fases do desenvolvimento de um novo avião, são definidos e pré-estabelecidos os macro-processos que devem ser concluídos antes de iniciar a fase seguinte. É neste momento que se deve iniciar a aplicação das regras do DFMA para simplificar e facilitar

a manufatura e manutenção de aeronaves.

Segue abaixo as macro-tarefas definidas para serem realizadas em cada uma das fases de concepção (II) e detalhamento (III):

a) Fase de concepção – definições iniciais:

- Definição básica do produto - modelamento
- Interface entre os sistemas e estrutura da aeronave
- Análises de Engenharia

b) Fase de detalhamento:

- Definição dos materiais
- Definição das tecnologias
- Elaboração dos desenhos e roteiros

Sendo assim e com base nas macro-tarefas pré-estabelecidas, análises foram feitas com o objetivo de se definir quais as verificações relevantes deveriam ser consideradas em cada uma das fases. Estas análises foram realizadas e as verificações definidas com base nos problemas produtivos detectados com maior frequência em todo início de produção, além de contar também com a experiência prática adquirida durante a participação no desenvolvimento integrado de vários projetos de aeronaves.

A partir daí, foram elaboradas diferentes questões que possuem relação direta com as macro-tarefas e consideradas de extrema importância para o projeto aeronáutico durante o desenvolvimento do avião, feitas sob a ótica dos requisitos do DFMA.

É claro que muitos requisitos do DFMA são genéricos para qualquer tipo de produto e outros mais específicos. Sendo assim, tudo aquilo que a metodologia pode contribuir para que a manufatura do avião seja facilitada, foi agregado e utilizado como ferramenta dentro de cada

macro-tarefa a ser executada em cada uma das 2 fases (concepção e detalhamento). Além dos requisitos de DFMA voltados para este tipo de produto em específico, experiências práticas adquiridas durante as fases de fabricação de outros aviões também foram levados em consideração.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram a estrutura das questões originadas a partir dos macro-processos e que estão divididas pelos requisitos de análise e seus tópicos a serem considerados nas fases de concepção e detalhamento do produto (II e III).

FIGURA 5.1. Requisitos para análise na fase II (concepção)

FIGURA 5.2. Requisitos para análise na fase III (detalhamento)

Dentre inúmeras questões possíveis de serem incluídas, foram escolhidas as 06 mais específicas para cada uma das fases (concepção e detalhamento). Essas 12 questões denominadas requisitos para análise foram definidas pelo fato de estarem fortemente relacionadas com a natureza das causas mais comuns que geram impacto direto nas atividades da produção, manutenção e serviços da aeronave. Essa definição levou também em consideração todo o histórico dos problemas mais frequentes reportados em projetos de aeronaves produzidas anteriormente, que não estão mais sendo fabricadas, mas que requerem manutenção pelo fato da frota ainda estar em operação.

Após a definição das questões chamadas de requisitos para análise (mostradas nas Figuras 5.1 e 5.2), a aplicação do DFMA específico para cada uma delas e através da utilização da experiência prática adquirida neste ramo da indústria e sustentável base de conceitos técnicos, foi possível a realização do desdobramento de cada uma delas, o que possibilitou a criação dos quadros de análises a serem utilizadas como uma ferramenta guia, para auxiliar os Engenheiros no desenvolvimento do projeto da aeronave.

Os quadros desenvolvidos para execução das análises em cada uma das fases do desenvolvimento do avião, seus conteúdos, regras e exemplos de aplicação serão mostrados e explicados detalhadamente no próximo item (5.6).

A Figura 5.3 ilustra abaixo a estruturação de como surgiram os quadros de verificações que deram origem à ferramenta chamada *Guia de Processo para DFMA*, que foi elaborada proveniente do desdobramento dos macro-processos pré-estabelecidos e definidos para serem atingidos em cada uma das fases do desenvolvimento do produto.

FIGURA 5.3. Desdobramento dos macro-processos em quadros de verificações

O *Guia de Processo para DFMA* é composto por 12 quadros onde cada um deles contém a relação de verificações e análises a serem feitas pelos Engenheiros (Manufatura, Projeto, Produto, Qualidade e Ferramental) participantes da equipe de Engenharia Simultânea durante o desenvolvimento integrado do produto. As informações deverão estar em consenso, integradas e serem aprovadas pelos Engenheiros dos diferentes departamentos. O guia será totalmente conceituado e explanado com detalhes no próximo tópico (5.6).

FIGURA 5.4. Denominação dos quadros de verificações

As verificações contidas em cada um dos quadros devem funcionar como um “*check list*” dos passos a serem seguidos para cada peça primária, conjunto ou desenho de instalação, antes da liberação para fabricação e montagem, de modo que todos os pontos mais importantes a serem considerados no âmbito do DFMA.

Os Engenheiros responsáveis pelas análises devem analisar profundamente os requisitos estabelecidos no *Guia de Processo para DFMA* e suas análises e observações cadastradas nas planilhas eletrônicas e em seguida, armazenadas no banco de dados da empresa.

5.6 Quadros de verificações para análise

Os quadros para análise de DFMA dos tópicos de projeto aplicados na indústria aeronáutica foram elaboradas em 12 grupos de verificações, que estão divididos entre os requisitos de análise dos aspectos mais importantes a serem considerados nas fases II (concepção) e III (detalhamento) do desenvolvimento do produto e que afetarão diretamente a manufatura, além das demais atividades de manutenção e revisões, que serão executadas durante todo o período que esta aeronave estiver em operação.

O conteúdo de questões que compõe cada tópico a ser analisado visa determinar e evidenciar se as análises estão sendo feitas amplamente e se as verificações específicas para cada item estão sendo utilizadas adequadamente.

Estes quadros com evidências das realizações das verificações durante o desenvolvimento de produto da aeronave em questão, deverão ficar arquivadas em um banco de dados, de modo a possibilitar consultas futuras, além de auxiliar nas melhorias de projeto da aeronave e concepção de novos produtos.

O primeiro quadro de análise, Quadro 1, visa determinar se a concepção do produto está sendo elaborada da maneira mais simples possível, ou seja, com o menor número de partes possível.

A simplificação do projeto leva a uma maior facilidade de montagem do produto, além de facilitar no momento da manutenção e substituição de componentes. Deve-se ressaltar a necessidade de avaliar bem a necessidade de um componente, devendo sempre procurar reduzir ao máximo o número de componentes do produto final. É importante sempre a análise da possibilidade de integrar componentes quando possível (itens a, b e c da tabela), pois componentes integrados não precisam ser montados, e geralmente possuem menor custo de fabricação comparados com a soma dos custos das peças separadas.

QUADRO 1 – Número de peças da montagem

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>O componente do sistema possui movimento relativo em relação ao conjunto</i>	<i>Criação de nova peça sem necessidade.</i>
<i>(b)</i>	<i>Necessidade de projetar componentes separados para facilitar a remoção e desmontagem</i>	<i>Dificuldade nas atividades de manutenção da aeronave.</i>
<i>(c)</i>	<i>Existe necessidade de especificação de diferentes materiais por motivos físicos/químicos</i>	<i>Aumento do número de componentes na montagem.</i>
<i>(d)</i>	<i>Possibilidade de utilização de elementos de encaixe ao invés de prendedores</i>	<i>Componentes desnecessários usados na montagem.</i>

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são o CAD e banco de dados com todas as informações necessárias para consultas.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento de Hh (hora-homem) de projeto e processos;
- Dificuldades nas atividades de montagem e manutenção;
- Aumento do tempo de fornecimento dos componentes;

Este quadro deve ser utilizado quando os sistemas e segmentos estruturais da aeronave estiverem sendo concebidos, de modo que a quantidade de peças de uma determinada montagem seja definida adequadamente para facilitar a montagem final, a manutenção da aeronave e a reposição de peças. É importante salientar a importância da efetiva participação da Engenharia de Manufatura nesta fase de concepção, pois os processos de fabricação e as origens tecnológicas a serem aplicados nas peças, devem sempre que possível, serem definidos com o objetivo de unir o maior número de partes possível em uma única peça, visando eliminar montagens desnecessárias, porém sem prejudicar os requisitos de remoção, desmontagem e manutenção.

Segue abaixo um exemplo clássico da possibilidade de simplificação do número de partes no projeto de um conjunto. Neste caso o projeto do micro-interruptor foi simplificado com a agregação de 3 peças (A,B e C) em uma única (X) somente, além de eliminar a necessidade de prendedores como rebites, parafusos, arruelas e porcas, o que possibilitou a redução dos custos de fabricação e facilitou os requisitos de montagem e manutenção, sem prejudicar a funcionalidade do sistema.

FIGURA 5.5. Simplificação de projeto

O Quadro 2 tem por objetivo orientar os projetistas quanto às condições de acessibilidade de uma determinada montagem e ergonomia do operador. As análises de acesso definem se a montagem é possível em uma determinada região, proporcionam a determinação de quantos operadores podem ocupar o mesmo espaço físico em um determinado tempo, informam a necessidade de desenvolvimento de ferramentas especiais para a execução de uma

determinada atividade e auxiliam na elaboração da sequência de montagem do roteiro de operações. Todas essas considerações devem levar em conta a adaptação do trabalho às características dos indivíduos, com o objetivo de proporcionar ao operador o máximo de conforto, segurança e bom desempenho de suas atividades no trabalho.

QUADRO 2 – Acessibilidade e ergonomia na montagem

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito da falha na análise</i>
(a)	<i>Existência de espaço suficiente para execução da montagem em determinada região, suficiente para não gerar esforço físico excessivo.</i>	<i>Dificuldade de posicionamento na região, esforço físico excessivo e indesejado do corpo.</i>
(b)	<i>Necessidade de desenvolver ferramentas especiais para possibilitar montagem e favorecer a ergonomia do operador</i>	<i>Impossibilidade da execução da montagem na região e esforço físico e indesejado do corpo.</i>
(c)	<i>Possibilidade da execução de torque, lacre e freio em conexões e prendedores em todas as regiões necessárias.</i>	<i>Impossibilidade da complementação e finalização da montagem.</i>
(d)	<i>Possibilidade de utilização de equipamentos de apoio nas adjacências da aeronave para auxiliar na postura durante as atividades.</i>	<i>Dificuldades de acesso a todas as regiões do avião e esforço físico indesejado.</i>

Este quadro deve ser utilizado durante a fase de concepção do projeto, quando todas as análises das restrições do espaço físico para definição da arquitetura dos sistemas do avião, posicionamento de componentes, suportes e equipamentos dentro da aeronave, estão sendo concebidos com o intuito de buscar os melhores padrões de acessibilidade possível.

O objetivo é garantir a melhor otimização possível das regiões da aeronave em termos de espaço físico e possibilitar a execução de um maior número de montagens num mesmo intervalo de tempo (atividades em paralelo) e um maior número de operadores possível na mesma região, o que irá contribuir para uma montagem mais simples, rápida e de fácil manutenção. O estudo de acessibilidade deve estar sempre relacionado com a ergonomia, onde as condições do espaço físico irão contribuir para um melhor posicionamento e postura do operador. A Ergonomia deve ser um fator considerado de forma mais ampla, visto que

muitas vezes em virtude da característica do projeto, não é possível melhorar os acessos. Sendo assim, as Engenharias de Manufatura e de Ferramental devem trabalhar em conjunto com o Projeto, de modo a planejar e prever recursos de apoio que auxiliem a obtenção de uma melhor condição ergonômica e saúde para o operador. Exemplos típicos disso são carrinhos de apoio com encosto reclinável para atividades sob o avião, cadeiras para trabalho sentado em regiões críticas, plataformas de apoio, chaves especiais, ferramentas e máquinas que possam reduzir o esforço físico do operador.

Tudo isso deve ser previsto na fase de concepção do produto, visto que é necessária a validação antes da utilização definitiva na linha de montagem, além da possibilidade de revisões no projeto do produto, que possam vir a afetar os ferramentais fabricados, obrigando a incorporação de modificações. O projeto deve permitir a realização da sequência de montagem conforme requisitos técnicos do sistema, possibilitar as ligações entre sistemas adjacentes, permitir a realização das finalizações de montagem como aplicação de torque controlado em conexões e parafusos, freios e lacres de segurança em regiões controladas, além de possibilitar acesso também para atividades de inspeção e manutenção.

Muitos dos recursos desenvolvidos para a linha de montagem, também poderão ser utilizados pelos operadores para facilitar as atividades de manutenção.

As análises de acessibilidade e ergonomia devem ser feitas de forma mais rigorosa em aeronaves militares e comerciais de pequeno porte, onde a restrição de acesso em virtude do tamanho é mais acentuada. Nos últimos tempos, tem crescido muito o número de recursos virtuais disponíveis no mercado que auxiliam este tipo de análise via computador, onde se pode antever e simular as condições de acessibilidade de cada montagem antes da real montagem no protótipo na linha de produção.

A Figura 5.6 mostra um exemplo de restrição de espaço físico, onde duas montagens tecnicamente independentes ocorrem ao mesmo tempo na cabine e que exigem a necessidade

de mais operadores do que o espaço comporta.

FIGURA 5.6. Estudo de acessibilidade na montagem

A próxima Figura 5.7 mostra a simulação das condições ergonômicas que os montadores estarão submetidos durante a realização das montagens na fuselagem do avião, além de permitir a avaliação se as plataformas e ferramentais atendem os requisitos da ergonomia.

FIGURA 5.7. Estudo ergonômico via manufatura digital

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são a manufatura digital para efeito de análises e simulações e realidade virtual para verificação das interfaces e condições reais do projeto.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento do ciclo produtivo em virtude de retrabalhos e remoções;
- Aumento do ciclo produtivo em função de readequação da MO;
- Dificuldade de adequação de mão-de-obra nas regiões de trabalho.
- Afastamento de funcionários por problemas de saúde;
- Eventual necessidade de HE (horas-extras).

O Quadro 3 tem como objetivo garantir que os projetos de estrutura da aeronave sejam concebidos em compatibilidade com os sistemas do avião, ou seja, as interfaces estejam definidas corretamente.

QUADRO 3 – Compatibilidade entre sistemas e estrutura

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito da falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Previsão de suportes na estrutura da aeronave para possibilitar a instalação de todos os sistemas da aeronave.</i>	<i>Impossibilidade de instalação dos sistemas no momento da montagem.</i>
<i>(b)</i>	<i>Previsão de áreas preparadas para metalização nos desenhos de estrutura ou sistema.</i>	<i>Necessidade de realização de retrabalhos nas peças para possibilitar a passagem da corrente elétrica.</i>
<i>(c)</i>	<i>Compatibilidade de tamanho dos prendedores fixos na estrutura com os destinados a fixação dos sistemas.</i>	<i>Impossibilidade de montagem e necessidade de troca de componentes.</i>
<i>(d)</i>	<i>Compatibilidade de tolerâncias de montagem das peças unidas entre si.</i>	<i>Ocorrência de atritos que ocasionam ajustes de peças..</i>
<i>(e)</i>	<i>Necessidade de análise de interferências entre a estrutura com os sistemas adjacentes.</i>	<i>Ocorrência de atritos, folgas e degraus excessivos entre as peças na montagem.</i>

Isso significa definir todos os pontos de interface de um projeto em relação ao outro, ou seja, tudo que um projeto precisa prever para que a montagem do outro ocorra sem problemas e que nenhuma interface fique prejudicada por falta da análise conjunta durante a fase de desenvolvimento. As montagens dos sistemas da aeronave tais como: ar condicionado, combustível, elétrica, aviônica, hidráulica, trem de pouso, motores, etc., devem ser garantidos pelas provisões estruturais de interface.

Esta análise deve ser considerada como uma das mais importantes na fase de concepção do produto, visto que a maioria dos problemas detectados na linha de montagem durante a montagem do primeiro protótipo é por motivo de incompatibilidade de projetos.

O objetivo é garantir que problemas dessa natureza sejam reduzidos através de uma rigorosa análise virtual feita pelo carregamento dos modelos 3D e simulação digital das interfaces, a ser realizada pelas áreas de Projeto dos diferentes sistemas e estrutura em questão. As análises podem ser realizadas em reuniões semanais com o acompanhamento da Manufatura, no decorrer do desenvolvimento e evolução do projeto. Quanto melhor for a exploração e verificação das interfaces durante as análises, melhor será o resultado encontrado na linha de produção durante a fase de montagem da aeronave, além de contribuir para redução das horas de trabalho da Engenharia de Suporte e diminuição dos custos com retrabalhos.

Exemplos de falhas dessa natureza podem ser resumidos em um simples furo na estrutura com diâmetro menor que o diâmetro do conector elétrico a ser instalado, ausência de suporte para fixação de um determinado tubo hidráulico, atrito entre uma mangueira de combustível com um perfil estrutural, ou até mesmo a inexistência de área preparada na peça para possibilitar contato de interface e garantir a condutibilidade elétrica (metalização) em caso de necessidade.

O exemplo a seguir ilustra um caso de compatibilidade entre o projeto estrutural e o

projeto do sistema de combustível de uma determinada região da aeronave, onde as interfaces para fixação (suportes), previsão das superfícies preparadas para metalização (para possibilitar a passagem da corrente elétrica) e os prendedores utilizados (parafusos, porcas e arruelas) foram corretamente definidos, possibilitando a garantia de uma montagem ideal.

FIGURA 5.8. Compatibilidade entre projetos de estrutura e sistemas

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são a manufatura digital para efeito de análises e simulações e realidade virtual para verificação das interfaces e condições reais do projeto.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento de Hh com ajustes na montagem
- Aumento de Hh devido à necessidade de retrabalhos;
- Custos para correção dos desenhos afetados.

O Quadro 4 trata dos pontos a serem observados durante a concepção do projeto com o intuito de facilitar a manutenção e serviços da aeronave que persistirão por toda sua vida em operação, além de garantir que não gere insatisfação do cliente por motivos de custos e dificuldades durante as atividades cotidianas de manutenção e serviços no operador.

QUADRO 4 – Facilidade na manutenção

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Atendimento aos requisitos de remoção e desmontagem de peças.</i>	<i>Dificuldade nas atividades de manutenção e substituição.</i>
<i>(b)</i>	<i>Possibilidade de simplificação e visualização das peças que necessitam de manutenção e testes periódicos.</i>	<i>Dificuldades de interpretação e falta de auto-orientação ao operador.</i>
<i>(c)</i>	<i>Possibilidade de utilização de decalques ou placares de indicação de aviso de revisão</i>	<i>Possibilidade da não execução da manutenção na data prevista.</i>
<i>(d)</i>	<i>Possibilidade de utilização de peças padronizadas e de fácil aquisição.</i>	<i>Dificuldade em caso da necessidade de substituição</i>
<i>(e)</i>	<i>Possibilidade de projetar peças que impeçam a montagem errada.</i>	<i>Probabilidade da ocorrência de erros e aumento de tempo durante as atividades.</i>

Estas verificações devem ser efetuadas durante fase de concepção do produto, onde está sendo definida a arquitetura do sistema e é o momento ideal para uma melhor análise das condições que facilitarão a manutenção. Para este tópico é de extrema relevância o acompanhamento da Engenharia de Manufatura nas definições, pois as experiências adquiridas nas atividades de produção irão contribuir para uma definição mais simples e prática. É de extrema importância esta análise, pois afetará a aeronave por toda sua vida em operação.

O objetivo é que o sistema seja o mais prático e simples possível, e que possa contribuir para facilitar as atividades rotineiras de manutenção, tais como: abastecimento e drenagem de combustível, reabastecimento e drenagem do sistema hidráulico, lubrificação de trem de pouso, calibração de pneu, abastecimento de oxigênio e óleo do motor, etc.

O sistema deve permitir também a facilidade para desmontagem e remoção de peças e equipamentos em casos de manutenção preventiva e corretiva, além de eventuais necessidades de substituição e troca de componentes. Verificar sempre a possibilidade da utilização de equipamentos padronizados de fácil aquisição no mercado e que seja comum com os já utilizados em outros modelos de aeronaves. O sistema deve possibilitar facilidade de acesso aos equipamentos e componentes e na medida do possível ser auto-explicativo, o que irá auxiliar no caso de pesquisas de peças e atividades de apoio na pista.

Durante a fase de concepção, sempre deve ser considerado o histórico, as experiências adquiridas, as dificuldades e os erros cometidos em projetos anteriores. Isso irá contribuir para que o projeto do novo avião não tenha os mesmos problemas já conhecidos e que dificultam os serviços na aeronave durante toda sua vida em operação.

A Figura 5.9 mostra um exemplo de projeto em que a região para a instalação da bateria foi definida em função do compartimento eletrônico estar localizado na lateral da aeronave, o que possibilitou a acessibilidade e facilidade durante as tarefas de manutenção da

bateria do avião.

FIGURA 5.9. Localização da bateria da aeronave

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são a manufatura digital para efeito de análises e simulações e realidade virtual para verificação das interfaces e condições ideais do projeto em atendimento aos requisitos de manutenção

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento do tempo durante as atividades de manutenção;
- Custos elevados com peças de reposição;
- Indisponibilidade da aeronave para voo;
- Insatisfação do cliente.

O Quadro 5 valoriza a utilização de peças ou conjuntos de projetos já existentes ou de geometria similares já utilizados em outros modelos de aeronaves. Essa prática irá minimizar

o tempo de projeto e reduzir os custos com o desenvolvimento e qualificação de novos fornecedores, proporcionando ganhos significativos em termos de prazos do projeto e da fabricação.

QUADRO 5 – Utilização de peça ou conjunto similar

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Possibilidade de utilização do projeto de alguma peça já existente.</i>	<i>Criação sem necessidade de uma nova peça semelhante.</i>
<i>(b)</i>	<i>Existência de peça com geometria que atenda os requisitos do projeto.</i>	<i>Criação de nova com a mesma geometria.</i>
<i>(c)</i>	<i>O material da peça existente é compatível com a nova necessidade.</i>	<i>Incompatibilidade de materiais na montagem.</i>
<i>(d)</i>	<i>Possibilidade de compra de matéria-prima ou peça de um fornecedor já existente.</i>	<i>Desenvolvimento de novo fornecedor ou subcontratação do projeto da peça.</i>

Esta análise deve ser feita durante a fase de concepção do produto, quando a arquitetura do sistema está sendo criada. O objetivo é utilizar o maior número possível de partes já criadas e desenvolvidas, além de matérias-primas (alumínios, aços, titânio, etc.) e materiais de consumo (graxas, selantes, tintas, etc.) já utilizados em outras montagens e/ou projetos.

Na aviação existe uma grande similaridade entre sistemas de aeronaves, o que possibilita a aplicação desse conceito no desenvolvimento de novos projetos. Projetos de outros modelos de aeronave devem ser utilizados como referência durante o desenvolvimento de um novo, pois muitas vezes a comunalidade entre sistemas pode auxiliar no desenvolvimento e aproveitamento de projetos de peças já existentes.

É importante o trabalho em conjunto das Engenharias de Projeto e Materiais nesta fase de definições.

As informações devem ser consultadas no banco de dados da empresa via sistema PDM e CAD onde estão cadastrados e disponíveis para utilização.

Outra vantagem da utilização de uma peça com projeto existente é a robustez do processo de fabricação que já se encontra estabelecido e estabilizado, o que não demandará tempo com desenvolvimento e adequação na fabricação.

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são o CAD, o banco de imagens com desenhos e também o banco de dados com todas as informações necessárias para consultas.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Duplicação de Hh de projeto para uma nova peça;
- Duplicação de Hh de processo para elaboração de novo roteiro;
- Atraso na liberação dos desenhos de montagem.

O Quadro 6 auxilia na definição das matérias-primas a serem utilizadas nas peças e materiais que trabalham em contato. Deve haver uma preocupação com as condições existentes na região de contato entre materiais diferentes.

Um problema comum ou que ocorre freqüentemente é a corrosão, fenômeno que ocorre nos metais como o resultado de uma ação química com o passar do tempo e utilização. Para evitar ou diminuir os efeitos da corrosão e outros problemas de materiais, as propriedades dos materiais devem ser analisadas durante a fase de projeto, de modo a evitar problemas futuros que afetará a aeronave durante a vida útil dos componentes.

QUADRO 6 – Compatibilidade de materiais

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
(a)	<i>Especificação adequada dos materiais metálicos de interface.</i>	<i>Possibilidade de desgaste e corrosão.</i>
(b)	<i>Especificação adequada dos materiais não-metálicos de interface.</i>	<i>Possibilidade de danos nas peças.</i>
(c)	<i>Especificação técnica dos materiais de consumo (selante, graxa, óleo, etc.).</i>	<i>Problemas referente a proteção, vedação, etc.</i>
(d)	<i>Existência dos materiais especificados já cadastrados e comprados pela empresa.</i>	<i>Aumento do tempo de desenvolvimento.</i>
(e)	<i>Possibilidade de utilização de materiais alternativos ou substitutos.</i>	<i>Aumento do tempo de desenvolvimento.</i>

Esta análise deve ser iniciada quando a concepção do projeto já foi finalizada e iniciou a fase de detalhamento das partes componentes da montagem.

Deve-se dar prioridade em utilizar os padrões de materiais já conhecidos, existentes e já especificados pela empresa para outros casos e aplicações. As normas técnicas dos materiais devem ser sempre consultadas antes da especificação no projeto e o estreitamento da interface entre as Engenharias de Projeto e Materiais nesta fase do desenvolvimento é extremamente importante para as definições e sucesso futuro. As verificações devem ser efetuadas sempre quando existir peças de diferentes materiais em contato, selagem de interfaces, interior de tanques e combustível, paredes de fogo e cavernas de pressão, materiais não metálicos para vedação de cabine, inibidores de corrosão, graxas para lubrificação, etc. Sempre que possível, itens alternativos devem ser previstos no projeto para utilização em casos de necessidade.

Deve-se também ter em mente, no entanto, que o assunto é especialmente dinâmico, devido à constante e rápida evolução da indústria aeronáutica, empenhada na busca de componentes com maior resistência aos esforços, às deformações, à corrosão, à fadiga e às altas temperaturas, e com baixo custo e peso.

A Figura 5.10 exemplifica a aplicação e especificação correta da selagem e em caso do contato de peças de diferentes materiais a serem utilizados como interface (A), selagem de

filete em um interior de tanque de combustível (B) e selagem de interface para vedação de região pressurizada (C), onde ilustra a necessidade da especificação e determinação correta do selante a ser utilizado para este tipo de aplicação em regiões pressurizadas dentro da cabine. Os materiais utilizados devem garantir as exigências de temperatura, pressão, umidade, intempéries, resistência à reação química com o combustível, etc., conforme os requisitos de cada projeto definido pela Engenharia.

FIGURA 5.10. Selagens de interface e filete

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são normas técnicas de Engenharia, especificações de materiais e histórico e experiências adquiridas em outros projetos já desenvolvidos.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Diminuição do tempo previsto para revisões em virtude de desgastes;
- Diminuição do tempo previsto para revisões em virtude de corrosões;
- Custos altos durante o desenvolvimento;
- Problemas durante a operação da aeronave.

O Quadro 7 reflete a relevância dos cuidados a serem formados durante a elaboração da estrutura do produto, que é a relação de todos os componentes (fabricados e comprados) a serem utilizados em uma determinada montagem do avião.

É um banco de dados, composto pelos números de identificação das peças interligadas logicamente, gerado a partir de desenhos, de forma a propiciar, a qualquer tempo, a obtenção de informações sobre a configuração projetada de uma peça ou produto final. É a partir desse banco de dados que o sistema de planejamento de materiais deverá liberar as ordens de fabricação aplicáveis a cada produto fabricado.

Além disso, a estrutura do produto de cada desenho é quem irá fornecer a informação completa de todos os componentes utilizados, ou seja, irá gerar para a produção a lista de materiais necessária para cada montagem, com a definição de todos os atributos das peças como: origens tecnológicas, responsáveis pela fabricação, denominação, codificação e quantidade necessárias de cada item discriminado.

QUADRO 7 – Estrutura do produto

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Criação e cadastro das peças e requisitos no banco de dados em tempo hábil.</i>	<i>Atraso na previsão de compra material e fabricação de peças.</i>
<i>(b)</i>	<i>Definição correta do tipo da peça conforme origem tecnológica e responsável pela fabricação.</i>	<i>Definição incorreta dos fabricantes e montadores</i>
<i>(c)</i>	<i>Definição da quantidade correta de cada componente necessário para a montagem.</i>	<i>Problemas de fornecimento de material e atrasos.</i>
<i>(d)</i>	<i>Definição da aplicabilidade de utilização das peças e montagem por modelo de aeronave.</i>	<i>Impossibilidade da emissão das ordens de produção.</i>

A estrutura do produto identifica a configuração de projeto, de cada nova versão fabricada e do modelo de aeronave. É o conjunto de características físicas e/ou funcionais de uma peça ou produto final, definidas em documentos técnicos apropriados (desenhos/especificações) e obtidas na sua fabricação.

É na fase de detalhamento que se deve cadastrar todo componente necessário para uma determinada montagem, quando todos os modelos já foram criados e definidos na fase anterior de concepção.

A elaboração da estrutura do produto deve ser feita em conjunto pelas Engenharias de Projeto e Manufatura e está diretamente relacionada com a definição do número de partes da montagem (comentado na tabela 1), além de ser o que irá gerar a lista de peças do desenho de montagem. Nesta etapa os números das peças devem ser interligadas em forma de cascata ou árvore, onde a estrutura é montada em níveis, indo desde o 1º que é a montagem no avião (instalação na linha de montagem), 2º que são os subconjuntos, 3º que são as peças-primárias (ex. chapas, usinados e compostos) e 4º nível que são as matérias-primas utilizadas para fabricação das peças-primárias.

Durante a elaboração da estrutura do produto deve ser adotado o critério de cadastrar os itens mais caros o mais tarde possível, pelo fato da menor agregação de custos e redução de material em processo. Outro fator importante e que deve ser considerado é o cadastramento

correto da quantidade dos itens utilizados, para que não ocorram surpresas como falta de material no momento da montagem. Os sistemas CAD atuais utilizados para projeto possuem o recurso de definir e informar a quantidade exata de cada componente utilizado na montagem, o que irá auxiliar no momento do cadastramento das quantidades.

A previsão e cadastro de itens alternativos para componentes críticos da montagem é sempre importante, pois em caso de falta de material por motivos de mercado e fornecedor a produção não será prejudicada.

O esquema abaixo define um modelo genérico de estrutura de produto para efeito de exemplificar a ligação de todos os componentes necessários que possibilitam a montagem de um determinado avião, alocados nas diferentes estações de montagem e definidos conforme os critérios de precedência de montagem (ver tabela 11).

FIGURA 5.11. Modelo genérico de estrutura do produto

A ferramenta utilizada para análise nesta fase é a banco de dados que contém todas as informações referentes às tecnologias e processos de fabricação a serem aplicados.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Atraso na emissão das ordens e início da fabricação;
- Atraso na disponibilidade de peças e equipamentos para a produção;
- Inconsistência na carga e capacidade das plantas produtivas.

O Quadro 8 cita os pontos mais importantes a serem observados e incorporados nos desenhos de produto, de modo a minimizar dúvidas e falta de informações durante o momento da montagem ou fabricação.

Os desenhos devem representar graficamente todos os requisitos técnicos de Engenharia a serem executadas para possibilitar a manufatura fácil do produto.

Falhas nos desenhos podem representar problemas na linha de montagem e onerar o custo de manufatura da aeronave, em virtude da necessidade de apoio das áreas de suporte ao produto.

QUADRO 8 – Desenhos de produto

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Quantidade de componentes da lista de material em acordo com a indicação do desenho de produto.</i>	<i>Geração de dúvidas e possibilidade de falta de material na montagem.</i>
<i>(b)</i>	<i>Existência de todos os componentes comprados no estoque da empresa.</i>	<i>Falta de material na linha de montagem.</i>
<i>(c)</i>	<i>Representação no desenho de cortes, vistas e detalhes, conforme necessidade.</i>	<i>Dúvidas e deficiência de informações na linha.</i>
<i>(d)</i>	<i>Indicação de notas contemplando os requisitos de projeto.</i>	<i>Ausência de informações técnicas no desenho.</i>

Os desenhos detalhados devem ser criados a partir dos modelos 3D concebidos anteriormente na fase de concepção. Nesta etapa é fundamental a participação e acompanhamento da Engenharia de Manufatura junto ao projeto, pois sua contribuição irá auxiliar na definição da representação gráfica a ser utilizada na produção, com o objetivo de auxiliar a interpretação e facilitar as atividades produtivas, além de servir de dados de entrada para desenvolvimento de eventuais ferramentais necessários (Ex. gabaritos de posicionamento, chaves especiais, cintas para içamento, etc.). Vistas, cortes e detalhes devem ser incluídos sempre que necessário e estarem espaçados entre si e em relação à vista principal para não gerar conflito de informações. Dados complementares para auxiliar a montagem devem ser incluídos em formas de notas na representação gráfica. Cada componente da montagem deve estar identificado com o número da peça, de modo que o montador ao ler o roteiro de operações, possa relacioná-lo com o desenho.

A Figura 5.12 exemplifica um tipo de representação gráfica e a relação dos materiais necessários a serem utilizados pela área de produção para possibilitar a montagem de um conjunto mecânico.

FIGURA 5.12. Desenho e lista de peças

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são o CAD, o banco de imagens com desenhos e também o banco de dados com todas as informações necessárias para consultas.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento do Hh da Engenharia de suporte à linha;
- Atraso no fornecimento de peças;
- Custos para correção e adequação dos desenhos;
- Qualidade final do produto.

O Quadro 9 contempla os requisitos a serem aplicados durante a elaboração dos procedimentos para a produção, que são os roteiros de operações utilizados na fabricação, montagens e testes, além das publicações técnicas necessárias para manutenção e serviços da aeronave.

QUADRO 9 – Roteiros de operações

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Descritivo do processo reflete as informações contidas nos desenhos de produto.</i>	<i>Insuficiência de informações para a produção.</i>
<i>(b)</i>	<i>Definição dos passos conforme melhor seqüência de fabricação ou montagem.</i>	<i>Dificuldades e atrasos durante a montagem.</i>
<i>(c)</i>	<i>Necessidade de ilustração adicional (3D) nos roteiros de produção.</i>	<i>Aumento do tempo para interpretação dos desenhos (2D).</i>
<i>(d)</i>	<i>Procedimentos de testes refletem todos os requisitos de Engenharia especificados.</i>	<i>Verificação deficiente da funcionalidade dos sistemas.</i>
<i>(e)</i>	<i>Existência dos valores especificados para torque, vazão, pressão, etc. nos roteiros.</i>	<i>Ausência dos parâmetros para conformidade final.</i>

Os roteiros devem fornecer somente informações objetivas, valores e tolerâncias bem especificadas, utilizando se necessário, o recurso de imagens e refletindo sempre os desenhos

de produto para montagem e requisitos de Engenharia para execução dos testes funcionais e operacionais dos sistemas da aeronave.

O objetivo principal é garantir que o executante tenha meios de avaliar se o resultado da operação atende ao padrão previsto, visando a garantia da qualidade do produto. O documento resultante é o roteiro de operações, que é a base para se realizar o planejamento da produção e serve como referência à produção propriamente dita. Por isso é que se considera o roteiro do processo como o elo de ligação entre projeto do produto, o planejamento da produção e também o chão-de-fábrica (área de produção). O roteiro é um documento que reúne todas as informações necessárias para transformar o desenho do produto em um produto acabado, definindo toda seqüência e especificando a rotina a ser executada durante a montagem.

É de inteira responsabilidade da Engenharia de Manufatura emitir os procedimentos para execução das atividades produtivas da linha de produção, incluindo instruções e croquis para montagem, ferramental, lista de ferramentas, normas aplicadas e instruções da qualidade, além de acompanhar a utilização do roteiro pela primeira vez junto à produção, efetuar revisões conforme possibilidades de melhorias encontradas e incorporar modificações em virtude de revisões de projeto. O roteiro deve ser dividido em operações numeradas e contemplar as operações produtivas e de inspeção e conformidade, definidas conforme os respectivos centros de trabalho e quantidade de mão-de-obra necessária. Os recursos necessários para execução das atividades devem estar contidos no roteiro e também a qualificação dos operadores nos processos aplicados devem ser contempladas para possibilitar a execução das operações. Para itens onde existe a necessidade de registro de produção nos documentos de fabricação, campos para registro das verificações ou valores obtidos deverão ser incluídos. Ex. torque de aperto controlado, medição de resistência elétrica, etc. O modelo abaixo descreve uma operação para montagem de um conjunto mecânico, com a seqüência de

montagem, os componentes necessários e as notas aplicadas.

FIGURA 5.13. Desenho e roteiro de operações

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são o CAD, o banco de imagens com desenhos e também o banco de dados com todas as informações necessárias para consultas.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento de Hh de fabricação, montagens e testes;
- Aumento de Hh da Engenharia de suporte à linha;
- Incertezas quanto à verificação funcional de todos os parâmetros requeridos pela Engenharia de sistemas do avião.

O Quadro 10 foca nos tópicos do macro fluxo produtivo, ou seja, nas fases das linhas de montagem e pontos a serem considerados para elaboração adequada do seqüenciamento das atividades produtivas.

A rede de precedências de montagem de uma aeronave estima os tempos das montagens e testes, dividindo a aeronave em regiões de trabalho e estudando a acessibilidade em cada uma dessas regiões.

QUADRO 10 – Diagrama de precedências

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Definição correta da seqüência técnica das atividades de montagem e testes.</i>	<i>Dificuldades no gerenciamento nas atividades da produção.</i>
<i>(b)</i>	<i>Definição correta das montagens antecessoras e sucessoras.</i>	<i>Afeta seqüencial de montagem da aeronave.</i>
<i>(c)</i>	<i>Definição e cadastramento do número de horas e homens necessários para cada montagem ou teste do avião.</i>	<i>Afeta planejamento de carga e capacidade da mão-de-obra necessária.</i>
<i>(d)</i>	<i>Determinação e cadastro dos centros de trabalhos a serem utilizados</i>	<i>Não fornece visibilidade e previsão de Hh (horas homem) e HE (horas extras)</i>

O objetivo é definir o melhor seqüenciamento das montagens e testes, baseado no estudo de precedências técnicas e otimização dos recursos físicos (área, ferramentas, equipamentos, etc.). Com isso são possíveis a definição do ciclo e Hh total de montagem da aeronave, lay-out e dimensionamento da linha de produção quanto à utilização de ferramentas e gabaritos de montagem.

A responsabilidade dessa definição é da área de Engenharia de Manufatura que deve atuar nesta atividade com o objetivo de balancear a linha de montagem, ou seja, definir a seqüência de montagem do avião, levando em conta as características e restrições de espaço físico, buscando o melhor aproveitamento de mão-de-obra na montagem para obter o menor ciclo planejado possível. O balanceamento consiste em estruturar um diagrama e de

precedência, onde se define detalhadamente a interdependência entre as atividades de montagem.

Como primeiro passo, devem ser elencadas todas as atividades que farão parte da fase de montagem final, baseado nos desenhos de produto, onde cada atividade corresponderá a uma ordem de produção.

Para cada atividade deve ser estimada a quantidade de horas x homens que serão necessários para executar a montagem ou teste em questão, definidos sempre em função do espaço físico disponível e especialidade (mecânico, eletricitista, chapeador, selador, etc.).

Após a seqüência definida nas análises de precedência é possível a utilização de softwares (ex. Microsoft Project) para elaboração do diagrama de todo o sequenciamento, além de se obter os ciclos totais e distribuição da mão-de-obra por especialidade.

A Figura 5.14 mostra o balanceamento da seqüência de montagem através da representação em forma de rede PERT e também o gráfico de Gantt como ferramentas para planejamento e controle da produção, referente à montagem de parte do interior de uma determinada aeronave. As atividades foram ligadas através de precedências técnicas, o número de operadores considerado em função da ocupação do espaço físico em cada região de trabalho, a quantidade das horas disponíveis e as datas previstas para início e término de cada atividade dentro do plano de produção. Além disso, é possível a previsão dos materiais necessários em cada etapa da montagem, gerenciamento da linha de produção em função da quantidade de aviões previstos para serem montados em um determinado período e auxílio na manipulação dos recursos necessários e de pessoas.

FIGURA 5.14. Diagrama de precedências

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são os softwares específicos para este fim e a estrutura do produto com as atividades previstas para possibilitar a montagem da aeronave em questão.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Falta de dados para o gerenciamento da produção;
- Aumento de Hh em virtude da seqüência incorreta de montagem;
- Dificuldades na definição do lay-out;
- Dificuldades para previsão da contratação de pessoal.

O Quadro 11 considera a importância a ser dada para a previsão de todas as ferramentas e ferramentais necessários para execução das atividades de fabricação de peças, montagens e manutenção da aeronave. Os recursos de apoio ao solo são todos os dispositivos desenvolvidos para apoio as tarefas de produção, manutenção, reparo, verificação ou inspeção, necessários para proporcionar a fabricação da aeronave e mantê-la em perfeitas condições de operação.

Estes dispositivos devem estar disponíveis tanto nas fábricas, quanto no cliente.

QUADRO 11 – Recursos de apoio ao solo

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Previsão de ferramentas necessárias disponíveis no mercado.</i>	<i>Possibilidade de falta no momento da necessidade.</i>
<i>(b)</i>	<i>Necessidade da especificação de ferramentas especiais (a serem fabricadas) fora do padrão de mercado.</i>	<i>Impossibilidade da execução da atividade em questão.</i>
<i>(c)</i>	<i>Previsão de equipamentos de apoio (bancada hidráulica, fonte elétrica, manômetros, etc.).</i>	<i>Impossibilidade da execução da atividade em questão.</i>
<i>(d)</i>	<i>Especificações técnicas de gabaritos, plataformas, bancadas, escadas, etc.</i>	<i>Ausência de recursos de apoio à produção.</i>
<i>(e)</i>	<i>Necessidade de simulação virtual da aplicação do ferramental em relação ao produto.</i>	<i>Incompatibilidade e conflito do ferramental com o produto.</i>

O objetivo é garantir que todos os recursos estejam disponíveis e validados para utilização no momento da montagem do 1º produto (protótipo) e futuramente também possam ser entregues ao cliente juntamente com o primeiro avião.

Após o término da fase de definição conceitual do produto e início do detalhamento, já é possível e de responsabilidade da Engenharia de Manufatura prever a relação de tudo que será necessário para a linha, e em seguida elaborar as especificações técnicas para que a Engenharia de Ferramental possa iniciar suas atividades voltadas ao projeto dos ferramentais necessários para a linha de montagem. Os ferramentais deverão atender as condições de Ergonomia com relação à facilidade de manipulação, peso, conforto, segurança do operador,

simplicidade de utilização, etc. Os ferramentais e dispositivos maiores como gabaritos de montagem, carrinhos para transporte e armazenamento e plataformas, devem ser estudados em conjunto com o pessoal de “layout” através de manufatura digital, com o objetivo de garantir o melhor arranjo físico possível dentro do hangar.

Além dos ferramentais especiais e que requerem fabricação específica, deve ser previsto também os recursos padrões necessários já existentes no mercado tais como: chaves, mangueiras, manômetros, ganchos, guindastes, torquímetros, medidores de vazão, rebocadores, etc. É importante a verificação e possibilidade de utilização de recursos já desenvolvidos para outros modelos de aeronave.

A figura abaixo mostra as plataformas de apoio desenvolvidas para as atividades de complementação estrutural e pré-equipagem da fuselagem da aeronave, onde os requisitos de acessibilidade, ergonomia e layout foram considerados nas definições.

FIGURA 5.15. Plataforma de trabalho e acesso à aeronave

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são o CAD, o banco de imagens com

desenhos e também o banco de dados com todas as informações necessárias para consultas.

As conseqüências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento do ciclo de montagem e tempo das tarefas de manutenção;
- Necessidade de previsão de ferramental no momento da montagem;
- Necessidade de ajustes ou reparos após a utilização no produto.

Por fim, o décimo segundo quadro mostrado no Quadro 12 expõe a relevância que deve ser dada ao arranjo físico a ser implantado na linha de montagem, pois isso irá definir o relacionamento físico entre as diversas atividades produtivas e determinar a maneira segundo a qual os recursos físicos (material, informações e pessoas) fluirão através da operação. Em função disso, esta análise deverá ser efetuada de forma abrangente e com a melhor distribuição possível, de modo que as melhores condições sejam atendidas.

QUADRO 12 – *Layout da linha*

<i>Item</i>	<i>Análise e verificação</i>	<i>Efeito de falha na análise</i>
<i>(a)</i>	<i>Estudo do melhor fluxo de movimentação possível para a aeronave.</i>	<i>Aumento do tempo para movimentação dentro do hangar.</i>
<i>(b)</i>	<i>Definição do número de posições ou docas a serem utilizadas na montagem.</i>	<i>Afeta a quantidade de aviões previstos para a entrega.</i>
<i>(c)</i>	<i>Balanceamento da mão-de-obra nos postos de trabalho e regiões da aeronave.</i>	<i>Indefinição da quantidade de pessoas por especialidade tecnológica.</i>
<i>(d)</i>	<i>Disposição adequada das prateleiras de material de consumo e ferramentas dentro do hangar.</i>	<i>Dificuldade na obtenção de material e recursos.</i>

Muitos dos problemas relacionados com alto ciclo na produção estão diretamente relacionados a um lay-out inadequado como, por exemplo, transporte e demoras. Assim, um arranjo físico adequado pode minimizar a movimentação de materiais e pessoas no chão de

fábrica e, dessa forma, diminuir custos tornando o sistema de manufatura mais produtivo e eficiente.

O projeto da fábrica é uma atividade microscópica que procura considerar apenas a fábrica em si sem se preocupar com o meio ambiente que a cerca. O objetivo principal é a definição do arranjo físico da fábrica e dos sistemas de suporte, tais como sistema de informações, de água e energia, sistema de transporte e outros.

O arranjo físico de uma unidade fabril de aeronaves e peças, deve ser entendido como a disposição física dos vários elementos ou recursos produtivos utilizados para a produção de um avião, tais como máquinas, ferramentais, equipamentos, instalações e pessoal.

O projeto do arranjo físico é uma das etapas críticas do processo de planejamento de uma facilidade produtiva. O arranjo físico define o relacionamento físico entre as diversas atividades e determina a maneira segundo a qual os recursos transformados (materiais, informação e clientes) fluem através da operação.

Sempre deve ser considerada a melhor trajetória de movimentação do avião dentro do hangar, caso a montagem seja em forma de linha (estações) ou a melhor alocação das posições de montagem caso a montagem seja em docas. Além disso, a disposição dos materiais, equipamentos e ferramentas devem estar sempre o mais próximo do montador, proporcionando a obtenção de todos os recursos e facilidades necessárias no menor tempo possível.

A Figura 5.16 abaixo mostra uma simulação da disposição dos equipamentos de apoio (plataformas, escadas, ferramentais, etc.), materiais e pessoas em relação ao posicionamento dos aviões dentro do hangar, com o objetivo de prever a condição mais próxima possível da realidade da linha de produção.

FIGURA 5.16. Estudo de *layout*

As ferramentas utilizadas para análise nesta fase são a manufatura digital e realidade virtual para efeito de análises e simulações de otimização do espaço físico e das condições reais de movimentação de recursos, pessoas e aeronaves na linha de produção.

As consequências que poderão ocorrer, em virtude da não execução das verificações ou falha durante as análises são:

- Aumento de Hh com movimentação de aeronaves e pessoas;
- Ausência de espaço físico no hangar;
- Comprometimento do plano de produção e entregas;

Com base nos itens de verificações contidos nos 12 quadros citados e comentados acima, é possível contribuir com um guia para engenheiros de desenvolvimento, a ser utilizado durante as fases do desenvolvimento do produto.

5.7 Aplicação dos quadros de verificações

Os quadros deverão ser utilizados no decorrer das fases definidas para o desenvolvimento integrado de produto de um determinado avião.

A Figura 5.17 mostrada abaixo representa o momento adequado para aplicação de cada um dos 12 quadros de verificações durante as fases do processo de desenvolvimento.

FIGURA 5.17. Momento de aplicação dos quadros de verificações

Pode-se afirmar que com a utilização efetiva do guia de processo como ferramenta do dia-a-dia, o número de discrepâncias provenientes de DFMA durante as montagens e manutenções das aeronaves tenderão a diminuir de forma significativa.

Em seguida, os dados das análises das peças e montagens devem ser arquivados nas

pastas do banco de dados de projeto PDM para eventuais e futuras consultas, modificações e revisões. Para isso foram criadas planilhas específicas para cada um dos 12 quadros de verificações, conforme modelo ilustrado abaixo (Figura 5.18).

Guia de Processo para DFMA	PEÇA OU CONJUNTO		<i>Responsável</i>	<i>Nome</i>	<i>Data</i>			
	<i>Descrição :</i>		<i>Eng. Manufatura</i>					
	<i>Número:</i>		<i>Eng. Produto</i>					
	<i>Revisão:</i>		<i>Eng. Qualidade</i>					
Quadro 01 de verificação		<i>Aeronave:</i>		<i>Aplicabilidade:</i>				
NÚMERO DE PEÇAS NA MONTAGEM		<i>Modelo:</i>		<i>Motivo:</i>				
		<i>Cliente:</i>		<i>Prioridade:</i>				
Itens de análise:			OBS					
Componente possui movimento relativo em relação ao conjunto								
Componente separado para permitir remoção e desmontagem								
Possibilidade de elementos de encaixe ao invés de prendedores								
Possibilidade de simplificação da concepção do projeto e diminuição de partes								
Conclusão								

Guia de Processo para DFMA	PEÇA OU CONJUNTO		<i>Responsável</i>	<i>Nome</i>	<i>Data</i>			
	<i>Descrição :</i>		<i>Eng. Manufatura</i>					
	<i>Número:</i>		<i>Eng. Produto</i>					
	<i>Revisão:</i>		<i>Eng. Qualidade</i>					
Quadro 02 de verificação		<i>Aeronave:</i>		<i>Aplicabilidade:</i>				
ACESSIBILIDADE E ERGONOMIA		<i>Modelo:</i>		<i>Motivo:</i>				
		<i>Cliente:</i>		<i>Prioridade:</i>				
Itens de análise:			OBS					
Espaço suficiente para execução da montagem nas regiões da aeronave								
Necessidade de desenvolvimento de ferramentas especiais para alguma montagem								
Possibilidade de aplicação de freno, lacre e torque em conexões e prendedores								
Possibilidade de utilização de equipamentos de apoio nas adjacências da aeronave								
Conclusão								

FIGURA 5.18. Planilhas do Guia de Processo para DFMA

CAPÍTULO 6 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

6.1 Cablagens elétricas – interface entre asa e fuselagem

O estudo de caso em questão evidencia o progresso e os resultados positivos alcançados com a implantação de uma modificação de melhoria no projeto do sistema elétrico de uma aeronave leve, baseado no conceito de projeto voltado para a manufatura e manutenção, além de atender também outros requisitos do *DFX (Design for Excellence)*.

Para a elaboração dessa modificação de projeto, a ferramenta Guia de Processo para DFMA foi utilizada através das seguintes tabelas:

- Tabela 5.3 – Acessibilidade e Ergonomia na montagem;
- Tabela 5.5 – Facilidade na manutenção
- Tabela 5.6 – Utilização de peça ou conjunto similar

As verificações descritas em cada uma das tabelas foram seguidas e utilizadas como guia de auxílio aos Engenheiros na obtenção de um projeto com as características esperadas.

A melhoria se refere à separação das cablagens elétricas que fazem a ligação entre a fuselagem e semi-asas do avião, através da implantação de conectores de interface para proporcionar instalações parciais em cada segmento e posterior ligação entre as partes, baseado no conceito de “plug-in-play”. Utilizou-se a Tabela 5.6 para a definição dos conectores de interface a serem utilizados, visto que o mesmo modelo já é utilizado em outros modelos de aeronave.

O projeto anterior não contemplava esse conceito e as cablagens eram contínuas desde

a ponta das asas até a fuselagem do avião, o que dificultava as atividades de manufatura e serviços no avião, além de prejudicar outros requisitos mostrados neste capítulo. Neste caso as verificações da Tabela 5.3 contribuíram substancialmente para que esses requisitos fossem melhorados.

A ilustração abaixo mostra o encaminhamento da cablagem nas regiões da asa e fuselagem do avião, onde o conjunto de cabos elétricos inicia nas pontas das semi-asas e vão até o interior da estrutura da aeronave, sem qualquer tipo de conexão intermediária. A figura abaixo mostra somente a instalação da semi-asa direita, porém a montagem é igual e simétrica para a semi-asa esquerda.

FIGURA 6.1. Projeto sem conectores de interface

Com a implantação do novo conceito, foi possível um ganho de ciclo na montagem final de 6 horas para cada aeronave produzida, em virtude de não ser mais necessário o

término da instalação da cablagem na região interna da fuselagem, além de possibilitar a instalação das semi-asas no momento mais tarde possível, sem afetar as atividades na fuselagem, o que beneficiou as atividades de pré-equipagem da fuselagem em termos de acessibilidade às regiões dentro da estrutura e também a execução parcial dos testes de sistemas.

(A) Projeto sem conectores de interface

(B) Projeto com conectores de interface

FIGURA 6.2. Comparação entre projetos

Além disso, o novo projeto facilita as atividades de manutenção, pois em virtude de uma eventual necessidade de remoção ou substituição de uma semi-asa, o simples desacoplamento dos conectores de interface proporciona rapidez, facilidade e necessidade de um menor número de pessoas para execução da atividade.

A ilustração mostra a concepção do projeto de melhoria, onde a incorporação de suportes para os conectores de interface e segregação da cablagens das asas e fuselagem possibilitou facilidades nas atividades da aeronave.

FIGURA 6.3. Concepção do novo projeto da cablagem

Outro benefício de extrema importância foi o ganho de facilidade na remoção das semi-asas (equipadas) da aeronave, no caso da necessidade de embarque dos segmentos

equipados (fuselagem e semi-asas) para possibilitar o transporte da aeronave entre países ou continentes, quando o objetivo é a fabricação do avião em um local e operação em outro. Essa vantagem além de atender os requisitos de *Design for Assembly e Design for Maintenance*, atende também o *Design for Shipment (Projeto para Embarque)*, outra vertente do DFX e que não foi comentado nesse trabalho.

Para a implantação dessa modificação foi necessário somente a criação de mais 04 desenhos sendo eles: 02 para as peças primárias estampadas (suportes de interface) e mais 02 para a segregação das cablagens de 02 para 04. O custo dessa modificação foi pago após a fabricação de 05 aeronaves, por conta dos ganhos obtidos em termos de redução de ciclo na linha de montagem e melhoria de acesso e ergonomia.

Características do projeto **sem** conectores de interface

- Necessidade de instalação das cablagens na asa na fase anterior e complementação da instalação somente após a junção das semi-asas com a fuselagem;
- Dificuldades de acesso na região interna da fuselagem para encaminhamento e fixação das cablagens na fuselagem durante a complementação da montagem;
- Demanda de maior quantidade de operadores para execução da montagem;
- Dependência da complementação elétrica para instalação de alguns sistemas mecânicos da fuselagem em virtude de espaço;
- Dificuldades durante atividades de manutenção das cablagens elétricas em função da inexistência de interface;
- Impossibilidade de desconexão simples e rápida na interface dos segmentos após remoção das semi-asas para transporte, o que implica em desmontagem de sistemas já instalados e posterior remontagem e testes.

Características do projeto **com** conectores de interface

- Possibilidade de equipagem elétrica da fuselagem e semi-asas separadas e independentemente antes da junção dos segmentos;
- Acessibilidade e facilidade para execução da montagem dos sistemas mecânicos e fixação das cablagens na região interna da fuselagem;
- Redução de ciclo de montagem e menor número de pessoas na montagem final após a junção das asas com a fuselagem;
- Facilidades durante atividades de manutenção das cablagens elétricas em caso de necessidade de reparos e pesquisa de panes;
- Possibilidade de separação dos segmentos equipados, embalagem e embarque via marítima ou aérea em caso da necessidade de transporte do avião, sem a necessidade de desmontagem dos sistemas já instalados e posterior remontagem e testes.
- Melhoria na intercambiabilidade entre segmentos equipados e auxílio na reposição de peças.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO

7.1 Conclusões sobre a metodologia DFMA

Neste trabalho apresentamos uma ferramenta para aplicação da metodologia *Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)* na indústria aeronáutica.

Desenvolvida com uma abordagem mais simples que softwares do mercado, esta tem o propósito de promover a difusão do DFMA no ambiente de desenvolvimento de produtos da empresa.

O desenvolvimento da ferramenta, chamada Guia de Processo para DFMA, foi fundamentado em conceitos e princípios da metodologia, juntamente com as necessidades de projeto e manufatura pertinentes ao setor aeronáutico. Além disso, metodologias complementares também foram aplicadas no seu desenvolvimento visando prover uma ferramenta mais abrangente e completa para o usuário.

Um dos assuntos abordados no trabalho foi o processo de desenvolvimento de produtos, onde estão expostos comentários de várias literaturas e autores sobre este assunto. Baseado nisso, pode-se afirmar que a fase mais adequada para utilizar o DFMA no desenvolvimento de um produto aeronáutico é quando o projeto começa a ser criado, ou seja, na fase de concepção (fase II) e na fase de detalhamento (fase III). A aplicação nestes estágios de desenvolvimento pode proporcionar significativo aumento de qualidade do produto e redução de custos.

Mostramos também a importância da aplicação do DFMA e validação no primeiro

avião do modelo a ser montado (protótipo), onde se verifica os resultados, discrepâncias e necessidades de correções de projeto antes do início da fabricação em série.

Destacamos também no terceiro capítulo, a metodologia DFX, originada do conceito DFMA, que visa melhorar o produto do ponto de vista de confiabilidade, qualidade, manutenção, segurança, meio ambiente, usuário e a redução do prazo de desenvolvimento. Entretanto, devemos salientar a possibilidade de aparecerem conflitos durante a aplicação das metodologias do DFX. Aspectos importantes para um podem, às vezes, implicar na perda de algum aspecto importante de outra. Por exemplo, a aplicação do *Design for Environment* pode acarretar no aumento da complexidade da reciclagem ou na perda de produtividade do processo de fabricação; a aplicação do *Design for Reliability* pode acarretar no aumento da quantidade de componentes do produto, afetando diretamente a montagem do mesmo. Por outro lado, existem muitos aspectos comuns entre as metodologias do DFX, como por exemplo, a redução do número de peças de um produto; que, está presente, em praticamente, todas as metodologias mencionadas neste capítulo.

Existem outras metodologias no âmbito do DFX que não se aplicam diretamente à indústria aeronáutica, e por esta razão não citamos neste trabalho.

A Engenharia Simultânea propõe o desenvolvimento do produto em grupo multidisciplinar onde pessoas que atuam em diferentes funções possam contribuir para a análise. Deste modo, o resultado final do projeto é um produto que atenda além das necessidades da manufatura, requisitos funcionais, técnicos, de manutenção, de marketing, etc. Portanto, visando obter um melhor resultado, este trabalho propõe a utilização de grupos multidisciplinares para a aplicação da ferramenta desenvolvida.

7.2 Conclusões sobre a ferramenta desenvolvida

Tendo em vista os dados apresentados, podemos perceber que a aplicação do DFMA aumenta a chance de sucesso do produto, pois, dentre outros benefícios, permite o desenvolvimento de um projeto em tempo reduzido, possibilita significativo aumento de qualidade e a diminuição de custos. Os dados e informações obtidos através de experiências práticas de profissionais da área de aviação, bem como informações e relatórios de problemas de fabricação e manutenção, nos mostraram ainda os potenciais benefícios da aplicação do DFMA no desenvolvimento do produto. Verificamos nestes dados que uma grande proporção dos problemas encontrados poderia ter sido resolvida durante o desenvolvimento de produtos através da aplicação da metodologia DFMA. Evidenciamos que os problemas ocorridos na linha de montagem final e tarefas de manutenção de aeronaves, poderiam ter sido notados durante o desenvolvimento do projeto, na ocasião de ter sido aplicado o DFMA.

Os dados obtidos e troca de experiências e informações com o pessoal consultado nos permitiram identificar quais os principais requisitos dos usuários para uma ferramenta de DFMA, bem como os benefícios buscados e as dificuldades encontradas em seu uso.

Verificamos a existência do software DFA-BDI no mercado, que auxilia nas necessidades do projeto aeronáutico. Porém, esta ferramenta demanda muito tempo de treinamento e dedicação por parte dos usuários, tendo em vista a dificuldade de se adotar uma nova metodologia de trabalho com um software completamente desconhecido, além do elevado número de horas necessárias para treinamento e possibilitar a qualificação dos engenheiros. Com base nisso, desenvolvemos o Guia de Processo para DFMA, para que pudesse ser adotado como um instrumento facilitador na disseminação da metodologia DFMA no ambiente da indústria aeronáutica.

Percebemos ainda que o Guia de Processo para DFMA pode ser utilizado, com maior

ênfase nas seguintes situações:

- Como instrumento de treinamento na metodologia DFMA que auxilie a capacitação de novos engenheiros que atuam no desenvolvimento integrado do produto;
- Como ferramenta guia dos passos mais importantes a serem seguidos e verificados durante o desenvolvimento do projeto e liberação dos desenhos e processos de fabricação no ambiente aeronáutico;
- Como entrada de dados para armazenamento do histórico das liberações e revisões das peças e conjuntos que compõem a aeronave;
- Como base de dados para consultas pelas áreas de engenharia, em caso de necessidades de análises futuras e eventuais modificações no projeto do projeto para correções e melhorias;
- Como complementos a softwares existentes no mercado, visando maximizar os benefícios auferíveis. Por se tratar de uma ferramenta específica à indústria aeronáutica, o Guia de Processo para DFMA permite identificar e solucionar problemas produtivos pertinentes a este setor, dificilmente identificados através da análise exclusiva com ferramentas genéricas.

É importante salientar que esta ferramenta foi elaborada para atender principalmente as necessidades de montagem final de aviões, fase de produção aeronáutica que demanda maior quantidade de mão-de-obra e ciclo no processo de montagem. Porém, pelo fato de ter sido fundamentada nos conceitos básicos da metodologia DFMA, pode ser facilmente adaptada para as fases de montagem estrutural, pré-equipagem, pintura e preparação para voo.

Verificamos, através de análises, trocas de experiências com profissionais da área e envolvimento no DIP, que os benefícios buscados através da aplicação da metodologia DFMA podem também ser alcançados com a utilização do Guia de Processo para DFMA, e

não apenas com os softwares disponíveis. Já em relação as dificuldades e pontos negativos, notamos que o Guia de Processo para DFMA tem suas vantagens, como, por exemplo, baixo custo de aquisição e a facilidade de utilização, visto que se baseia um aplicativo do *Microsoft Office*.

Finalmente, podemos concluir que uma ferramenta como o Guia de Processo para DFMA aqui apresentado, atende grande parte dos requisitos para otimização e facilidade da manufatura do projeto aeronáutico e pode facilmente ser utilizado como meio de difusão dos conceitos de sua metodologia, além de poder ser um complemento para os casos complexos que demandem a necessidade de um *software* como ferramenta mais sofisticada, específica e desenvolvido para este fim.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

A contribuição deste trabalho poderá servir de base para estudos futuros relacionados com a metodologia DFMA, além de possibilitar a expansão para outras frentes de estudos relacionados com o tema.

Como propostas para trabalhos futuros podemos citar:

- A expansão do estudo da metodologia DFMA dentro da indústria aeroespacial para abranger outras fases, como comercialização, distribuição e pós-venda, além do projeto e fabricação;
- A apresentação desse modelo em forma de programa computacional, que auxilie os engenheiros de desenvolvimento através de um *software*.

Este trabalho procurou contribuir para o enriquecimento do conceito da metodologia DFMA aplicado no desenvolvimento de produtos aeronáuticos, a ser utilizado como uma ferramenta para se obter vantagem competitiva no mercado e agregar valor à empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. P.; PIOCHI, A. E.; BOHM E. K. K. **História da construção aeronáutica no Brasil**. São Paulo, 1982.

BOOTHROYD, G., DEWHURST, P., KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly**. New York: Marcel Dekker Inc, 1994.

BRALLA, J.G. **Design for Excellence**. New York: McGraw-Hill, 1996. 327p.

BRALLA, J.G. **Handbook of product design for manufacturing**. New York: McGraw-Hill, 1986.

CHAO, P.Y.; CHEN,T.T. Analysis of assembly through product configuration. **Computers in Industry**. Amsterdam - NL, 44 (2), p.189-203, Mar. 2003.

CORBETT, J. et. Al. Design for manufacture – Strategies, Principles and Techniques. **Addison – Wesley Publishing Company**. 357p, 1991.

CROW, K. **Design for manufacturability / assembly guidelines**. Disponível em: <www.npd-solutions.com/dfmguidelines.html>. Acesso em: 28 jul. 2006.

CURRAN, R.; RAGHUNATHAN, S.; PRICE, M. Review of aerospace engineering cost modeling: The genetic causal approach. **Progress in Aerospace Sciences**, New York - US, 40 (8), p.487-534, Nov. 2004.

EDWARDS, K.L. Internet applications in product design and manufacturing. **Materials and Design**, Surrey - England GB, 25 (6), p.541-542, Sep. 2004.

EDWARDS, K.L. Towards more strategic product design for manufacture and assembly: priorities for concurrent engineering. **Materials and Design**, Surrey - England GB, 23 (7), p.651-656, Oct. 2002.

HORTA, C.L.; ROZENFELD, H. **DFMA (Design for manufacturing and assembly)**. Disponível em: <www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/dfma_v2.html>. Acesso em: 13 mai. 2005.

HOWARD, L.; LEWIS, H. The development of a database system to optimize manufacturing processes during design. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam - NL, 134 (3), p.374-382, Mar. 2003.

IBUSUKI, U.; KAMINSKI, P.C. Product development process with focus on value engineering and target-costing: A case study in an automotive company. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam - NL, 105 (2), p.459-474, Feb. 2007.

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000. 132p.

KUO, T.-C.; HUANG, S.H.; ZHANG, H.-C. Design for manufacturing and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. **Computers and Industrial Engineering**, New York - US, 41 (3), p.241-260, Dec. 2001.

MEERKAMM, H. Design for X – A Core Area of Design Methodology. **Journal of Engineering Design**. Vol.5, Nº 2, p.145-163, 1994.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design, a systematic approach**. Rev.ed. London: The Design Council, 1988.

PRICE, M.; RAGHUNATHAN, S.; CURRAN, R. An integrated systems engineering approach to aircraft design. **Progress in Aerospace Sciences**, New York - US, 42 (4), p.331-376, Jun. 2006.

PUJARI, D.; PEATTIE, K.; WRIGHT, G. Organizational antecedents of environmental responsiveness in industrial new product development. **Industrial Marketing Management**, New York - US, 33 (5), p.381-391, Jul. 2004.

SOUSA, A.G. **Estudo e Análise dos Métodos de Avaliação da Montabilidade de Produtos Industriais no Processo de Projeto.** Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis): 1998. 238p.

VIEGAS, J.A. **Vencendo o Azul.** Editora Livraria Duas Cidades, 1989.