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

GUSTAVO FRANCO BARBOSA

**Desenvolvimento de um modelo de análise para
implantação de automação na manufatura aeronáutica,
orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto
para Excelência (*DFX - Design for Excellence*) e Produção
Enxuta (*Lean Manufacturing*).**

São Carlos

2012

GUSTAVO FRANCO BARBOSA

**Desenvolvimento de um modelo de análise para
implantação de automação na manufatura aeronáutica,
orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto
para Excelência (*DFX - Design for Excellence*) e Produção
Enxuta (*Lean Manufacturing*).**

Tese de doutorado apresentada à
Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Mecânica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B238d Barbosa, Gustavo Franco
Desenvolvimento de um modelo de análise para
implantação de automação na manufatura aeronáutica,
orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto
para Excelência (DFX - Design for Excellence) e
Produção Enxuta (Lean Manufacturing) / Gustavo Franco
Barbosa; orientador Jonas de Carvalho. São Carlos,
2012.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2012.

1. DFMA. 2. DFX. 3. Lean Manufacturing. 4.
Automação. 5. Indústria Aeronáutica. 6. Projeto. 7.
Manufatura. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUSTAVO FRANCO BARBOSA**.

Título da tese: "Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos das metodologias de projeto, DFX (*design for excellence*) e *lean manufacturing* (produção enxuta)".

Data da defesa: 18/12/2012

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Jonas de Carvalho (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Oswaldo Luis Agostinho**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Iris Bento da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Mariano Eduardo Moreno**
(Universidade Federal de São Carlos/UFCar)

Prof. Dr. **Alex Sander Chaves da Silva**
(Universidade Federal de São João del-Rei/UFSJ)

Resultado:

Aprovado!

Aprovado

Aprovado

Aprovado

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

18/12/2012
Assinatura do Prof. Coordenador
Assinatura do Presidente da Comissão
Assinatura do Candidato

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, com amor, admiração e gratidão pela incansável atenção e incentivo aos estudos, 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, por me conceder o fôlego de vida, a misericórdia e as estratégias para concepção deste trabalho, pois sem a presença divina do Espírito Santo como meu guia, a realização deste trabalho não seria possível.

Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho, pela atenção e apoio prestado durante o processo de definição e orientação, além da colaboração sempre construtiva e incentivadora deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Vila, pelas dicas, instruções e recomendações sempre positivas.

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

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 muitas horas de ausência.

À minha amiga Lilian pelo incentivo, encorajamento e motivação oferecida.

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

Aos colegas de empresa Celise, Fábio, Eduardo e Carlinhos, pelas parcelas de contribuição agregadas a esta tese.

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

“Porque Deus é o que opera em vós tanto o querer como o efetuar, segundo a sua boa vontade.” (Filipenses 2.13 – Bíblia Sagrada)

SUMÁRIO

<i>DEDICATÓRIA</i>	<i>vii</i>
<i>AGRADECIMENTOS</i>	<i>ix</i>
<i>RESUMO</i>	<i>xv</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xvi</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>xvii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>xxi</i>
<i>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</i>	<i>xxii</i>
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO	25
1.1. <i>Introdução</i>	25
1.2. <i>Justificativa</i>	27
1.3. <i>Objetivo</i>	27
1.3.1. <i>Objetivo geral</i>	27
1.3.2. <i>Objetivo específico</i>	28
1.4. <i>Originalidade da proposta</i>	28
1.5. <i>Estrutura e Organização</i>	30
2. A INDÚSTRIA AERONÁUTICA	32
2.1. <i>O surgimento e a evolução</i>	32
2.1.1. <i>A Boeing</i>	35
2.1.2. <i>A Airbus</i>	38
2.1.3. <i>Boeing versus Airbus</i>	41
2.2. <i>O mercado competitivo</i>	46
2.2.1. <i>Os novos produtos (state-of-art)</i>	49
2.2.2. <i>Tendências tecnológicas</i>	60
2.2.3. <i>Materiais compósitos</i>	62
2.2.4. <i>Produção automática</i>	68
3. METODOLOGIAS DE PROJETO	72
3.1. <i>DFMA – Design for Manufacturing and Assembly</i>	72
3.1.1. <i>A Metodologia DFMA</i>	73
3.1.2. <i>Princípios e Regras do DFMA</i>	77
3.1.3. <i>Projeto para Excelência (DFX – Design for Excellence)</i>	83
3.2. <i>Produção Enxuta (Lean Manufacturing)</i>	102
3.2.1. <i>Sistema Toyota de Produção - STP</i>	104
3.2.2. <i>Princípio do não-custo</i>	107
3.2.3. <i>Perdas no processo produtivo</i>	109
3.2.4. <i>Os Pilares do Sistema Toyota de Produção</i>	116
3.2.5. <i>Pensamento Enxuto (Lean Thinking)</i>	129
3.2.6. <i>Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM - Value Stream Mapping)</i>	132

4. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	145
4.1. Introdução	145
4.2. Conceitos e definições	148
4.3. Sistemas de Automação	152
4.3.1. Robótica	156
4.3.2. Porque investir em automação	159
4.3.3. Aplicações da robótica na indústria	163
4.4. Automação na indústria aeronáutica	165
4.4.1. Fabricação de peças primárias	168
4.4.2. Sistemas para inspeção automática de peças	179
4.4.3. Sistemas para montagem automática	183
5. MODELO DE ANÁLISE PARA AUTOMAÇÃO	187
5.1. Introdução	187
5.2. Fatos e evidências relevantes	191
5.3. Aplicação de metodologias no ambiente de Engenharia Simultânea	197
5.4. Motivação para o desenvolvimento de um modelo de análise	201
5.5. Modelo de análise proposto	205
5.5.1. Modelo de Análise para Automação da Manufatura	212
6. ESTUDOS DE CASOS	294
6.1. Estudo 01 – Linha de montagem de segmentos de fuselagem	294
6.2. Estudo 02 – Fabricação de peças primárias	307
7. CONCLUSÕES	315
7.1. Conclusões sobre a ferramenta desenvolvida	315
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	317
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	319

RESUMO

BARBOSA, G.F. (2012). *Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto para Excelência (DFX - Design for Excellence) e Produção Enxuta (Lean Manufacturing)*. São Carlos. 332p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A indústria aeronáutica mundial tem se desenvolvido de modo acelerado em termos tecnológicos e de processos de fabricação aplicados. Com isso, tem se buscado melhores soluções durante o desenvolvimento do projeto e fabricação de aeronaves, visando uma melhor qualidade final dos produtos, redução dos ciclos e custos de fabricação, repetibilidade do processo (padronização), problemas com formação e reposição de mão de obra, além da garantia da competitividade da empresa no mercado global. Uma forma para se inovar tecnologicamente e tornar o negócio mais moderno, atrativo e competitivo, é sempre que possível, automatizar a produção e tornar a montagem mais barata, com mais qualidade, inovadora e da forma mais flexível possível. Sendo assim, este trabalho visa o desenvolvimento de um modelo de análise de processo que utiliza os requisitos e conceitos do *DFX* e Produção Enxuta, voltado para aplicação específica no desenvolvimento de projetos aeronáuticos com foco em automação da produção. O objetivo da ferramenta é auxiliar os engenheiros que atuam no desenvolvimento de projetos de aeronaves, para que os benefícios da automação na produção possam ser alcançados com a utilização do modelo de análise proposto. O trabalho inicia-se com a apresentação do ambiente da indústria aeronáutica mundial, com foco nos processos e novidades tecnológicas aplicadas nos novos produtos. Em seguida são apresentados os princípios da metodologia *DFX*, a revisão teórica dos conceitos de Produção Enxuta e também aplicações de Automação nos diferentes setores da indústria. Na sequência é apresentado o modelo de análise desenvolvido em forma de fluxogramas, elaborado com as regras e plano de ações a ser executado durante o desenvolvimento, visando a automação na produção. Dois estudos de caso são apresentados para demonstrar e validar o modelo desenvolvido. Por fim, os resultados são discutidos e a conclusão estabelecida.

Palavras chave: DFMA, DFX, *Lean Manufacturing*, Automação, Indústria Aeronáutica, Projeto e Manufatura.

ABSTRACT

BARBOSA, G.F. (2012). *Development of an analytical model for implementing automation in aerospace manufacturing, driven by requirements of DFX - Design for Excellence and Lean Manufacturing methodologies*. São Carlos. 332p. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Worldwide Aeronautical Industry has been developed faster and faster in terms of technology and its manufacturing processes applied. Thus, it has been planning to reach better results during the aircraft development and manufacturing phases, aiming to get products with high quality, to decrease cycles times and manufacturing costs, to provide a repeatability of processes (standardization), problems with learn ship and reposition of man power and also to assure the company competitiveness in the global market. One way to innovate technologically and to become the business more modern, attractive and competitive, as always as possible is to automate the production to make it cheaper, with a high quality, innovation and with the most flexible condition. Therefore, this thesis aims to develop a model of process analysis using the requirements and concepts of *DFX* and *Lean Manufacturing* for specific application on aeronautical projects development with a focus on production automation. The main goal of the guideline is to drive the engineers who work on aircraft development phases, about the automation benefits that can be achieved when using the proposed analytical model. This study starts with the presentation of worldwide aeronautical industry environment, focusing on processes and technologies innovation applied on new products. Next, is presented the principles of *DFX* methodology, a theoretical review and concepts of *Lean Manufacturing* and also applications of Automation on new products. Subsequently, it has shown the principles of *DFX* methodology, theoretical review of *Lean Manufacturing* concepts and also applications of Automation in different industry sectors. Following is presented the model of analysis developed in form of flowcharts, drawn up the rules and actions plan to be taken during development, aiming automation in production. Two case studies are presented to demonstrate and validate the model developed. Finally, the results are discussed and the conclusion drawn.

Keywords: DFMA, DFX, *Lean Manufacturing*, Automation, Aeronautical Industry, Design and Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Evolução da indústria aeronáutica	34
FIGURA 2.2 – Réplica do primeiro avião da <i>Boeing</i>	35
FIGURA 2.3 – Primeiro modelo de avião da <i>Airbus – A300</i>	39
FIGURA 2.4 – <i>Airbus</i> e <i>Boeing</i> - passageiros x alcance.....	43
FIGURA 2.5 – Sobreposição – pedidos / entregas.....	45
FIGURA 2.6 – <i>Airbus</i> e <i>Boeing</i> – pedidos e entregas	46
FIGURA 2.7 – Concentração da indústria produtora de aviões	47
FIGURA 2.8 – Materiais compósitos aplicados no <i>B787 Dreamliner</i>	52
FIGURA 2.9 – <i>Cockpit</i> do <i>B787 Dreamliner</i>	53
FIGURA 2.10 – Barril – Secção de fuselagem em compósito	54
FIGURA 2.11 – Montagem final do <i>B787 Dreamliner</i>	55
FIGURA 2.12 – Protótipo do <i>B787 Dreamliner em roll-out</i>	55
FIGURA 2.13 – Materiais utilizados no <i>A350 XWB</i>	56
FIGURA 2.14 – Fuselagem central do <i>A350 XWB</i> em CRFP	57
FIGURA 2.15 – Disposição dos assentos do <i>A350 XWB</i>	58
FIGURA 2.16 – <i>Airbus A350XWB</i>	59
FIGURA 2.17 – Estrutura caixão asa + revestimento bordo de ataque.....	60
FIGURA 2.18 – Estrutura material compósito	63
FIGURA 2.19 – Desempenho dos materiais compósitos	64
FIGURA 2.20 – Utilização de compósitos no <i>Airbus A380</i>	65
FIGURA 2.21 – Desenvolvimento do CFRP em aviões	66
FIGURA 2.22 – Utilização de compósitos no avião militar RAFALE	67
FIGURA 2.23 – Pá do <i>Eurocopter ATR</i> em material compósito	68
FIGURA 2.24 – Parque de máquinas para montagem automática.....	70
FIGURA 3.1 – Estrutura da aplicação do DFMA no processo de projeto	75
FIGURA 3.2 – Redução de tempo quando aplicado no início do projeto.....	76
FIGURA 3.3 – <i>Projeto para Excelência (DFX – Design for Excellence)</i>	84
FIGURA 3.4 – Curva da banheira	88
FIGURA 3.5 – Eras da manufatura	103
FIGURA 3.6 – Estrutura do Sistema Toyota de Produção (TPS)	116
FIGURA 3.7 – Fluxo Interrompido e Fluxo Contínuo	118
FIGURA 3.8 – Exemplo de Jidoka – dispositivo	122
FIGURA 3.9 – Separação entre o Homem e a Máquina	123
FIGURA 3.10 – Exemplo de <i>Poka-Yoke</i>	124
FIGURA 3.11 – Ciclo PDCA	127
FIGURA 3.12 – Agregação de valor	131

FIGURA 3.13 – Matriz da família de produtos.....	135
FIGURA 3.14 – Etapas do Mapeamento do Fluxo de Valor.....	139
FIGURA 3.15 – Ícones para Mapeamento do Fluxo de Valor.....	140
FIGURA 3.16 – Exemplo de mapa do estado atual	142
FIGURA 3.17 – Exemplo de mapa do estado futuro	143
FIGURA 4.1 – Estrutura de um sistema de automação.....	148
FIGURA 4.2 – Exemplo de sistema de manufatura flexível com robôs.....	155
FIGURA 4.3 – Braço mecânico com juntas esféricas.....	158
FIGURA 4.4 – Exemplos de aplicações na indústria.....	165
FIGURA 4.5 – Níveis de montagem da fuselagem.....	166
FIGURA 4.6 – Níveis de montagem da asa	167
FIGURA 4.7 – Máquina Cincinnati Milacron e painel de asa usinado.....	169
FIGURA 4.8 – Máquina de conformação por estiramento para painéis.....	171
FIGURA 4.9 – Processo de usinagem química.....	173
FIGURA 4.10 – Máquina de corte por ultrassom de 02 eixos	174
FIGURA 4.11 – Máquina de corte por jato d'água.....	176
FIGURA 4.12 – Configuração típica de máquina <i>ATL</i>	177
FIGURA 4.13 – Máquina <i>ATL</i>	178
FIGURA 4.14 – <i>AFP</i> para fabricação de barril.....	179
FIGURA 4.15 – Sistema de radiografia robótico digital.....	181
FIGURA 4.16 – Inspeção por ultrassom da fuselagem dianteira do <i>B787</i>	183
FIGURA 4.17 – Sistema <i>C-frame</i> para montagem de painéis	184
FIGURA 4.18 – Sistema <i>MTGRS</i> para montagem de seções de fuselagem.....	186
FIGURA 5.1 – Porcentagem de influência no custo de manufatura	188
FIGURA 5.2 – Aplicação das metodologias no ambiente de DIP	191
FIGURA 5.3 – Interação das metodologias de projeto no ambiente DIP	200
FIGURA 5.4 – Modelo de análise de viabilidade econômica.....	203
FIGURA 5.5 – Etapas do modelo de análise para automação.....	206
FIGURA 5.6 – Estrutura de realimentação (<i>feedback</i>) sistêmico do modelo de análise.....	210
FIGURA 5.7 – Fluxograma do modelo de análise – Fase 01.....	214
FIGURA 5.8 – Porque utilizar o material compósito.....	216
FIGURA 5.9 – Processo típico de fabricação manual.....	217
FIGURA 5.10 – Estrutura entrelaçada típica do CFRP.....	218
FIGURA 5.11 – Conceito para aplicação automática do material compósito.....	220
FIGURA 5.12 – Processo de <i>ATL</i>	221
FIGURA 5.13 – Processo de <i>AFP</i>	222
FIGURA 5.14 – Barril da fuselagem central do <i>A350</i>	224
FIGURA 5.15 – Montagem segmento por junção de painéis.....	225

FIGURA 5.16 – Exemplos de <i>MTR (Maximum Total Range)</i>	228
FIGURA 5.17 – Juntas fixadas com prendedores	230
FIGURA 5.18 – Exemplos de fixadores aeronáuticos	233
FIGURA 5.19 – Exemplos de fixadores cegos	234
FIGURA 5.20 – Processo de instalação de fixador cego	235
FIGURA 5.21 – Célula de furacão automática.....	236
FIGURA 5.22 – Sistema de abastecimento de fixadores	238
FIGURA 5.23 – Resultado da diferença de desempenho entre 02 máquinas.....	240
FIGURA 5.24 – Gabarito de montagem do cone de cauda do <i>A380</i>	241
FIGURA 5.25 – Questões da filosofia de fabricação tradicional.....	242
FIGURA 5.26 – Máquina para fabricação de painéis de asa do <i>Airbus 320</i>	246
FIGURA 5.27 – Método de montagem <i>Jigless</i>	247
FIGURA 5.28 – Versões do <i>Boeing 787</i>	249
FIGURA 5.29 – Ferramental flexível de junção da fuselagem do <i>B787</i>	250
FIGURA 5.30 – Fluxograma do modelo de análise - Fase 02	251
FIGURA 5.31 – Padrão <i>one piece flow</i> (fluxo unitário).....	253
FIGURA 5.32 – Linha de montagem do <i>B777</i>	254
FIGURA 5.33 – Sistema de reboque do <i>B777</i>	255
FIGURA 5.34 – Linha de montagem final do <i>B737</i>	256
FIGURA 5.35 – Conceito de montagem em linha	257
FIGURA 5.36 – Linha de montagem do <i>F-22 Raptor</i> em Marietta-GA, US.....	258
FIGURA 5.37 – Linha de montagem dos bordos de fuga da asa do <i>Boeing 787</i>	260
FIGURA 5.38 – Conceito de linha híbrida para montagem de aviões	262
FIGURA 5.39 – Concepção de layout com provisão para aumento de demanda	264
FIGURA 5.40 – Layout da linha de montagem de asas do <i>A380</i>	266
FIGURA 5.41 – Exemplo de análise de movimentações	268
FIGURA 5.42 – Concepção das unidades visando manutenção	271
FIGURA 5.43 – Pilares do <i>TPM</i>	273
FIGURA 5.44 – Trocador de ferramentas com <i>setup</i> externo.....	275
FIGURA 5.45 – Sistema flexível de manufatura para atender demandas.....	278
FIGURA 5.46 – Plataforma robótica móvel de furação	280
FIGURA 5.47 – Célula de fabricação com máquinas múltiplas	282
FIGURA 5.48 – Alteração nas configurações do <i>layout</i>	284
FIGURA 5.49 – Área humana e área do robô na célula de produção	287
FIGURA 5.50 – Sistema de monitoramento de segurança do operador	288
FIGURA 5.51 – Sistema robótico de pintura da aeronave <i>F-35</i>	292
FIGURA 6.1 – Linha de montagem de fuselagens centrais – <i>Linha A</i>	295
FIGURA 6.2 – Vista em planta da <i>Linha A</i>	297

FIGURA 6.3 – VSM da <i>Linha A</i>	299
FIGURA 6.4 – Linha de montagem de fuselagens centrais – <i>Linha B</i>	300
FIGURA 6.5 – Vista em planta da <i>Linha B</i>	302
FIGURA 6.6 – VSM da <i>Linha B</i>	303
FIGURA 6.7 – Fabricação de peças primárias – <i>Célula A</i>	308
FIGURA 6.8 – Fabricação de peças primárias – <i>Célula B</i>	309
FIGURA 6.9 – Comparação entre as <i>Células A e B</i>	312
FIGURA 6.10 – Tempo de ciclo para processamento de uma peça.....	313
FIGURA 6.11 – Tempo de paradas necessárias para movimentação de peças	313
FIGURA 6.12 – Custos de área para instalação da célula.....	314
FIGURA 6.13 – Investimento para compra de robôs	314

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Funcionários por divisão.....	37
TABELA 2.2 – Funcionários por localização	38
TABELA 2.3 – Os 10 Maiores Grupos Aeroespaciais (¹).....	48
TABELA 5.1 – Exemplo dos problemas de <i>DFA_{TM} – Design for Automation</i>	195
TABELA 6.1 – Investimentos em automação + periféricos	304
TABELA 6.2 – Custos de infraestrutura em piso de hangar	305
TABELA 6.3 – Atendimento aos requisitos Fase 01	305
TABELA 6.4 – Atendimento aos requisitos Fase 02	306
TABELA 6.5 – Aplicação dos requisitos do modelo	310

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agencia Brasileira de Desenvolvimento Industrial
AFP	<i>Automated Fiber Placement</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
ANAC	Agencia Nacional de Aviação Civil
ATL	<i>Automated Tape Layup</i>
ATO	<i>Assembly to Order</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CASA	<i>Construcciones Aeronauticas S.A.</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
DFD	<i>Design for Disassembly</i>
DFE	<i>Design for Environment</i>
DFM	<i>Design for Manufacturing</i>
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
DFA	<i>Design for Assembly</i>
DFA _{TM}	<i>Design for Automation</i>
DFX	<i>Design for Excellence</i>
DIP	Desenvolvimento Integrado de Produto
DOC	<i>Direct Operational Cost</i>
DR	<i>Digital Radiography</i>
DOF	<i>Degrees Of Freedom</i>
EADS	<i>European Aeronautic Defense and Space</i>
EE	<i>End Effector</i>
ER	<i>Extended Range</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FW	<i>Filament Winding</i>
GM	Gabarito de Montagem

HH	Homem Hora
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
IHM	Interface Homem Máquina
LER	Lesão por Esforço Repetitivo
LR	<i>Long Range</i>
MLW	<i>Maximum Landing Weight</i>
MO	Mao de Obra
MRP	<i>Material Requirement Planning</i>
MTGRS	<i>Multi Task Gantry Riveting System</i>
MTO	<i>Make To Order</i>
MTOW	<i>Maximum Take-Off Weight</i>
MTR	<i>Maximum Total Range</i>
MTS	<i>Make To Stock</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NB	<i>Narrow Body</i>
NC	<i>Numeric Controlling</i>
NDI	<i>Non Destructive Inspection</i>
NDT	<i>Non Destructive Test</i>
NSR	<i>New Short Range</i>
NDA	<i>Non Disclosure Agreement</i>
NDI	<i>Non Destructive Inspection</i>
NRC	<i>Non Recurrent Cost</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PE	Pulso de Eco
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PPCP	Planejamento, Programação e Controle da Produção
RCFS	<i>Robotic Component Finishing System</i>
R&T	<i>Research and Technology</i>
STP	Sistema Toyota de Produção
TCP	<i>Tool Center Point</i>
T/AV	Tempo de Agregação de Valor

T/C	Tempo de Ciclo
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
T/R	Tempo de Troca
T/U	Tempo Útil
UPE	Unidade de Planejamento de Espaço
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>
WB	<i>Wide Body</i>
WIP	<i>Work in Process</i>
ZFW	<i>Zero Fuel Weight</i>

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, em função da competitividade e exigências em inovação tecnológica. Isso tem despertado nessas empresas uma constante preocupação em capacitação tecnológica, redução do ciclo de desenvolvimento dos produtos, melhoria da qualidade, redução dos custos, diminuição dos ciclos de produção, aumento da repetibilidade (padronização) dos processos, de modo a serem competitivos e obterem 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 até a implantação dos processos de fabricação.

Na busca constante da excelência empresarial com foco em melhorar produtividade e qualidade, o primeiro passo dado pelas organizações está sendo melhorar o sistema produtivo. Com a evolução tecnológica, atualmente muitas empresas passaram a implantar soluções de automação em seus processos de fabricação. No entanto, sobressaem-se aquelas empresas que desenvolvem produtos diferenciados e com qualidade.

Baseado nisso, muita atenção está sendo direcionada ao desenvolvimento dos métodos e processos, pois a automação na produção não pode ser inserida num produto a não ser que tenha sido concebida e projetada para isso.

O resultado foi a descoberta da importância dos custos de manufatura, gastos com não qualidade, altos ciclos produtivos, falta de padronização e grande quantidade de pessoas (mão de obra) envolvidas nos processos, o que acaba onerando o custo final do produto. Elevou-se então, o mérito dos princípios de uma das metodologias de projeto mais importantes, o *DFMA* (*Design for Manufacturing and Assembly*) e *DFX* (*Design for Excellence*).

O *DFMA* foi 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 *DFX* vai além do *DFMA*, pois é uma metodologia desenvolvida para estabelecer regras, procedimentos e métodos, que irão guiar os projetistas para conceber um produto que atenda os requisitos esperados pelo mercado consumidor, ou seja, o produto deverá possuir todas as exigências necessárias, onde o “X” será o atributo que o produto precisa possuir. Aqui nesse trabalho o atributo será a automação, ou seja, *Design for Automation* (*DFA_{TM}*).

Em associação com as metodologias de projeto descritas acima, busca-se também um sistema de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*), com a otimização do *layout* e de gestão participativa através do mapeamento do fluxo de valor (*VSM*), visando sempre à agregação de valor ao produto por meio da identificação e eliminação de desperdícios.

Neste sentido, este trabalho apresenta-se na forma de expor algumas variáveis e considerações dos pontos mais importantes a serem verificados na fase de desenvolvimento dos processos produtivos do produto, focando nos pontos mais evidentes que possibilitarão a elaboração de um sistema produtivo com características que facilitem a implantação de automação na produção do avião, organizando os conhecimentos de desenvolvimento sob a ótica da metodologia *DFX* no projeto do produto e da Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) na produção, o que irá aumentar a competitividade do produto no mercado e possibilitar ganhos significativos em desenvolvimento e inovação tecnológica.

1.2. Justificativa

Tomando como base os processos e operações fabris dos produtos provenientes das indústrias do setor aeronáutico ao redor do mundo, evidencia-se que a grande proporção dos processos de fabricação é ainda realizada pelo ser humano, o que implica em aumento dos custos agregados no produto acabado, problemas com qualidade e defasagem tecnológica.

A utilização da metodologia de Projeto para Excelência (*Design for Excellence*) na fase de concepção do produto, em conjunto com os princípios da Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) durante a fase de desenvolvimento dos processos produtivos, contribui significativamente para o aumento da competitividade das empresas fabricantes de aviões. A ferramenta desenvolvida aqui nesse trabalho tem como base essas metodologias, e quando aplicada de forma efetiva no desenvolvimento do projeto de um avião, possibilita um aumento da produtividade e capacidade da produção, redução dos custos com problemas de não qualidade, redução dos custos operacionais (direto e indireto), redução dos riscos para a marca da empresa e um conseqüentemente ganho da fatia de mercado (*market-share*).

A aplicação destas metodologias é baseada nos conceitos, princípios e requisitos que visam a automação da manufatura e promovem uma melhoria na troca de informações, fortalecendo a integração e relação de interface entre departamentos.

1.3. Objetivo

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que auxilie os Engenheiros de Produto e Processos na elaboração de um sistema produtivo que possua o maior nível de automação possível e que esteja em concordância com as tendências tecnológicas desse setor.

1.3.2. Objetivo específico

Nesse foco, optou-se por desenvolver uma abordagem mais específica da metodologia *DFA/DFX (Design for Manufacturing and Assembly / Design for Excellence)* na indústria aeronáutica em conjunto com os requisitos do *Lean Manufacturing*, com o propósito de promover uma difusão e fortalecimento da utilização dessas metodologias no ambiente de desenvolvimento de produtos e processos de empresas fabricantes de aeronaves.

1.4. Originalidade da proposta

Os requisitos de projeto para automação da manufatura (estes entendidos como a soma do desenvolvimento do produto e seus processos de fabricação envolvidos), necessários para transformar as matérias-primas em produto final de modo mais automatizado possível, são normalmente tratados como secundários e isoladamente considerados durante as fases de desenvolvimento do produto.

A hipótese central da presente pesquisa é que a orientação para incorporação destes requisitos nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto, de modo integrado com os métodos processos a serem aplicados e em conjunto com os demais fatores, possa fortalecer a vantagem competitiva das empresas fabricantes de aeronaves em termos de produtividade, qualidade, atratividade, melhor atendimento das expectativas dos clientes e da sociedade, e da lucratividade para os fabricantes. No projeto com foco em automação, a consideração tardia destes dois fatores (produto e processos), ou até mesmo a sua não consideração no momento adequado, normalmente dificulta a implantação de sistemas automáticos de modo eficiente com maiores ganhos, além de gerar complexidade e incertezas, mesmo em casos que se opta em utilizar sistemas já conhecidos e de uso consolidado.

Outra razão é a incipiente ou inexistente disponibilidade de procedimentos e modelos de análise específicos para esse tipo de desenvolvimento, que orientem essa incorporação de modo menos complexo e mais integrado, e que auxiliem na minimização dos potenciais riscos nos estágios iniciais do projeto, quando são tomadas as mais estratégicas e influentes decisões sobre o produto e também sobre os processos de fabricação a serem aplicados na produção, dentro do ambiente da indústria aeronáutica.

Diante da importância, da incipiência e da indisponibilidade desse tipo de informação e também do conhecimento sobre a temática, a presente pesquisa tem o objetivo de identificar tendências em materiais e sistemas automáticos passíveis de serem aplicados no ambiente de fabricação aeronáutica, no tocante aos aspectos relativos a produto e manufatura, orientados pelos requisitos de metodologias de projetos conhecidas (*DFX* e *Lean*).

O propósito é a criação de um modelo de análise específico para essa finalidade, e posterior aplicação para agregação de valores de natureza estratégica, técnica e financeira, obtidos através de um projeto voltado para automação. O modelo proposto também sugere recomendações a partir da caracterização da situação atual e da análise das limitações para o desenvolvimento de produto e processos no projeto dos componentes, particularmente para o atendimento de requisitos futuros de: variações de demanda, novos produtos, flexibilidade, segurança, questões ambientais, etc., além de considerar alternativas com diferentes graus de impacto para o produto e para a percepção do cliente.

A possibilidade de generalização dos procedimentos e métodos pesquisados, também pode ser avaliada para aplicação em outros setores da indústria (como helicópteros, foguetes, sistemas de defesa, dentre outros), que tenham a necessidade de ganhos em produtividade, melhoria da qualidade como direcionadores tecnológicos, além da questão competitividade.

Outro fator considerado é a integração entre as diversas áreas (departamentos), pessoas e processos relacionados durante as etapas do desenvolvimento de um projeto, na busca de soluções que facilitem a incorporação de uma solução eficaz e viável para a produção, e que atenda as necessidades da empresa e gere satisfação para os clientes.

1.5. Estrutura e Organização

Esta tese está dividida em 07 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 panorama da indústria aeroespacial no contexto mundial, os novos produtos, as concorrências dentro desse setor e os novos materiais e tendências voltadas para a fabricação de aviões, além de introduzir as definições, conceitos e princípios das metodologias de projeto e processo: o *DFMA*, *DFX (Design for Excellence)* e *Lean Manufacturing* (Produção Enxuta).

O capítulo 4 situa o leitor no ambiente da *Automação Industrial*, apresentando as definições básicas, as vantagens e potenciais ganhos obtidos com essas aplicações, exemplos nos diferentes segmentos da indústria e em seguida, os sistemas de automação voltados especificamente para a indústria aeronáutica, com foco na fabricação das peças primárias, sistemas para inspeções, montagem estrutural e final automática, e também para acabamento de produto, como pintura final por exemplo.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento de um *Modelo de Análise*, que tem como finalidade auxiliar os engenheiros integrantes das equipes de desenvolvimento de produto e processos, orientando-os para a implementação de automação na produção aeronáutica.

O foco está sempre direcionado na redução dos custos produtivos, aumento de produtividade, melhoria da qualidade, fatores ocupacionais de saúde e ergonomia, ganhos com manutenção, simplicidade e facilidade de operação, com o menor custo possível.

Em seguida o capítulo 6 apresenta os *Estudos de Casos* que evidenciam as vantagens e ganhos obtidos com a aplicação da metodologia de integração durante o desenvolvimento dos processos de manufatura.

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

2. A INDÚSTRIA AERONÁUTICA

2.1. O surgimento e a evolução

Depois do célebre voo em 23 de outubro de 1906 no Campo de Bagatelle, em Paris, quando Santos Dumont pela primeira vez no mundo demonstrou em público o voo 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 da indústria manufatureira de bens duráveis, pois apresenta um alto valor agregado. Também é o setor que mais fomenta o desenvolvimento tecnológico e que mais emprega mão de obra especializada, como engenheiros, pesquisadores e técnicos (SEITZ e STEELE, 1985).

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.

Segundo Seitz e Steele (1985), 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
- Consequentemente, um rápido crescimento do transporte aéreo, tanto doméstico quanto internacional.

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. Em julho de 1998 foi concretizada a compra da *Mc Donnell* pela *Boeing*, num negócio de US\$ 15,5 bilhões. O fato causou um forte mal-estar entre os Estados Unidos e Comunidade Europeia. 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 *Mc Donnell 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 voos. Há uma década, o preço da passagem de São Paulo para Nova Iorque, em classe econômica, não saia por menos de US\$ 2200,00, hoje essa passagem pode ser comprada por um preço menor que US\$ 1000,00 (DINIZ, 1998).

A partir daí, muitos avanços foram obtidos através de estudos que resultaram em importantes melhorias aerodinâmicas e de desempenho das aeronaves, propiciando o projeto e a construção de aviões capazes de realização de voos transcontinentais, aeronaves cuja velocidade ultrapassa a barreira do som e até a realização de voos espaciais. A Figura 2.1 mostra a aeronave *Airbus A380*, o maior avião de passageiros já projetado, com capacidade que pode variar entre 555 a 845 passageiros, um caça supersônico no instante em que rompe a barreira do som e o ônibus espacial utilizado pela *NASA* para missões no espaço (RODRIGUES, 2009).

FIGURA 2.1 – Evolução da indústria aeronáutica

(Fonte: Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign)

2.1.1. A Boeing

A *Boeing Company* é uma americana multinacional aeroespacial e de defesa, fundada em 1916 por William E. Boeing em Seattle, Washington. William Boeing fundou sua empresa um mês depois do voo inaugural em 15 de junho, de um dos dois "B & W" hidroaviões construídos com o auxílio de George Conrad Westervelt, engenheiro da Marinha dos EUA. Boeing and Westervelt decidiram construir o "B & W" hidroavião, depois de terem voado em um hidroavião *Curtiss* e percebendo que poderiam construir um avião melhor. Muitos dos primeiros aviões da *Boeing* foram hidroaviões. Assim, os aviões *Boeing* foram sendo construídos e montados em um galpão localizado na beira do lago de Seattle, bairros de *South Lake Union*.

FIGURA 2.2 – Réplica do primeiro avião da *Boeing*

(Fonte: *Boeing*, 2011)

A *Boeing* tem se expandido ao longo dos anos, a fusão com a *McDonnell Douglas* em 1997. A sede da empresa *Boeing* é em Chicago, Illinois desde 2001. A *Boeing* é composta de várias unidades de negócios, que são da *Boeing Commercial Airplanes* (BCA); Boeing Defesa, Espaço e Segurança (BDS), Engenharia, Operações e Tecnologia, a *Boeing Capital*, e *Boeing Shared Services Group*, com plantas em Seattle e Washington.

A *Boeing* está entre as maiores fabricantes mundiais de aeronaves pelas receitas, encomendas e entregas, e a terceira maior empresa de defesa aeroespacial e no mundo com base em receitas relacionadas com o mercado de defesa. A *Boeing* é a maior exportadora de valor nos Estados Unidos. Seu estoque é um componente do *Dow Jones Industrial Average*.

A *Boeing* conseguiu vários lançamentos consecutivos, começando com o lançamento formal do *B787* para entrega *All Nippon Airways* e *Air New Zealand*. O lançamento do primeiro *B787* ocorreu em 08 de julho de 2007, com o primeiro vôo em 15 de dezembro de 2009. A *Boeing* também recebeu o contrato de lançamento da Marinha dos EUA para o *P-8 Multimissão Maritime Aircraft*, um anti-submarino aeronaves de patrulha. Várias encomendas de Wedgetail aviões *AEW & C* também são esperados.

A *Boeing* lançou o *B777* Cargueiro em maio de 2005 com uma encomenda da *Air France*. O cargueiro variante baseia-se no *200LR*. Outros clientes incluem *FedEx*, *Emirates Airline* e *Air Atlanta* islandesa. A *Boeing* conseguiu encomendas acima do projetado para seu avião *B787 Dreamliner*, superando o rival *Airbus A350*.

A *Boeing* anunciou oficialmente em novembro de 2005 que iria produzir uma maior variação do *B747*, o *B747-8* em dois modelos, começando com o modelo cargueiro transportadores de carga, com encomendas firmes para a aeronave. O segundo modelo, apelidado de *Intercontinental*, seria produzido para o transporte aéreo de passageiros que a *Boeing* espera encomendas em um futuro próximo. Ambos os modelos do *B747-8* com uma fuselagem alongada, motores avançados e novas asas, e a incorporação de outras tecnologias desenvolvidas para o *B787*. A *Boeing* introduziu também novas versões de alcance estendido do *B737*. Estes incluem o *B737-700ER* e *B737-900ER*. O *B737-900ER* é o mais recente e vai estender o alcance do *B737-900* para um intervalo semelhante ao sucesso *B737-800* com capacidade para voar mais passageiros, devido à adição de duas saídas de emergência extra.

A quebra de recorde chamado *B777-200LR* foi apresentado no *Paris Air Show 2005*.

O *B777-200LR* embarcou em uma turnê bem recebida para demonstração global no segundo semestre de 2005, mostrando sua capacidade de voar mais longe do que qualquer outro avião comercial. Em 10 de novembro de 2005, o *B777-200LR* estabeleceu um recorde mundial para o voo mais longo sem parar. O avião que partiu de Hong Kong viajou para Londres, teve um percurso mais longo, que incluiu voar sobre os EUA voando 11.664 milhas náuticas, ou seja, 21.601 km durante seu voo de 22 horas e 42 minutos. Foi pilotado pela *Pakistan International Airlines*, sendo a primeira companhia aérea a voar o *B777-200LR*.

Em 11 de agosto de 2006, a *Boeing* anunciou um acordo para formar uma *joint-venture* com a grande empresa russa produtora de titânio, a *VSMPO-Avisma*, para a usinagem de peças forjadas em titânio, para serem usadas no programa *B787*. Em 27 de dezembro de 2007 a *Boeing* e a *VSMPO-Avisma* criaram uma *joint-venture* denominada *Ural Boeing Manufacturing* e assinaram um contrato para entregas de produtos em titânio até 2015, com isso a *Boeing* planeja investir US \$ 27 bilhões na Rússia nos próximos 30 anos (BOEING, 2011).

As tabelas a seguir mostram a quantidade total de funcionários referente à Abril de 2011 (~ 164.000), distribuídos nas diferentes divisões e localizações de suas plantas.

TABELA 2.1 – Funcionários por divisão

Grupo	Funcionários
Boeing Defense, Space & Security	65014
Aviões comerciais	70014
Engenharia, Operações e Tecnologia	19071
Serviços de Finanças & Shared	7799
Outros	2597
Corporativa	-
Empresa totais	164495

(Fonte: *Boeing*)

TABELA 2.2 – Funcionários por localização

Localização	Funcionários
Alabama	2572
Arizona	4588
Califórnia	22650
Kansas	2183
Missouri	14936
Pennsylvania	6162
Texas	6163
Washington	75558
Outras Localidades	29683
Empresa totais	164545

(Fonte: *Boeing*)

A relação faturamento (~ 64 B USD) / nº de funcionários (~ 164.000) é de aproximadamente = 390 K USD / funcionário, considerando os resultados da receita da empresa referente ao ano de 2010.

2.1.2. A Airbus

Airbus Industrie foi formalmente estabelecida como *Groupement d'Interet Economique (Economic Interest Group or GIE)* em 18 de Dezembro de 1970.

Foi formada pela iniciativa entre os governos da França, Alemanha, Espanha e Inglaterra, que originou em 1967. O nome "*Airbus*" foi tirado de um termo não proprietário utilizado pela indústria da aviação na década de 1960, para se referir a um avião comercial de um determinado tamanho e escala, pois este termo era aceitável para os franceses linguisticamente. Em setembro de 1967, um acordo entre a Inglaterra, a França e a Alemanha, que começou a produção conjunta de uma aeronave *widebody*, o *Airbus A300*.

A *Airbus* provém das palavras francesas *Air* e *Bus*, que significam Autocarro Aéreo ou "Ônibus Aéreo" em português do Brasil. A empresa nasceu oficialmente, como *Airbus Industries*, em 1970, um consórcio integrado pela *Aerospatiale* (empresa francesa) e da *Deutsche Aerospace* (empresa alemã), logo seguida pela espanhola *CASA* (*Construcciones Aeronauticas S.A.*).

FIGURA 2.3 – Primeiro modelo de avião da *Airbus* – A300

(Fonte: *Airbus*, 2011)

A *Aerospatiale* e *Deutsche Airbus* cada um tomou uma quota de 36,5% do trabalho de produção, *Hawker Siddeley* 20% e *Fokker-VFW* 7%. Cada empresa deveria entregar as suas seções, totalmente equipado, pronto para voar itens. Em outubro de 1971, a empresa espanhola *CASA* adquiriu uma participação de 4,2% da *Airbus Industrie*, com a *Aerospatiale* e a *Deutsche Airbus* reduzindo suas participações para 47,9%. Em Janeiro de 1979 da *British Aerospace*, que havia absorvido *Hawker Siddeley* em 1977, adquiriu uma participação de 20% da *Airbus Industrie*. Os sócios majoritários reduziram suas ações a 37,9%, enquanto a *CASA* manteve a sua em 4,2% (AIRBUS, 2011).

A linha de produtos da *Airbus* começou com o A300, o primeiro corredor duplo, avião bimotor. Um menor, variante do A300 é conhecido como o A310.

Com base no seu sucesso, a *Airbus* lançou o *A320* com o seu inovador sistema *fly-by-wire* de controle. O *A320* tem sido, e continua a ser um grande sucesso comercial. O *A318* e o *A319* são os derivados mais curtos, com alguns destes últimos em construção para o mercado de aviação de negócios da empresa (*Airbus Corporate Jet*). Uma versão alongada é conhecida como o *A321* e está provando ser competitivo com os modelos mais recentes do *Boeing 737*.

Os produtos de maior alcance (*widebody*), o *A330*, jato duplo e o *A340* de quatro motores, têm asas eficientes, reforçadas com pontas de asas (*winglets*).

O *Airbus A340-500* tem um alcance de 9.000 milhas náuticas, ou seja, 16.700 km, o segundo maior alcance de qualquer jato comercial, após o *Boeing 777-200LR* (intervalo de 17,446 km ou 9.420 milhas náuticas).

A empresa orgulha-se particularmente pela utilização de sistemas para controle de voo por computadores (*fly-by-wire*) e sistemas de cabine de pilotos (*cockpit*) de uso comum em toda sua família de aeronaves, o que torna muito mais fácil de treinar tripulantes.

A *Airbus* está estudando um substituto para a série *A320*, provisoriamente apelidada de *NSR*, para "*New Short Range aircrafts*", aviões de curto alcance. Os estudos indicaram um ganho de eficiência de combustível para o *NSR*. A *Airbus*, no entanto, preferiu realçar o projeto existente do *A320*, usando novas pontas de asas e trabalhando em melhorias aerodinâmicas. Esse "*A320 realçado*" deve ter uma melhoria da eficiência de combustível de cerca de 4-5%, ao passar o lançamento de um *A320* para substituição até 2017-2018.

Em 24 de setembro de 2009 o COO *Fabrice Bregier* declarou ao jornal *Le Figaro* que a empresa precisaria de € 800.000.000 a € 1 bilhão ao longo de seis anos, para desenvolver a nova geração de aviões da companhia e preservar a liderança tecnológica dos novos concorrentes como o *C919*, previsto para operar até 2015-2020.

Em julho de 2007, a *Airbus* entregou seu último *A300* para a *FedEx*, marcando o fim da linha de produção do *A300/A310*.

Para o *A320* a *Airbus* tem a intenção de deslocar a atividade de montagem final de Toulouse para Hamburgo, e produção de *A350/A380* na direção oposta, como parte do seu plano de organização iniciado com o ex-CEO, Christian Streiff.

A aeronave *Airbus A350* é uma nova família de aeronaves *wide-body*, atualmente em desenvolvimento, destinada a competir com o *Boeing 777* e o *Boeing 787*. O *A350* será o primeiro avião da *Airbus* com fuselagem e a estrutura das asas constituídas principalmente por plástico reforçado de fibra de carbono. A sua entrada em serviço está prevista para 2013.

A *Airbus* forneceu peças de reposição e serviço das aeronaves Concorde até sua aposentadoria em 2003.

Atualmente a *Airbus* emprega uma quantidade total aproximada de 60.000 funcionários, distribuídos em suas diversas plantas ao redor do mundo.

2.1.3. *Boeing versus Airbus*

É o resultado das 02 empresas a dominação dos grandes jatos no mercado desde a década de 1990, que é em si, uma consequência de numerosas falências de empresas e fusões globais no setor aeroespacial da indústria ao longo dos anos. A *Airbus* começou sua vida como um consórcio, enquanto a *Boeing* assumiu seu antigo arquirrival, a *McDonnell Douglas*, em 1997. Outros fabricantes como a *Lockheed* e *Convair* nos EUA e *Dornier* e *Fokker* na Europa, saíram do mercado de aviação civil, após os valores das vendas decepcionantes e problemas econômicos.

O colapso do Bloco de Leste e a sua organização comercial (Comecon) em 1990 colocaram a ex-indústria aeronáutica Soviética em posição de desvantagem, embora *Antonov*, *Ilyushin*, *Sukhoi*, *Tupolev* e *Yakovlev* desenvolverem um novo avião e ganhar uma pequena quota de mercado.

Tudo isso deixou a *Boeing* e a *Airbus* em um quase duopólio no mercado mundial de grandes jatos comerciais, incluindo aeronaves de fuselagem estreita (*narrow-body*), de aeronaves de fuselagem larga (*wide-body*) e jatos jumbo. No entanto, a *Embraer* ganhou quota de mercado com as suas aeronaves *narrow-body* nos jatos *Embraer E-Jets*. Há também semelhante concorrência na fabricação de jatos regional entre *Bombardier* e *Embraer*.

Nos últimos 10 anos (2002-2011), a *Airbus* recebeu 7.181 pedidos e entregou 4.218 aeronaves, enquanto a *Boeing* ganhou 6.360 encomendas e entregou 3.871. A competição é intensa, e cada empresa regularmente acusa a outra de recebimento injusto de auxílios estatais a partir de seus respectivos governos (AIRBUS, 2011).

Embora os fabricantes tenham uma ampla gama de produtos em diversos segmentos de corredor único, as ofertas dos fabricantes nem sempre competem cabeça por cabeça.

Conforme listado abaixo, eles respondem com modelos um pouco diferentes:

- O *Airbus A380*, por exemplo, é substancialmente maior do que o *Boeing 747*;
- O *A350 XWB* da *Airbus* compete com a ponta do *Boeing 787 Dreamliner* e o limite inferior do *Boeing 777*;
- O *Airbus A320* é maior que o *B737-700*, mas menor que o *B737-800*;
- O *Airbus A321* é maior que o *B737-900*, mas menor que o anterior *Boeing 757-200*;
- O *Airbus A330-200* concorre com o menor *Boeing 767-400ER*.

As companhias aéreas podem usar isso como uma vantagem competitiva, pois recebem uma gama de produtos mais completa de 100 a 500 lugares, que ambas as empresas ofereceram aeronaves idênticas.

A Figura 2.4 mostra a relação entre a capacidade de assentos dos aviões e o alcance máximo de voo para as diferentes famílias de aeronaves dos fabricantes *Boeing* e *Airbus*.

FIGURA 2.4 – Airbus e Boeing - passageiros x alcance

(Fonte: Lcmortensen)

a) Concorrência com a terceirização

Como muitas das companhias aéreas do mundo são totalmente ou parcialmente propriedades do governo, as decisões de aquisição de aeronaves são muitas vezes tomadas em função de critérios políticos, bem como comerciais. *Boeing* e *Airbus* tentam explorar isso pela subcontratação da produção de componentes e conjuntos de aeronaves através de fabricantes localizados em países estrategicamente importantes, a fim de ganhar vantagem competitiva.

Por exemplo, a *Boeing* ofereceu relações duradouras com os fornecedores japoneses, incluindo a *Mitsubishi Heavy Industries* e a *Kawasaki Heavy Industries*, através da qual essas empresas tiveram aumento da participação em programas de jatos *Boeing* sucessivamente, um processo que tem ajudado a *Boeing* atingir quase total domínio do mercado japonês de jatos comerciais.

A terceirização foi estendida para o *Boeing 787*, na medida em que a própria participação da *Boeing* foi reduzida, com foco maior na gestão dos projetos, projeto dos produtos, montagem e testes de funcionamento. A *Boeing* já declarou ter "terceirizados demais" e que os projetos dos futuros aviões vão depender muito mais da própria engenharia da *Boeing* e do pessoal de produção (*The Seattle Times* 16/06/2010).

Parcialmente por causa de suas origens como um consórcio de empresas europeias, a *Airbus* teve menos oportunidades de terceirizar partes significativas da sua produção além das suas próprias fábricas europeias. No entanto, em 2009 a *Airbus* abriu uma fábrica em Tianjin na China para a produção de seus aviões da série *A320* (*Flight International* 28/10/2008).

É importante frisar a relevância da assinatura de um acordo de confidencialidade entre as partes envolvidas, o chamado *NDA* (*Non Disclosure Agreement*). Esse documento tem como finalidade garantir o sigilo das informações de propriedade intelectual das empresas, de modo a assegurar segurança dos dados, evitando a divulgação e utilização dos mesmos de forma incorreta e ilegal.

b) Concorrência com o uso da tecnologia

Uma das formas que a *Airbus* procurou para competir com a bem estabelecida *Boeing* na década de 1970, foi através da introdução de tecnologia avançada. Por exemplo, o *A300* fez o uso mais extensivo de materiais compósitos ainda vistos em um avião da época e pela automação das funções para os engenheiros de vôo, foi o primeiro jato comercial de grande porte a ter uma tripulação de dois homens. Na década de 1980 a *Airbus* foi a primeira a introduzir o sistema digital *fly-by-wire* nos controles de um avião, o *A320*. Agora que a *Airbus* se estabeleceu como um concorrente viável para a *Boeing*, ambas as empresas utilizam tecnologia avançada para buscar vantagens de performance em seus produtos. Por exemplo, o *Boeing 787 Dreamliner* é o 1º avião de grande porte a utilizar a maior parcela em compósitos.

c) Efeito da moeda sobre a concorrência

Os custos de produção da *Boeing* são na maior parte em dólares americanos (\$), enquanto os custos da *Airbus* são principalmente em euro (€). Quando o dólar se valoriza frente ao euro, o custo de produção dos aviões da *Boeing* sobe em relação ao custo de produzir uma aeronave *Airbus*, e inversamente, quando o dólar cai em relação ao euro é uma vantagem para a *Boeing*. Há também possíveis riscos cambiais e benefícios envolvidos na forma como os aviões são vendidos. A *Boeing* tipicamente atribui o preço de seus aviões somente em dólares, enquanto a *Airbus*, apesar da maioria dos preços de vendas das aeronaves serem em dólares, foi conhecida por ser mais flexível e ter preço de algumas vendas de aeronaves na Ásia e no Oriente Médio, em várias moedas.

Dependendo das flutuações cambiais entre a aceitação da encomenda e a entrega da aeronave, isso pode resultar em um lucro extra ou despesa extra - assumindo *Airbus* não ter comprado um seguro contra essas flutuações. (*Wall Street Journal*, 30/10/2009).

FIGURA 2.5 – Sobreposição – pedidos / entregas

(Fonte: Thefroyo)

		Pedidos																							
		2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990	1989
Airbus	67	574	271	777	1341	790	1055	370	284	300	375	520	476	556	460	326	106	125	38	136	101	404	421
Boeing	106	530	142	662	1413	1044	1002	272	239	251	314	588	355	606	543	708	441	125	236	266	273	533	716	

		Entregas																							
		2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990	1989
Airbus	119	510	498	483	453	434	378	320	305	303	325	311	294	229	182	126	124	123	138	157	163	95	105
Boeing	104	462	481	375	441	398	290	285	281	381	527	491	620	563	375	271	256	312	409	572	606	527	402	

FIGURA 2.6 – Airbus e Boeing – pedidos e entregas

(Fontes: *Boeing e Airbus*)

2.2. O mercado competitivo

O padrão de concorrência da indústria aeronáutica está centrado nas inovações tecnológicas e nas condições de financiamento destas inovações, e tenderá a ficar cada vez mais acirrada no contexto do mercado globalizado.

Por sua vez, a crescente introdução de avanços tecnológicos e o consequente aumento da necessidade de financiamento têm elevado às necessidades de escala mínima para operação nesta indústria. Desta maneira, a construção de vantagens competitivas no setor aeronáutico passa, necessariamente, pelo tamanho da empresa (FERREIRA, 2008).

Em decorrência disto, as últimas duas décadas foram marcadas por um amplo processo de reestruturação patrimonial: fusões, aquisições e associações, que levou a uma crescente concentração nesta indústria produtora de aeronaves, conforme pode ser observado abaixo na FIGURA 2.7 da *Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial*:

FIGURA 2.7 – Concentração da indústria produtora de aviões

(Fonte: ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial)

O mercado internacional de aeronaves apresenta uma dimensão global, caracterizando-se como um oligopólio concentrado em nível mundial. Atualmente, nenhum país possui um mercado com dinamismo e magnitude suficiente para bancar os custos de desenvolvimento de novas aeronaves, por isso, a necessidade de atuação global das grandes empresas. Somente um pequeno número de atores globais, *global players*, pode arcar com os elevados custos de desenvolvimento das novas aeronaves (FERREIRA, 2008).

Este processo de concentração que vem ocorrendo nas últimas décadas visa não apenas a ampliação dos ganhos de escala, mas também a criação de importantes economias de escopo, que é obtida quando existe redução nos custos (produção, desenvolvimento, administrativo e financeiro), pelo fato de uma empresa fabricar diferentes tipos de produtos ou atuar em diferentes segmentos de mercado.

Desta maneira, observa-se a constituição de grandes conglomerados aeroespaciais, que passam a atuar nos setores: aeronáutico, defesa e espaço.

Estes conglomerados tornaram-se o tipo de estrutura organizacional predominante na indústria aeronáutica mundial, como pode ser observado na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Os 10 Maiores Grupos Aeroespaciais ⁽¹⁾

Empresas	Nacionalidade	US\$ bilhões
Boeing	EUA	61,5
EADS	França/Alemanha/Espanha	52,0
Lockheed Martin	EUA	39,6
BAE Systems	Reino Unido	27,2
Finmeccanica	Itália	20,6
Bombardier	Canadá	8,1
Dassault	França	4,3
Gulfstream	EUA	4,3
Mitsubishi	Japão	4,1
Embraer	Brasil	3,9

(1) Por falta de informação contábil os grupos russos e chineses não foram classificados.

(Fonte: Elaboração NEIT/IE/UNICAMP com base nos Relatórios Anuais das Empresas)

A crescente complexidade tecnológica, que se reflete nos elevados custos de desenvolvimento de novos produtos, tem levado os fabricantes de aeronaves a se concentrarem nas atividades de projeto e montagem aeronáutica, transferindo para as empresas fornecedoras a produção de componentes estruturais como partes da fuselagem e das asas. Observa-se desta maneira, uma maior especialização dos *global players*, estes têm se tornado grandes sistematizadores, que buscam estabelecer contratos de parcerias com seus principais fornecedores, de forma a repartir os custos de desenvolvimento e aproveitar as competências específicas. Em suma, para que possam avançar no desenvolvimento e produção de novas aeronaves, as empresas líderes necessitam coordenar uma cadeia de empresas fornecedoras, cada vez mais robusta (FERREIRA, 2008).

Por fim, a presença do Estado na indústria aeronáutica é observada, tanto na coordenação do processo de concentração, como nos programas de incentivo e apoio ao desenvolvimento tecnológico.

Com relação a este último aspecto os principais instrumentos do Estado são:

- a) Apoio às atividades de P&D (pesquisas e desenvolvimento) inerentes ao processo de desenvolvimento de novas aeronaves, seus respectivos componentes e sistemas;
- b) Fornecimento de crédito aos fabricantes e financiamento às vendas, tanto nacionais, quanto externas;
- c) Incentivos e subsídios fiscais e tributários;
- d) Proteção seletiva de determinados segmentos de mercados;
- e) Utilização do poder de compra, particularmente no que se refere às encomendas de aeronaves militares.

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.

2.2.1. Os novos produtos (state-of-art)

O mercado mundial de transporte aéreo tem demandado a cada dia, uma necessidade maior de aeronaves que atendem de forma ampla e eficaz os requisitos de autonomia / economia (menor consumo de combustível), peso, custos e facilidade com manutenção e também de fatores relacionados à sustentabilidade, visando uma menor agressividade ao meio-ambiente (*Green Design*) e a utilização dos recursos sem prejudicar as gerações futuras.

Sendo assim, as empresas fabricantes de aviões através de investimentos em pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos, tem buscado melhores soluções para os seus produtos, visando uma melhor qualidade final e que atenda os requisitos do mercado citados acima, além de assegurar a competitividade da empresa no mercado global.

Em seguida, serão explanados 02 grandes exemplos de novos produtos, onde se busca a excelência no estado da arte (*state-of-art*), em atendimento aos requisitos descritos acima.

a) *Boeing 787 Dreamliner*

É o caçula da família *Boeing*, sendo um projeto de extrema importância frente a sua grande concorrente europeia *Airbus*.

A estratégia de marketing fundamental para o *B787* é o custo-eficiência, sendo o objetivo principal a redução dos custos operacionais de seus clientes. Com base nisso e partir das iniciativas de design dessa aeronave, pode-se ver como a *Boeing* enxerga o futuro para o mercado de transporte aéreo mundial.

O *B787* será uma opção popular para companhias de baixo custo, pois tem a flexibilidade de configuração e eficiência de custos. A utilização de aeroportos secundários sugere que aeronaves de grande porte não são adequadas para esses aeroportos, que muitas vezes não têm a facilidade de receber aeronaves de grande porte, ao contrário das aeronaves de médio porte, onde seria perfeito para as distâncias mais longas e para operação em aeroportos menores, além dos custos mais baixos para viagem internacional, o que está se tornando cada vez mais popular hoje em dia.

O *787-8 Dreamliner* irá levar 210-250 passageiros em rotas de 7.650 a 8.200 milhas náuticas (14.200 a 15.200 km), enquanto o *787-9 Dreamliner* irá levar 250-290 passageiros em rotas de 8.000 a 8.500 milhas náuticas (14.800 a 15.750 km). Além de trazer as distâncias dos grandes jatos para aviões de médio porte, o *B787* vai proporcionar às companhias aéreas uma eficiência energética sem precedentes, resultando em desempenho ambiental excepcional. O avião vai usar 20% a menos de combustível quando comparado com aviões de hoje com o mesmo tamanho (*Boeing press release 14/12/2010*).

Ele também vai viajar em velocidades semelhantes aos aviões *wide-body* mais rápidos de hoje, com uma velocidade aproximada de *Mach 0.85*. As companhias aéreas terão mais capacidade de carga.

Os passageiros também verão melhorias com o novo avião, a partir de um ambiente interior com mais umidade para maior conforto e comodidade.

A chave para este desempenho excepcional é um conjunto de tecnologias novas que estão sendo desenvolvidos pela *Boeing* e pela sua equipe de desenvolvimento internacional da tecnologia.

Aproximadamente 50% da estrutura primária dessa aeronave, inclusive a fuselagem e asa dos *B787* são feitas de materiais compósitos (*Boeing press release 14/12/2010*).

Os materiais compósitos quando aplicados na indústria aeronáutica, agregam as seguintes vantagens quando comparadas ao alumínio:

- ✓ Menor peso em relação à madeira e às ligas de alumínio devido à maior rigidez específica e à maior resistência específica;
- ✓ As propriedades mecânicas do material podem ser aumentadas na direção do maior esforço da peça;
- ✓ Redução do número de peças em um componente do avião em relação ao caso deste componente ser fabricado com material metálico;
- ✓ Ausência de corrosão em caso de ambientes com grande umidade ou com maresia;
- ✓ Excelente resistência à fadiga e estabilidade dimensional.

A Figura 2.8 mostra a distribuição e aplicação de materiais compósitos ao longo do *Boeing 787 Dreamliner*:

FIGURA 2.8 – Materiais compósitos aplicados no *B787 Dreamliner*

(Fonte: *Boeing systems and performance*)

Uma arquitetura aberta estará no centro dos sistemas dos *B787*, que será mais simplificada do que os aviões de hoje e oferecem maior funcionalidade.

Por exemplo, a equipe está trabalhando na incorporação de sistemas de monitoramento de saúde, que irá permitir que o avião possa se auto-monitorar e relatar as necessidades de manutenção aos sistemas de computador com base em terra.

A Figura 2.9 mostra o *cockpit* desenvolvido para o avião *Boeing 787 Dreamliner*, onde os sistemas aviônicos e eletro-eletrônicos são integrados na aeronave.

FIGURA 2.9 – Cockpit do B787 Dreamliner

(Fonte: www.boeing.com)

A *Boeing* selecionou a *General Electric* e a *Rolls-Royce* para o desenvolvimento de motores para o novo avião. Espera-se que os avanços na tecnologia dos motores irão contribuir para um aumento de 8% na eficiência do novo avião, o que representa um salto de quase duas gerações em tecnologia para a média do mercado (CORLISS, 2009).

Outra melhoria na eficiência virá na forma como o avião é projetado e construído. Novas tecnologias e processos estão em desenvolvimento para ajudar a *Boeing* e os seus parceiros fornecedores atingirem níveis inéditos de desempenho em todas as fases do programa.

Por exemplo, pela fabricação de uma seção da fuselagem em uma única peça, estão sendo eliminados 1.500 folhas de alumínio e 40.000-50.000 parafusos.

A Figura 2.10 ilustra um barril de fuselagem (segmento estrutural em peça única) da aeronave *Boeing 787 Dreamliner*.

FIGURA 2.10 – Barril – Secção de fuselagem em compósito

(Fonte: <http://www.boeing.com>)

Desde o final de 2003, 56 clientes de seis continentes do mundo têm encomendas para 835 unidades do *B787 Dreamliner*, no valor de \$ 162 bilhões, tornando este o mais bem sucedido lançamento de um novo avião comercial da história da *Boeing*.

O programa foi assinado com mais de 40 dos melhores parceiros e fornecedores de primeira linha do mundo, que em conjunto finalizam a configuração do avião em setembro de 2005. A *Boeing* tem trabalhado com seus fornecedores desde a fase inicial do projeto detalhado do programa e todos estão conectados virtualmente em 135 sites ao redor do mundo.

O programa *B787* inaugurou sua planta de montagem final em Everett maio 2007.

O primeiro voo do *B787 Dreamliner* ocorreu em dezembro 2009.

As Figuras 2.11 e 2.12 mostram respectivamente o estágio de montagem final das aeronaves *B787* na planta da *Boeing* em Everett – WA, nos Estados Unidos e apresentação do primeiro protótipo (*roll-out*).

FIGURA 2.11 – Montagem final do *B787 Dreamliner*

(Fonte: <http://www.boeing.com>)

FIGURA 2.12 – Protótipo do *B787 Dreamliner* em roll-out

(Fonte: <http://www.boeing.com>)

b) Airbus A350

O avião *A350 XWB* está revolucionando o futuro das viagens aéreas, oferecendo uma família completa de aviões de nova geração que é mais adequada às exigências do mercado para o tamanho, escala, geração de receita, o conforto dos passageiros e do ambiente.

A *Airbus* reúne as últimas novidades em termos de aerodinâmica, design e tecnologias avançadas aplicadas no *A350 XWB* para fornecer um 25% de mudança radical na eficiência do combustível em relação ao seu concorrente de longo alcance atual (*Airbus press release*).

Mais de 70% do peso das estruturas eficientes do *A350 XWB* é feita de materiais avançados, combinando 53% das estruturas de materiais compósitos com titânio e ligas de alumínio avançadas. A inovação da fuselagem da aeronave totalmente em *Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)* resulta um menor consumo de combustível, bem como na facilidade de manutenção (EADS, 2009).

A Figura 2.13 representa a proporção dos materiais utilizados no *A350 XWB*.

FIGURA 2.13 – Materiais utilizados no *A350 XWB*

(Fonte: <http://www.aviationnews.eu/>)

FIGURA 2.14 – Fuselagem central do *A350 XWB* em CRFP

(Fonte: <http://www.airbus.com>)

A Família *A350* fornece uma verdadeira capacidade de longo alcance, com capacidade de 250 até 400 passageiros, ou mais. Isso permite que as companhias aéreas melhorem a combinação de suas frotas de *A350 XWB* para atender rotas e demandas de capacidades, garantindo um potencial ótimo de receita e uma eficiência operacional excelente. O conceito dessa família de aeronaves, comprovada pela *Airbus* com seus outros jatos, também assegura uma ótima eficiência através da comunalidade do *A350 XWB* em motores, sistemas e peças de reposição, permitindo também que os pilotos possam voar todas as três versões, com um único tipo de qualificação.

A família do *Airbus A350 XWB* é composta por três versões (*A350-800*, *A350-900* e *A350-1000*), cada um com um alcance global para as distâncias de voo de até 8.500 milhas náuticas. Em uma configuração típica de três classes, o *A350-800* vai acomodar 270 passageiros, enquanto o *A350-900* e o *A350-1000*, 314 e 350 passageiros respectivamente. Todos os membros da família *A350 XWB* podem ser configurados para *layouts* de maior densidade de até 440 assentos (*Flight global* 28/04/2010).

A larga seção transversal de fuselagem do *A350 XWB* foi projetada para possibilitar uma ótima experiência de viagem para todas as classes de serviço. Os passageiros irão desfrutar de mais espaço, janelas panorâmicas mais amplas e maior espaço de armazenamento na região superior. Com uma seção transversal de 220 centímetros de braço a braço, a cabine do avião oferece o mais largo assento em sua categoria, sendo 05 centímetros maior que seu concorrente mais próximo. Além de fornecer soluções de espaço inigualável para a primeira classe (*first class*) e de negócios (*business class*), o *A350 XWB* permite uma economia de alto conforto, com um arranjo de 09 assentos lado a lado e uma generosa largura do assento de 18 polegadas (AIRBUS, 2011).

FIGURA 2.15 – Disposição dos assentos do *A350 XWB*

(Fonte: <http://www.fly-sea.com>)

Áreas para descanso da tripulação que são utilizados em operações de longo alcance estão localizadas na área da fuselagem, oferecendo um conforto inigualável sem reduzir a capacidade global de receitas em assentos de passageiros.

Tripulantes de cabine irão utilizar uma instalação de descanso na fuselagem traseira do *A350 XWB*, que acomoda de seis a oito beliches. Tem uma área de pé de altura completa, fornecendo uma zona confortável, que permite equipes para preparar e vestir-se mais facilmente.

FIGURA 2.16 – *Airbus A350XWB*

(Fonte: <http://www.airbus.com>)

A *Airbus* tem construído em sua habilidade o melhor da Europa e desenvolvido produtos inovadores em antecipação ao que o mercado precisa. Os engenheiros, pilotos, pessoal de vendas e marketing, gerentes, técnicos e os trabalhadores das linhas de montagem da *Airbus* têm sido guiados por um espírito de inovação e paixão pela aviação.

Para proteger esta posição de liderança em tecnologia e assegurar a competitividade global, a *Airbus* baseia-se em sua habilidade para inovar e construir o avião mais eficiente do mundo. Hoje, a *Airbus* define o caminho por um enorme programa de *R&T* (*research and technology*) ao longo dos próximos 20 anos, que vai garantir que a inovação continue sendo o centro do desenvolvimento da *Airbus*.

2.2.2. Tendências tecnológicas

A indústria aeronáutica tem passado por grandes transformações ao longo dos anos, no que diz respeito aos materiais de construção mecânica utilizados na fabricação dos aviões.

A construção aeronáutica tradicional consiste na fabricação da estrutura da aeronave em madeira, alumínio ou titânio, e posteriormente o seu recobrimento com placas ou chapas finas em alumínio ou materiais compósitos.

O maior desenvolvimento dos materiais de revestimento de estruturas de aeronaves ocorreu durante a Segunda Grande Guerra Mundial. Nesta época já se usavam em grande escala as ligas leves de alumínio em forma de chapas finas (OLIVEIRA, 2007).

FIGURA 2.17 – Estrutura caixão asa + revestimento bordo de ataque

(Fonte: <http://www.spiritaero.com>)

Um material conhecido como *Gordon Aerolite*, fabricado com fibras não retorcidas de linho e resina fenólica foi desenvolvido no final da década de 1930 pelo Dr. Norman de Bruyne no Centro de Pesquisa de Cambridge na Inglaterra, para aplicação aeronáutica.

Este material foi utilizado no revestimento da fuselagem do caça de combate *Spitfire*, sendo o seu peso igual ao da fuselagem revestida com alumínio e com a mesma resistência.

Ainda durante a Segunda Grande Guerra, uma empresa inglesa desenvolveu o projeto e construiu um caça bombardeiro chamado DH98 Mosquito, no qual toda a estrutura e os revestimentos eram em madeira. Nesta época, o consumo de alumínio na indústria bélica estava acima da capacidade de produção das indústrias metalúrgicas, o que tornou imperativo o desenvolvimento de materiais alternativos para a construção de aviões.

No Brasil, também nesta época, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, iniciou as pesquisas e trabalhos para a produção de lâminas contraplacadas de madeira para aplicação aeronáutica. A produção deste material iniciou-se no último trimestre de 1940 e foi interrompida no ano de 1992.

Segundo a revista da Associação de Aviação Experimental (EAA-USA) especializada em construção de aviões esportivos leves, de 475 modelos de projetos disponíveis 198 modelos são de aviões construídos de madeira, ou seja, cerca de 42%, isto demonstra a importância deste material ainda hoje para a aviação.

Entretanto, devido às dificuldades de obtenção de madeiras de qualidade adequada ao uso aeronáutico, sobretudo devido ao processo de exploração não sustentável que se adotou até os dias de hoje, têm sido necessário o desenvolvimento de novas técnicas para construção e manutenção de aeronaves com projeto original em madeira. O principal material utilizado para substituir a madeira na construção de aeronaves leves é o material compósito, com fibras sintéticas.

Middleton (1990) informa em seu livro sobre materiais compostos utilizados em aviões que a longarina da deriva do *Airbus A310-300* fabricada em material composto em forma de uma viga caixão pesa 56,7 kg, apesar dos seus 8,3 metros. A mesma longarina, quando fabricada em alumínio pesa 20% a mais.

Além disto, a facilidade de fabricação da longarina de material compósito é bem maior, tendo em vista que são apenas 95 peças, ao invés de 2076 peças, quando esta mesma peça é fabricada em alumínio.

Hogan (2011) salienta que o volume de materiais compósitos e ligas de titânio usado na indústria aeroespacial tem aumentado diariamente, mas o alumínio não vai ser afastado das aplicações.

2.2.3. Materiais compósitos

Segundo a *EADS (European Aeronautic Defense and Space)* os materiais compósitos são ao lado do alumínio, os materiais mais importantes para a construção aeronáutica na atualidade. Nos últimos 40 anos, os materiais compósitos passaram a representar 15% de redução de peso estrutural nos aviões comerciais, e 50% de redução de peso nos helicópteros e aviões militares.

Material compósito é um material constituído de duas fases combinadas numa escala macroscópica cujo desempenho e propriedades para uma dada aplicação são superiores aos materiais constituintes agindo independentemente.

As fases constituintes de um compósito são:

- ✓ Reforço: geralmente descontínua, mais rígida e mais resistente;
- ✓ Matriz: contínua e geralmente menos rígida e resistente;

Além da matriz e do reforço, a interface entre essas fases também afeta as propriedades mecânicas do compósito (Figura 2.18). Uma boa interface (resultado da compatibilidade química entre as fases) é essencial para a resistência e rigidez do compósito.

FIGURA 2.18 – Estrutura material compósito

(Fonte: ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica)

As fibras (reforço) são fornecidas em várias formas: *roving* (fio seco), lâmina unidirecional pré-impregnada (tape) ou tecido (pré-impregnado ou seco).

As matrizes podem ser polimérica, cerâmica, metálica ou carbono.

No período de 2002 a 2003, várias instituições europeias (*EADS*, *SICOMP*, Universidades, etc.) organizaram o evento *COMPOSIT Thematic Network*.

Este evento foi constituído de 10 workshops, que tiveram como objetivo detectar os problemas de utilização dos materiais compostos em vários ramos de transportes, dentre eles o ramo aeroespacial. As conclusões destes workshops foram dentre outras:

- ✓ Diminuição de custos. Desenvolver processos de fabricação automáticos de materiais compósitos, isto é, desenvolvimento e aplicação de tecnologias de conformação de tecidos, em conjunto com sistemas de resina que permitam a impregnação do tecido, e a sua cura, sem a utilização de autoclave (aparelho para cura sob calor e pressão);
- ✓ Desenvolvimento de metodologias de projeto, e ferramentas analíticas que permitam a simulação do material composto e do processo de fabricação. (Especialmente comportamento não linear, e comportamento de longo prazo);

- ✓ Desenvolvimento de sistemas de materiais, (fibras, sistemas de resinas, *binders*) com relação a custo, métodos de fabricação e desempenho. Como por exemplo, desenvolver a nanotecnologia aplicada a materiais compostos.

Segundo a EADS, devido à alta resistência específica, alta rigidez específica, alta resistência à fadiga, alta resistência à corrosão e a alta capacidade de absorver energia, os materiais compósitos se tornaram materiais com emprego crescente no ramo aeroespacial.

A Figura 2.19 apresenta a comparação de desempenho mecânico dos materiais compósitos em relação ao aço, alumínio e titânio, que são materiais tradicionalmente utilizados na indústria aeroespacial.

FIGURA 2.19 – Desempenho dos materiais compósitos

(Fonte: <http://www.planair.com.br>)

O problema da utilização dos materiais compósitos na indústria aeronáutica, é que principalmente na aviação civil, por questões de segurança, eles têm que ser submetidos a processos de qualificação, e homologação muito rigorosos que consomem muitos recursos e tempo.

Na Europa a *Airbus* e nos EUA a *Boeing* são os fabricantes de aviões que lideram o desenvolvimento desta tecnologia que permite a substituição dos materiais tradicionais pelos materiais compósitos.

A Figura 2.20 apresenta um exemplo da grande evolução deste processo, o estado da arte de aplicação de materiais compostos na área da aviação civil. Observa-se que, além da quantidade de peças fabricadas em material compósito ter crescido substancialmente, a importância estrutural destas peças também cresceu.

FIGURA 2.20 – Utilização de compósitos no *Airbus A380*

(Fonte: DRL Braunschweigr)

Ehinger *et al.* (2010) frisa que a disseminação de componentes de materiais compósitos feitos de plástico reforçado com fibra de carbono (*CFRP*) usados em aeronaves, tem aumentado exponencialmente durante os últimos anos. Especialmente aviões modernos como o *Airbus A350* e o *Boeing 787* aplicam componentes de compósitos para construções leves e altamente resistentes, além de possuírem também baixa densidade, alta rigidez e força, resistência a corrosão e permitir um projeto otimizado contra a fadiga.

A Figura 2.21 mostra a evolução da utilização do *CFRP* na aviação moderna.

FIGURA 2.21 – Desenvolvimento do CFRP em aviões

(Fonte: M. Wiedemann, 2009)

Na aviação militar, a aplicação dos materiais compostos está em um estágio bem mais avançado do que na aviação civil. Segundo a *EADS*, os motivos que provocam a utilização mais intensiva de material compósito na aviação militar do que na aviação civil, são os seguintes:

- ✓ Requerimentos de segurança menos rígidos quanto à utilização de novos materiais;
- ✓ Maior quantidade de verbas para pesquisa e desenvolvimento na área militar, visto que os governos dão suporte aos centros de pesquisa;

- ✓ Peças de menor tamanho.

A Figura 2.22 abaixo exemplifica a aplicação de materiais compósitos no avião militar europeu RAFALE, onde é mostrada a distribuição dos diferentes materiais utilizados ao longo da fuselagem e asas.

FIGURA 2.22 – Utilização de compósitos no avião militar RAFALE

(Fonte: DRL Braunschweigr)

Os materiais compósitos pré-impregnados (*prepegs*) têm dominado o mercado de carbono por muitos anos, porque eles atingem alto teor de fibra e resistência das peças. A utilização da fibra de carbono em conjunto com técnicas de fabricação apropriadas, tem possibilitado o alcance de benefícios em termos de peso e durabilidade dos componentes estruturais do avião (EHINGER, 2010).

No caso dos helicópteros os materiais compósitos têm sido usados há mais de 40 anos, principalmente no rotor principal. A substituição do alumínio por fibras de carbono nas pás do rotor aumentou a vida útil destes componentes em 200 vezes (EUROCOPTER, 2011).

Atualmente todos os rotores de helicópteros são fabricados de material compósito, devido ao seu grande desempenho em relação à fadiga.

A Figura 2.23 apresenta a evolução das pás dos rotores e do mecanismo de controle das pás.

FIGURA 2.23 – Pá do *Eurocopter ATR* em material compósito

(Fonte: www.eurocopter.com)

2.2.4. Produção automática

Frente à crescente demanda para atender as grandes carteiras de encomendas, os fabricantes do setor aeroespacial estão tomando a página das fabricantes de carros, usando a robótica avançada, máquinas especiais e outras ferramentas de automação, para ajudar a impulsionar as taxas de construção de aeronaves e melhorar a eficiência da indústria aeroespacial (WAURZYNIAK, 2011).

Esse avanço tecnológico vem crescendo aceleradamente no setor da indústria aeroespacial, com o objetivo de agregar um maior valor aos clientes, contribuindo com a excelência na fabricação e montagem dos conjuntos aeronáuticos, além de proporcionar uma melhor satisfação do cliente e oferecer oportunidades de crescimento e segurança a todos os colaboradores e acionistas.

Essas novas tecnologias oferecem aos fabricantes de segmentos aeronáuticos uma produção mais limpa, mais rápida, mais precisa, com mais qualidade e confiabilidade para os processos produtivos, além de aumentar a competitividade da empresa.

Os sistemas para fabricação automática estão disponíveis para uma variedade de aplicações, desde para fabricação de peças com usinagem em alta velocidade, por exemplo, até para montagem automática de fuselagens e asas.

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 é feita com rebites, operação produtiva específica do ramo aeronáutico que exige no momento da montagem a execução de outras operações relacionadas: furação, escareação e rebarbação, e que envolve um alto ciclo e também exige uma grande habilidade do operador.

Segundo Jamshidi et al. (2009), discrepâncias de materiais, ferramentas e ambientes de fábrica, assim como os fatores humanos relacionados, fazem parte integrante da variação do processo de fabricação de qualquer componente. Em particular, a montagem de grande volume, peças aeroespaciais é uma área onde níveis significativos de forma e variações dimensionais são encontradas. Esse é um dos importantes motivos, em que atualmente o processo automático vem sendo utilizado de modo crescente. Os sistemas automáticos como, por exemplo, máquinas e robôs, vêm substituindo gradativamente a mão de obra humana nos processos de fabricação e montagem aeronáutica, pelo fato de serem mais eficientes e garantir o produto final com melhor qualidade.

Com os trabalhos de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), os desempenhos dessas máquinas vêm aumentando a cada dia. As primeiras máquinas apesar de apresentarem uma qualidade superior à executada pelo homem tinham uma produtividade inferior à do homem e apresentavam uma limitação quanto à forma das partes a serem fixadas.

Atualmente as máquinas modernas apresentam uma produtividade maior do que o homem e não tem limitações quanto à forma das peças a serem unidas, podendo ser aplicadas para diferentes necessidades e geometrias.

A FIGURA 2.24 ilustra o parque industrial de uma fabricante de fuselagens e segmentos estruturais para as empresas *Boeing* e *Airbus*, onde é possível de se ver uma vasta aplicação de máquinas para montagem automática.

FIGURA 2.24 – Parque de máquinas para montagem automática

(Fonte: www.spiritaero.com)

Segundo John Narkus da COMAU North America (2011), todos os fabricantes estão começando a olhar para o conhecimento, novos processos, linhas em movimento, coisas como estas, a fim de aumentar seus ganhos e melhorar a sua eficiência.

3. METODOLOGIAS DE PROJETO

3.1. DFMA – *Design for Manufacturing and Assembly*

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 (BOOTHROYD, 1994).

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.

3.1.1. A Metodologia DFMA

O objetivo do *Design for Manufacturing (DFM)* é desenvolver um produto que atenda todos os requisitos funcionais e que também facilite e auxilie a manufatura do produto através da simplificação dos processos envolvidos, visando a redução dos 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). 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)

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.

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 adéqua aos requisitos dos clientes e que apresente a melhor condição de montagem). Deve-se analisar, 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.

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)

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.

3.1.2. 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.

a) 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. 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.

b) 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, o componente-base, trazendo a vantagem de maior agilidade e flexibilidade ao processo.

c) 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, etc.

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 sub-montagem comum”.

d) Projeto de peças com características auto-fixadoras

Sempre que possível, deve-se projetar peças com características auto-fixadoras 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 auto-fixação 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.

e) 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.

f) Projetar peças com características de auto-localização

Os projetistas devem, sempre que possível, desenvolver componentes com características de auto-localização, 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. Essas características podem ser conseguidas no componente por intermédio de chanfros, rebaixos etc.

g) Minimização de níveis de montagem

Deve-se prever a possibilidade de sub-montar 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 sub-montagem 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.

h) 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;
5. Peças simétricas reduzem a orientação e a ocorrência de falhas durante a montagem; se a simetria não for possível, projetar características obviamente assimétricas;
6. Não utilizar peças que possam ficar presas ou emaranhadas;
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.

i) 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.

j) 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.

k) Otimização da sequencia de montagem

A sequencia 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 sequencia de montagem é determinar a sequencia 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 sub-montagem;
2. A sequencia de montagem é o inverso da sequencia de desmontagem.

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

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

3.1.3. Projeto para Excelência (DFX – Design for Excellence)

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.

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.

O “X” do *DFX* é o atributo no qual o projeto estará sendo desenvolvido para, ou seja, o requisito principal em que o projeto estará focado durante o desenvolvimento, no intuito de buscar a excelência nesse sentido.

O esquema representado na Figura 3.3 mostra a abrangência da técnica *DFX* no contexto do desenvolvimento do projeto, onde o mesmo poderá ser direcionado para vários atributos, dependendo como o mercado irá demandar as necessidades.

FIGURA 3.3 – Projeto para Excelência (DFX – Design for Excellence)

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.

a) Projeto para Melhor Qualidade (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 ser 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 Management – 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.

b) Projeto para Confiabilidade (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 3.4, 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 (mortalidade infantil) 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 (aleatória) possui taxa de falhas constante e a chance de falhar passa a ser aleatória, não mostrando indícios de que irá ocorrer. A terceira região (desgaste) representa o fim da vida operacional do sistema, a taxa de falhas cresce devido ao envelhecimento funcional dos componentes, fadiga e corrosão.

FIGURA 3.4 – Curva da banheira

(Fonte: Boothroyd; Dewhurst; Knight)

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 desponha, 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. 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, desempenho e na confiabilidade;

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.

c) Projeto para Serviço e Manutenção (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 consequente 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.

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, quanto 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.

d) Projeto para Segurança (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.

e) Projeto para o Meio Ambiente (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 agridam 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 Enviroment* 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 inapropriado 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.

f) Projeto para Uso Amigável (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.

g) Projeto de Curto Tempo para o Mercado (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 ao mercado.

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 consequente 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 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.

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.

h) Projeto para 6 Sigma (Design for 6 σ)

Design for 6 σ pode ser definido como sendo o desenvolvimento de um projeto em que se visa melhorar a qualidade das saídas do processo que são críticas para os clientes, através da identificação e eliminação das causas de defeitos, falhas e erros, além da minimização da variabilidade do processo produtivo (SNEE, 1999). Ele utiliza um conjunto de ferramentas de gestão da qualidade, incluindo métodos estatísticos e cria uma infra-estrutura especial de pessoas dentro da organização ("*Black Belts*", "*Green Belts*", etc.) que são especialistas nesses métodos. Cada projeto 6 σ realizado dentro de uma organização segue uma seqüência definida de passos e tem metas financeiras quantificadas (redução de custos e / ou aumento do lucro).

O termo Seis Sigma originado de terminologia associada com a produção, especificamente os termos associados com modelagem estatística dos processos de fabricação.

A maturidade de um processo de fabricação pode ser descrito por uma razão σ , indicando seu rendimento, ou a porcentagem de produtos livres de defeitos que ela cria. Um processo de seis sigma (6σ) é aquele em que 99,99966% dos produtos fabricados são estatisticamente esperados para estar livre de defeitos (3,4 defeitos por milhão).

i) Projeto para Automação (Design for Automation)

O *Design for Automation*, aqui nesse trabalho nomeado DFA_{TM} , tem por finalidade elaborar um projeto que auxilie e permita a automação nos processos produtivos.

Para que um determinado projeto seja adequado para a montagem automatizada, o requisito básico é que ele possibilite o desempenho das funções e habilidades de um operador humano, tais como a manipulação precisa, identificação rápida de defeitos, etc., além de desempenhá-las com baixo custo. Os sistemas automáticos como robôs, por exemplo, produzem movimentos que resultam em manipulação ou locomoção, manipulando peças e ferramentas para realizarem tarefas de manufatura, tais como manipulação de materiais, soldagem, pintura e montagem. Veículos guiados automaticamente (*AGV's*) transportam materiais em fábricas e depósitos. As aplicações de robôs industriais têm sido por muitos anos, dominadas por tarefas simples de manufatura (MEYER, 1988).

Para que ocorra um sincronismo entre o produto concebido e o processo de produção a ser automatizado, busca-se sempre a integração de funções para minimização do número de peças, padronização, uso de componentes de sistemas modulares, universais e confiáveis, alta flexibilidade do sistema (em relação ao tamanho dos lotes e variação de demanda) e integração total do produto no sistema de produção.

Segundo Bridgewater (1993), há pelo menos 02 níveis em que os projetistas precisam considerar na questão do projeto para automação.

Estes níveis são: o nível de componente e o nível do detalhe da máquina.

1. Nível de componente: abordagens automatizadas para fabricação envolvem o repensar das formas em que os componentes de uma montagem se encontram. Isto é porque os sistemas mais simples de automação têm um número limitado de graus de liberdade com que as peças transladam ou giram. A maneira usual de montar um artefato é verticalmente para baixo. A montagem pode ser inclinada em vários momentos, mas a maioria das peças é colocada na montagem em um sentido vertical, levando à ideia de que é chamado eixo forte de montagem. Supõe-se que os componentes vão para a montagem em linhas retas, e que as mínimas rotações são necessárias para mantê-los no lugar. É uma boa prática desenhar os componentes de modo que exista apenas uma maneira em que podem ser montados.
2. Nível de detalhe da máquina: uma questão interessante é se os robôs industriais são de uso geral, controladas numericamente (CN), ou se as máquinas CN são robôs altamente especializados. Isso mostra a diferença de abordagem entre a automação rígida e flexível de manufatura. No primeiro caso, assume-se que para produção em larga escala de componentes idênticos, a proposta para aquisição de máquinas é mais viável financeiramente. No segundo caso, em produção de volumes menores, significa que a flexibilidade é uma questão fundamental, pois uma célula de trabalho pode começar mais rápido uma nova tarefa, além de permitir uma mistura de diversos tipos de produtos.

3.2. Produção Enxuta (Lean Manufacturing)

A Revolução Industrial, ocorrida em meados do século XVIII, proporcionou grandes avanços tecnológicos nas atividades produtivas, que anteriormente eram realizadas manualmente por artesãos e aprendizes em suas oficinas. Sua principal característica foi a mecanização dos sistemas de produção, a começar pela substituição da força do homem e da água pela força mecanizada. Além disso, constituiu um conjunto de mudanças tecnológicas com profundos impactos nos níveis econômicos e sociais.

A Revolução Industrial marcou o início da produção industrial moderna, com a utilização intensiva de máquinas, criação de fábricas, transformações urbanas e rurais e também com alguns movimentos de trabalhadores que lutavam por melhores condições de trabalho; já que no início desse novo período, as fábricas não tinham ambientes adequados e a maioria dos empregados chegava a cumprir 18 horas por dia. A Revolução Industrial permitiu não somente o desenvolvimento de maquinários utilizados nos sistemas fabris, mas também a maneira de planejar a produção e de controlar os trabalhadores.

O início do século XX foi marcado por uma grande explosão de produção devido à ampliação da força de trabalho, ao surgimento de novos mercados e ao desenvolvimento dos sistemas de transporte nos Estados Unidos no período Pós Guerra Civil. Isso fez com que as formas de administração de produção fossem analisadas e modificadas com o objetivo de atender o “novo” mercado. Ainda no século XX, o engenheiro Frederick Taylor, considerado o pai da Administração Científica, desenvolveu um estudo sobre os problemas fabris da época. Taylor iniciou o seu estudo observando o trabalho dos operários, pois buscava um maior rendimento na execução de suas tarefas. O “Estudo dos Tempos e Métodos”, realizado por Taylor, buscava o trabalhador ideal para realizar uma atividade específica, da melhor maneira possível e com a menor duração de tempo de execução (MENEZES, 2003).

A partir dos estudos realizados por Taylor, o empresário Henry Ford, fundador da Ford Motor Company, desenvolveu outras técnicas avançadas para a época. Ele aperfeiçoou as linhas de montagem, tornou-as mecanizadas e desenvolveu um modelo de produção em massa, que barateava o custo do produto final, proporcionava um maior volume de produção, além de predominar a especialização e divisão do trabalho. O método de produção Fordista exigia grandes investimentos e instalações, os veículos eram montados em esteiras rolantes que se movimentavam enquanto o operário ficava praticamente parado, realizando uma pequena etapa da produção (linha de produção em movimento contínuo). Sendo assim, o esforço necessário para a produção, se reduziu em 90% (WOMACK & JONES, 2004).

No entanto, os autores ressaltam que esse método era eficiente somente quando o volume de produção era suficientemente alto, justificando a linha de montagem de alta velocidade.

FIGURA 3.5 – Eras da manufatura

(Fonte: *The Machine that Changed the World*, Womack & Jones, 1990)

A partir de 1945, com o término da Segunda Guerra Mundial, o Japão iniciou a produção de carros de passeio, que até então eram somente fabricados nos Estados Unidos e na Europa. Entretanto, o mercado consumidor japonês era restrito e demandava diversos modelos diferentes, que impedia a adoção do sistema de produção em massa desenvolvido por Taylor e Ford, e que predominou até a década de 90.

Ao final da Segunda Guerra Mundial, surge então, o Sistema Toyota de Produção, desenvolvido por Taiichi Ohno, engenheiro e ex-vice-presidente da Toyota Motors, com o objetivo de atender o mercado japonês e suas particularidades.

Ohno começou a examinar o que poderia ser alterado na linha de produção baseada no sistema de produção em massa.

O Sistema Toyota de Produção é referenciado atualmente como Sistema de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) e, de acordo com Ghinato (2000), é “muito mais eficiente, flexível, ágil e inovador do que a produção em massa; um sistema habilitado a enfrentar melhor um mercado em constante mudança”.

3.2.1. Sistema Toyota de Produção - STP

De acordo com Ghinato (2000), o interesse da família Toyoda pela indústria automobilística teve início após a primeira viagem de Sakichi Toyoda aos Estados Unidos em 1910, quando visitou a fábrica da Ford. Na época, a família Toyoda era dona da grande fabricante de equipamentos e máquinas têxteis, *Toyoda Automatic Loom Works* e, em decorrência das visitas a Ford, Kiichiro Toyoda, filho do fundador Sakichi Toyoda, criou um departamento automobilístico na empresa, confiante de que a indústria automobilística se tornaria em breve, o carro-chefe da indústria mundial.

A princípio, a especialidade da Toyota Motors, fundada em 1937, era voltada aos caminhões para as forças armadas, porém, tinha como objetivo atuar na produção em larga escala de carros de passeio e caminhões comerciais (GHINATO, 2000). O que impediu e adiou as pretensões da Toyota em alcançar o seu objetivo foi a participação do Japão na 2ª Guerra Mundial. O autor afirma que após o término da 2ª Guerra Mundial, a Toyota retomou os planos de tornar-se uma grande montadora, mas a distância que a separava das concorrentes americanas era monstruosa; além disso, claramente podia se observar que a produtividade dos operários americanos era quase 10 vezes maior que as dos operários japoneses. Isso fez com que o presidente Kiichiro Toyoda afirmasse que era preciso alcançar os Estados Unidos em três anos, caso contrário, a indústria automobilística japonesa não iria sobreviver (KLIPPEL, 2008). Este fato “acordou” e motivou os japoneses a alcançarem os Estados Unidos. Por meio de estudos, os japoneses identificaram que o sistema de produção em massa americano possibilitava a produção industrial em grandes quantidades e a redução de custos de produção. A Toyota tentou por várias vezes a adoção desse sistema de produção, com o intuito de reproduzir a organização e os resultados obtidos na Ford. A adoção do sistema de produção em massa não foi possível na Toyota por causa das particularidades do mercado consumidor japonês, que era limitado e demandava diversos modelos diferentes de automóveis. Essa característica não justificava, e na verdade impedia os gastos com a implantação do sistema de produção em massa (MATAR & AQUINO, 1997 apud MENEZES, 2003).

Em 1956, o então engenheiro-chefe da Toyota, Taiichi Ohno, em visitas às fábricas da Ford, notou que a produção em massa necessitava de melhorias para que pudesse ser aplicada em um mercado exigente de demanda variada de produtos, que era a realidade do mercado japonês. A partir daí ele começou a examinar o que poderia ser alterado na linha de produção.

Sua análise apontou que as tarefas deste sistema de produção eram repetitivas e, em sua maioria, não agregavam valor ao produto final. Além disso, existia uma forte divisão do trabalho (projeto e execução), a qualidade era negligenciada no decorrer do processo de fabricação e havia grandes estoques intermediários de inúmeros componentes (GHINATO, 2000). Esses estudos incentivaram a criação de um novo modelo de produção, conhecido como o “Sistema Toyota de Produção” (STP), que tinha como objetivo principal atender as necessidades e requisitos do mercado japonês; utilizando-se de algumas características da produção especializada (alta qualidade e customização de produtos) e da produção em massa (produção em larga escala para atender à demanda com preços reduzidos) (MENEZES, 2003).

Para Ohno (1997 apud Klippel, 2008), o motivo que justificava a superioridade da produtividade americana com relação à japonesa era somente um: existiam perdas no sistema de produção japonês. Este fato serviu para a estruturação de um processo sistemático de identificação e eliminação de perdas (GHINATO, 2000).

Na década de 70, a crise do petróleo acabou trazendo grandes problemas e prejuízos a milhares de empresas com o aumento do preço do barril e com as mudanças na relação entre oferta e demanda, que afetou toda a economia mundial. Ghinato (2000), afirma que, em meio a esta crise, a Toyota se destacou como umas das poucas empresas que escaparam praticamente ilesas dos efeitos que foram causados. Este acontecimento intrigou especuladores do mundo todo: “Qual o segredo da Toyota?”.

Segundo Klippel (2008), antes desta crise as organizações realizavam a produção em massa, e o mercado comprava tudo o que se produzia; porém após a crise, o excesso da oferta fez com que o mercado se tornasse mais exigente e com que as empresas buscassem a sua sobrevivência através da diferenciação ou variabilidade de seus produtos. Este era justamente o principal objetivo do Sistema Toyota de Produção: alta variedade em pequenas quantidades.

Contudo, a essência do Sistema Toyota de Produção é a identificação e eliminação de toda e qualquer perda do processo produtivo. Shingo (1996) afirma que esse sistema é composto em 80% de eliminação das perdas, 15% de um sistema de produção e 5% de *Kanban*.

Shingo (1996) ressalta que antes de se estudar o Sistema Toyota de Produção, é preciso entender a função da produção como um todo. Segundo ele, produção é uma rede de processos e operações; sendo que processo é a transformação da matéria-prima em produto semi-acabado ou acabado e operação é o trabalho realizado para efetivar essa transformação.

A análise do processo examina o fluxo de material ou produto e a análise de operações examina o trabalho realizado sobre os produtos pelo trabalhador e pela máquina (SHINGO, 1996). A separação nos conceitos de processo e operação reforça a afirmação de Shingo de que a melhoria das operações individuais não aumenta a eficiência global do processo e que para maximizar a eficiência da produção, é necessário analisar profundamente e melhorar o processo antes de tentar melhorar as operações. É denominada perda qualquer atividade que não contribui para as operações (SHINGO, 1996 apud MENEZES, 2003).

Segundo Ohno (1997 apud Menezes, 2003), desperdício é entendido como todo elemento de produção que eleva os custos sem representar valor no produto, por exemplo, excesso de pessoas, estoques e equipamentos.

3.2.2. Princípio do não-custo

As análises feitas por Ohno (1997 apud Klippel, 2008), na Toyota, mostraram que segundo a lógica tradicional, o preço do produto final era imposto ao mercado como resultado de um dado custo de produção somado a uma margem de lucro desejada.

A equação (1) que descreve a antiga atuação das organizações no mercado é:

$$\textit{Preço de Venda} = \textit{Custo} + \textit{Lucro} \quad (1)$$

De acordo com Klippel (2008), Ohno notou que a aplicação desta equação fazia com que o consumidor fosse o responsável por todo o custo de fabricação e, segundo Ghinato (2000), o fornecedor transferia aos clientes os custos adicionais decorrentes da eventual ineficiência de seus processos de produção.

A competitividade acirrada e o surgimento de um mercado consumidor mais exigente fizeram com que o preço do produto final fosse determinado pelo mercado e não mais pelo fornecedor. Isso fez com que a única maneira de aumentar ou manter o lucro fosse através da redução dos custos.

Desta forma, a equação (2) passou a ser definida da seguinte maneira:

$$\textit{Preço de Venda} - \textit{Custo} = \textit{Lucro} \quad (2)$$

Segundo Shingo (1996), aplicando esta fórmula, que pressupõe que são os consumidores quem decidem o preço de venda, o lucro é o que resta após a subtração do custo do preço final. A Toyota, por sua vez, pretendia reduzir os custos por meio da eliminação das perdas que analisava detalhadamente na cadeia de valor, ou seja, os processos pelos quais passa o material desde a matéria-prima até se transformar em produto acabado.

Ohno (1997 apud Klippel, 2008) diz que “a redução de custos deve ser o objetivo dos fabricantes de bens de consumo que busquem sobreviver no mercado atual”.

Shingo (1996 apud Klippel, 2008) reforça que isto implica na realização de esforços implacáveis para cortar custos, sem os quais uma empresa não sobrevive.

3.2.3. Perdas no processo produtivo

O Sistema Toyota de Produção procura por todos os tipos de desperdícios, principalmente aqueles que não são notados porque se tornaram aceitos como parte natural do trabalho diário (SHINGO, 1996).

Com o intuito de identificar e eliminar as perdas, os japoneses identificaram 07 grandes grupos, que são as principais formas de desperdícios na indústria:

1. Perdas por superprodução;
2. Perdas por espera;
3. Perdas por transporte;
4. Perdas no próprio processamento;
5. Perdas por estoque;
6. Perdas por movimentação;
7. Perdas por fabricação.

A Toyota, segundo Shingo (1996), descobre e implementa soluções que impedem de forma definitiva a recorrência dos problemas no sistema fabril. Se uma organização quer prevenir a repetição do problema, deve primeiramente identificar e tomar conhecimento da causa básica desse problema.

O autor descreve que o processo é constituído por quatro componentes:

- a) Processamento;
- b) Inspeção;
- c) Transporte;
- d) Espera.

Dentre esses componentes, apenas o processamento agrega valor ao produto, os demais podem ser vistos como desperdício.

1. Perda por superprodução

Ghinato (2000) afirma que esse tipo de perda é a mais danosa entre as demais, pois ela pode esconder as outras e é a mais difícil de ser eliminada. É dividida em dois subgrupos:

- a) Superprodução por quantidade
- b) Superprodução antecipada.

A superprodução por quantidade é aquela que produz além do volume programado ou solicitado com o objetivo de “compensar” a produção de produtos defeituosos ou para fazer estoque. Na Toyota, este é um tipo de perda inadmissível e está completamente eliminada.

2. Perda por espera

Este tipo de perda se origina de um intervalo de tempo no qual nenhum processamento, transporte ou inspeção é executado (GHINATO, 2000). Dessa maneira os lotes ficam parados aguardando uma sinalização para seguirem no decorrer do processo.

A perda por espera se dá principalmente pela falta de balanceamento do processo de produção que ocasiona a paralisação de postos de trabalho e resulta numa baixa taxa de ocupação de equipamentos (KLIPPEL, 2008).

É possível destacar três tipos de perda por espera:

- a) Perda por espera no processo;
- b) Perda por espera do lote;
- c) Perda por espera do operador.

Segundo Ghinato (2000), a perda por espera no processo acontece quando o lote inteiro aguarda o término da operação que está sendo executada no lote anterior, até que a máquina, dispositivos e/ ou operadores estejam disponíveis para o início da operação. Já a perda por espera do lote corresponde à espera que cada peça componente de um lote é submetida até que todas as peças do lote tenham sido processadas para que possam seguir ao próximo passo ou operação.

Por fim, a perda por espera do operador se refere à ociosidade gerada quando este é forçado a permanecer junto à máquina para acompanhar e/ ou monitorar o processamento do início ao fim ou devido ao desbalanceamento de operações. O que se refere aos períodos de tempo em que os trabalhadores e máquinas não estão sendo utilizados produtivamente enquanto seus horários estão sendo despendidos (MENEZES, 2003).

As perdas por espera ocorrem também durante o setup dos equipamentos e máquinas. Segundo Klippel (2008), o estudo da Troca Rápida de Ferramentas – TRF tem por finalidade reduzir este tipo de perda. Em função da demora para o setup, as organizações costumam aumentar o tamanho dos lotes para compensar as horas-homem gastas durante a preparação das máquinas. A adoção dos sistemas TRF e Troca de Ferramentas em um Único Toque (OTED - *One Touch Exchange of Die*), segundo Shingo (1996), reduzem os tempos de setup e eliminam a necessidade da utilização de grandes lotes.

3. Perdas por transporte

De acordo com Slack *et al.* (2002), o transporte de materiais dentro da fábrica não agrega valor ao produto final, pois ele sempre estará da mesma forma no início e no fim do ciclo. No entanto a reorganização do arranjo físico para aproximar os estágios do processo, bem como o aprimoramento nos métodos de transporte e na organização do local de trabalho, podem reduzir este tipo de desperdício.

Ghinato (2000) afirma que a eliminação ou redução do transporte deve ser encarada como uma das prioridades no esforço de redução de custos porque, geralmente, essa atividade ocupa 45% do tempo total de fabricação de um item.

A princípio, devem ser realizadas melhorias como alteração de *layout* que minimizam ou eliminem a movimentação de materiais. Após serem realizadas estas possibilidades de melhorias no processo é que devem ser iniciadas as melhorias nas operações de transporte, como, por exemplo, a instalação de pontes rolantes e utilização de empilhadeiras.

4. Perdas no próprio processamento

Slack *et al.* (2002) afirma que no próprio processo pode haver fontes de desperdício, pois algumas operações existem apenas em função do projeto ruim de componentes ou manutenção deficiente, podendo, portanto, ser eliminadas.

As perdas no próprio processamento, segundo Ghinato (2000) são aquelas que poderiam ser eliminadas sem afetar as características e funções básicas do produto/ serviço, e também aquelas situações em que o desempenho do processo se encontra desfavorável com relação à condição ideal.

Shingo (1996 apud Menezes, 2003) sugere que o processamento em si e as operações essenciais devem ser examinados cuidadosamente na busca de possíveis melhorias. Segundo o autor, há duas formas de melhorar os processos para eliminar as perdas devido aos processamentos inadequados:

- a) Melhorar o produto em si, por meio da Engenharia de Valor, onde se questiona como o produto pode ser redesenhado para manter a qualidade e ao mesmo tempo reduzir os custos de fabricação.

- b) Melhorar os métodos de fabricação do ponto de vista da Engenharia de Produção ou da Tecnologia de Fabricação, para analisar como a fabricação de determinado produto pode ser melhorada.

A moldagem a vácuo para evitar rebarbagem e reduzir defeitos é um exemplo de melhoria do método de processamento (SHINGO, 1996).

5. Perdas por estoque

Para alguns administradores, os estoques de matéria-prima, produtos semi-acabados e produtos acabados proporcionam o alívio e a “segurança” de sincronia entre os processos, desde o recebimento de matéria-prima até o fornecimento de produto acabado.

Considerado por muitos autores como um “mal necessário”, os estoques podem esconder outros problemas no sistema de produção, como, por exemplo, a fabricação de produtos defeituosos.

Shingo (1996) afirma que processos ineficientes resultam em três tipos de estoques:

- a) Estoque criado pela produção antecipada, quando os ciclos de produção são maiores que os ciclos de entrega ($P > E$);
- b) Estoque produzido por antecipação como precaução em relação às flutuações da demanda;
- c) Estoque produzido para compensar o deficiente gerenciamento da produção e as esperas provocadas pela inspeção e transporte.

Segundo o autor, existem estratégias com o intuito de atingir o ideal da produção com estoque zero, conforme descritas abaixo:

- a) Reduzir drasticamente os ciclos de produção;
- b) Eliminar as quebras e os defeitos, detectando suas causas para solucionar a raiz dos problemas;

- c) Reduzir os tempos de setup, que possibilita a produção em pequenos lotes e permite respostas rápidas às flutuações da demanda.

Slack *et al.* (2002) garante que só é possível reduzir os estoques por meio da eliminação das suas causas.

6. Perdas por movimentação

As perdas por movimentação se referem aos movimentos desnecessários realizados pelos operários durante a realização de uma tarefa. Ghinato (2000) afirma que para compreender e encontrar a raiz deste tipo de perda é necessário aplicar o estudo de tempos e movimentos. Segundo ele, a introdução de melhorias decorrentes deste estudo pode reduzir os tempos de operação de 10 a 20%.

Slack *et al.* (2002) afirma que um operador pode parecer ocupado, mas algumas vezes nenhum valor está sendo agregado pelo trabalho. A simplificação do trabalho é uma rica fonte de redução do desperdício de movimentação.

Esta simplificação ou racionalização dos movimentos pode ser obtida por meio da mecanização de operações, nas quais algumas das atividades manuais realizadas pelos operadores passam a ser realizadas pelas máquinas (GHINATO, 2000).

De acordo com Shingo (1996), a movimentação dentro do processo produtivo, mesmo que rápida e eficiente, pode não levar a nada, ou seja, pode não agregar valor ao produto final.

Vale ressaltar que somente após terem sido realizadas todas as possibilidades de melhorias na movimentação dos operários e nas rotinas das operações, é que devem ser introduzidas melhorias nas operações via mecanização.

7. Perdas por fabricação de produtos defeituosos

É a perda que se caracteriza pela fabricação de produtos com qualidade fora de uma especificação ou padrão estabelecido e que não satisfaçam os requisitos de uso. Este tipo de desperdício só aumenta os custos de produção.

Conforme citado anteriormente, o Sistema Toyota de Produção identifica e elimina as perdas nos processos junto à causa-raiz do defeito. Portanto, a eliminação deste tipo de perda depende da aplicação sistemática de métodos de controle na fonte para identificar e prevenir a ocorrência destes produtos, ao invés de simplesmente identificar os produtos defeituosos (GHINATO 2000 & KLIPPEL, 2008).

O Sistema Toyota de Produção, segundo Shingo (1996), tem na inspeção o objetivo de prevenção para a ocorrência de tais problemas. De acordo com o autor, “a inspeção 100% é realizada nas partes previamente processadas visando a eliminar os itens defeituosos”; sendo assim, “defeito zero” é um dos objetivos do Sistema Toyota de Produção (MENEZES, 2003).

Shingo (1996) separa os tipos de inspeção em:

- a) Inspeção por julgamento;
- b) Inspeção Informativa.

Segundo ele, a inspeção por julgamento descobre os defeitos enquanto a inspeção informativa faz com que seja reduzida a ocorrência destes defeitos.

A produção de produtos defeituosos significa desperdício de qualidade.

Slack *et al.* (2002) afirma que os custos totais de qualidade são muito maiores do que tradicionalmente têm sido considerados, sendo, portanto mais importante atacar as causas de tais custos.

3.2.4. Os Pilares do Sistema Toyota de Produção

Uma das respostas encontradas para explicar o sucesso da Toyota após a crise do petróleo é a de que a concorrência acirrada existente naquela época impunha restrições à produção em larga escala. Na realidade, as organizações buscavam a redução de custos nos processos de produção para se manterem no mercado.

A Toyota, por sua vez, estava concentrada na identificação e eliminação de perdas do processo produtivo antes mesmo da crise, o que proporcionou à empresa, vantagem frente às demais.

O Sistema Toyota de Produção, conhecido atualmente pelo termo “Produção Enxuta”, é estruturado com base nos 02 pilares principais de sua sustentação (*Just-in-Time* e *Jidoka*), além de outros componentes essenciais do sistema conforme demonstrado na figura abaixo:

FIGURA 3.6 – Estrutura do Sistema Toyota de Produção (TPS)

(Fonte: Guinato, 2000)

De acordo com a estrutura da Figura 3.6 mostrada acima, é possível enxergar claramente que o real objetivo do Sistema Toyota de Produção é atender da melhor maneira possível às necessidades do cliente, fornecendo-lhes produtos e serviços da mais alta qualidade, ao mais baixo custo e no menor lead-time possível (GHINATO, 2000). Deve-se considerar também que além dos itens citados, o STP proporciona um ambiente de trabalho seguro, no qual a moral e a satisfação dos trabalhadores são de extrema importância. Nos próximos itens segue a descrição detalhada dos pilares do Sistema Toyota de Produção.

Just-in-Time

Não é correto afirmar que o *Just-in-Time* é uma interpretação do Sistema Toyota de Produção, pois na verdade o *JIT* é apenas uma técnica de gestão incorporada à estrutura do STP, que é mais abrangente e que possui outras técnicas incorporadas a ele.

Ohno (1997 apud Ghinato, 2000) conceitua o *JIT* como uma idéia de Kiichiro Toyoda, que parte do princípio de que numa indústria, como a automobilística, “o ideal seria ter todas as peças ao lado das linhas de montagem no momento exato de sua utilização”. Esse conceito para o *Just-in-Time* explica a afirmação de Shingo (1996), na qual o autor descreve o *JIT* da seguinte forma: “produzir peças ou produtos exatamente na quantidade requerida, apenas quando são necessários, e não antes disso”; já que além do *JIT*, o STP realiza também a produção com estoque zero.

O objetivo do *Just-in-Time*, segundo Ghinato (2000) é identificar, localizar e eliminar as perdas, garantindo o fluxo contínuo de produção. O autor afirma ainda que, a viabilização do *JIT* depende de 03 (três) fatores: Fluxo Contínuo, Ritmo de Produção (*Takt-Time*) e Produção Puxada.

Fluxo contínuo

A implementação de um fluxo contínuo no processo de fabricação de um produto implica na reorganização do layout fabril, transformando-os de layouts funcionais para layouts celulares. Nos layouts funcionais as máquinas se localizam agrupadas de acordo com seus processos (ex: grupo de fresas, grupo de prensas), já nos layouts celulares, as células são montadas de acordo com os diversos processos necessários para a fabricação de determinada família de produtos.

Ghinato (2000) afirma que o que realmente conduz ao fluxo contínuo de produção é a capacidade de implementação de um fluxo unitário de produção, para que os estoques entre processos sejam eliminados completamente.

Assim sendo, é possível eliminar as perdas por estoque, perdas por espera e reduzir o *lead-time* de produção, conforme a Figura 3.7 mostrada abaixo.

FIGURA 3.7 – Fluxo Interrompido e Fluxo Contínuo

(Fonte: Bouzon, 2008)

Takt-Time

A implementação do *JIT* exige também um perfeito balanceamento das operações no decorrer do processo de fabricação, que está ligado ao conceito de *takt-time* (GHINATO, 2000).

Takt-time associa e condiciona o ritmo de produção ao ritmo de vendas, que na lógica da “produção puxada”, o fornecedor produz de acordo com a demanda do cliente. É possível analisar o *takt-time* pela seguinte fórmula 3:

$$Takt - time = \frac{\text{Tempo total disponível}}{\text{Demanda do cliente}} \quad (3)$$

Ghinato (2000) demonstra, que é possível calcular o *takt-time* conforme o seguinte exemplo:

Demanda = 576 peças/ dia

Tempo total disponível = 8 horas (28.800 segundos)

Takt-time = 28.800 segundos ÷ 576 peças = 50 segundos/ peça

Produção Puxada

A produção puxada evita a superprodução, uma vez que produz somente o que é vendido. No Sistema Toyota de Produção, o ritmo da demanda do cliente final é repercutido ao longo de toda a cadeia de valor; isto ocorre porque a informação de produção flui de processo em processo, em sentido contrário ao fluxo de materiais (GHINATO, 2000).

O sistema de produção puxada proporciona aos “processos-clientes” a possibilidade de “comprarem” o que precisarem quando for conveniente. Shingo (1996) compara esse tipo de produção como um supermercado. Para ele os clientes podem ir às prateleiras e apanharem o que quiserem, pois elas serão reabastecidas à medida que os produtos forem retirados.

Womack & Jones (2004) afirmam que “é preciso produzir o que os clientes querem, na hora que eles querem, pois assim uma empresa enxuta pode se utilizar de mecanismos que deixem o cliente puxar o produto quando necessário”.

Na Toyota, a produção puxada é viabilizada pelo *Kanban*, um sistema de comunicação entre as operações.

O *Kanban* se constitui num método simples de controlar visualmente os processos, além de balancear a produção, eliminar as perdas e permitir reposição de estoques baseados na demanda (KLIPPEL, 2008).

O *Kanban* auxilia o sistema de produção puxada, pois o processo subsequente retira do processo precedente as peças e materiais necessários para sua utilização, bem como impede a produção e transportes excessivos e a fabricação de produtos defeituosos.

Slack et al. (2002) define 03 (três) tipos de *Kanbans*:

1. *Kanban* de movimentação ou transporte: usado para especificar o lugar de onde o componente deve ser retirado e sua destinação;
2. *Kanban* de produção: sinaliza o início de um processo para determinado item, especificando os materiais necessários, quantidades e outras informações relevantes para sua fabricação;
3. *Kanban* do fornecedor: é utilizado para avisar ao fornecedor a necessidade de envio de material para determinado estágio da produção. É normalmente utilizado com fornecedores externos.

O *Kanban* mais usado nos processos produtivos é o de produção e o de movimentação.

Jidoka

O *Jidoka* teve origem em 1924 quando Sakichi Toyoda verificou que as máquinas de tear da Toyoda Automatic Loom Works, não detectavam os problemas que ocorriam nas linhas de produção, como por exemplo, o rompimento de fios. Era necessário manter um funcionário inspecionando a máquina durante todo o seu trabalho para tentar localizar tais problemas (KOSAKA, 2006).

Este tipo de controle detectava os problemas somente na conclusão do processo, o que implicava na fabricação de muito tecido defeituoso, além de desperdiçar o tempo de trabalho do operador incumbido para tal tarefa.

A partir de 1924, Sakichi Toyoda percebeu que era possível e necessário criar dispositivos para que as próprias máquinas detectassem esses problemas durante o processo de fabricação.

Esses dispositivos auxiliam na busca dos defeitos e garantem que somente a quantidade programada seja produzida, pois as máquinas têm a capacidade de parar a linha de produção caso alguma anomalia seja encontrada. Além disso, os dispositivos dispensam a atenção constante do operador durante o processamento e viabilizam a supervisão simultânea de diversos teares.

Tendo em vista os benefícios proporcionados por esses dispositivos, Ohno formulou a seguinte questão: “Porque uma pessoa na *Toyota Motor Company* é capaz de operar apenas uma máquina enquanto na fábrica têxtil Toyoda uma operadora supervisiona cerca de 40 a 50 teares automáticos?”.

Ghinato (2000) afirma que a resposta estava claramente visível, pois as máquinas da Toyota não estavam preparadas para parar automaticamente quando atingissem o volume de produção programado ou quando algo anormal acontecesse.

Essa percepção fez com que Ohno adotasse o mesmo procedimento nas máquinas da Toyota, dotando-lhes de “inteligência” para identificar tais fatos.

“*Jidoka* consiste em facultar ao operador ou à máquina a autonomia de parar o processamento sempre que for detectada qualquer anomalia” (GHINATO, 2000).

Segundo o autor, a palavra *Jidoka* (ou automação) significa apenas automação, enquanto na verdade a expressão *Ninben no aru Jidoka* traduz o verdadeiro significado do conceito: máquina dotada de inteligência e toque humano.

A Figura 3.8 exemplifica um modelo de *Jidoka* na linha de montagem da Toyota. Um torquímetro emite sinal sonoro quando o equipamento não está na posição pré-determinada e assegura que o torque seja medido garantindo a qualidade dentro do processo.

EXEMPLO DE TORQUÍMETRO COM MICRO SENSOR

Torquímetro dotado com sinal sonoro que se não for utilizado na posição pré-determinada, a linha pára.

FIGURA 3.8 – Exemplo de Jidoka – dispositivo

(Fonte: *Lean Institute Brasil*)

Devido à implementação do *Jidoka* nas linhas de montagem da Toyota, o rendimento da produção chega aos 100%, ou seja, praticamente não há paradas.

Os dispositivos utilizados no *Jidoka* são conhecidos como *Poka-Yoke* e sua utilização proporciona a Separação Homem/ Máquina conforme descrito nos itens seguintes.

Separação Homem / Máquina

Como fora citado anteriormente, a utilização de dispositivos capazes de identificar anormalidades no processo promoveu a separação entre o homem e a máquina. Essa separação, de acordo com Ghinato (2000), é um requisito fundamental para a implementação do *Jidoka*, pois na prática a separação ocorre entre a detecção da anormalidade (máquina) e a solução do problema (homem).

A separação entre o homem e a máquina pode ser observada na Figura 3.9, onde é possível observar que a “inteligência” das máquinas permite que o trabalhador opere mais uma delas simultaneamente.

FIGURA 3.9 – Separação entre o Homem e a Máquina

(Fonte: www.lookfordiagnosis.com)

Poka-Yoke

Poka-Yoke são os dispositivos pelos quais o *Jidoka* é colocado em prática, pois são os mecanismos de detecção de anormalidades que, acoplados a uma operação, impedem a execução irregular de uma atividade (GHINATO, 2000).

Kosaka (2006) descreve que o *poka-yoke* não permite que algo errado seja realizado no processo. Segundo ele, existem regras para a implementação do *poka-yoke*:

- Tomar um processo piloto e fazer uma lista dos problemas mais comuns;
- Priorizar os erros por ordem de frequência;
- Priorizar os erros em ordem de importância;
- Projetar dispositivos *poka-yoke* para impedir erros mais importantes das duas listas;
- Sempre que economicamente viável, preferir a implementação dos dispositivos *poka-yoke* em substituição a outros métodos de inspeção.

A Figura 3.10 demonstra a utilização de um dispositivo *poka-yoke*.

FIGURA 3.10 – Exemplo de *Poka-Yoke*

(Fonte: *Lean Institute Brasil*, 2012)

Operações padronizadas

Ghinato (2000) define que as operações padronizadas são consideradas um método efetivo e organizado para produzir sem perdas, pois procura obter o máximo de produtividade com a identificação e padronização dos elementos que agregam valor. Outros objetivos que este tipo de operação procura são o balanceamento entre os processos e a definição do nível mínimo de estoque em processamento.

Para Klippel (2008), a padronização das operações só deve ser estabelecida após a realização das melhorias possíveis de serem implementadas e que deverão ser mantidas.

A padronização das operações permite que sejam identificadas as anomalias do processo, ou seja, tudo o que não está no projeto ou que está fora da qualidade especificada.

Segundo Ghinato (2000), os componentes que constituem a operação padronizada são:

- a) Takt-Time;
- b) Rotina-Padrão de Operações;
- c) Quantidade-Padrão de Inventário em processamento.

A rotina-padrão de operações é um conjunto de operações executadas por um operador em uma sequencia determinada e permite que as atividades sejam realizadas novamente de forma consistente ao longo do tempo. Essa atividade traz o benefício de manter sempre os mesmos procedimentos para a execução de determinadas tarefas. Por outro lado, a quantidade-padrão de inventário em processamento corresponde à mínima quantidade de peças necessárias para manter o fluxo constante e nivelado de produção.

Klippel (2008) afirma que padronizar é uma maneira de prevenir o reaparecimento do problema, ou seja, estabelecer padrões e itens de controle de tal forma que o problema nunca mais ocorra.

Segundo Carneiro (2003), no aspecto humano, a padronização promove maior versatilidade dos profissionais e permite um aperfeiçoamento contínuo decorrente da utilização de ferramentas como:

- Controle Estatístico do Processo (CEP): se preocupa em checar um produto ou serviço durante sua criação. Se algo estiver fora dos padrões, a linha pára até que o problema seja solucionado (SLACK, 2002).
- Análise de Pareto: técnica relativamente direta que classifica os itens de informação nos tipos de problemas ou causas de problemas por ordem de importância (SLACK, 2002).

Heijunka

De acordo com Ghinato (2000), *heijunka* é a criação de uma programação nivelada através do sequenciamento de pedidos em um padrão repetitivo e do nivelamento das variações diárias de todos os pedidos para corresponder à demanda no longo prazo.

Dito de outra maneira, *heijunka* é o nivelamento das quantidades e tipos de produtos.

O *heijunka*, assim como o próprio Sistema Toyota de Produção surgiu a partir de uma necessidade. É considerado um dos fundamentos principais do STP, juntamente com o *kaizen* e com as operações padronizadas que proporcionam a estabilidade do processo produtivo.

Kaizen

Kaizen é uma palavra de origem japonesa que significa mudança para melhor ou aprimoramento contínuo (kai = mudança e zen = para melhor).

Na realidade pode ser interpretada como melhoria incremental e contínua de determinada atividade, focada na eliminação de perdas (muda), agregando mais valor ao produto/ serviço com um mínimo de investimento (GHINATO, 2000).

De acordo com Ghinato (2000) sua prática depende do monitoramento contínuo dos processos com a utilização do ciclo de Deming (PDCA).

O ciclo PDCA (mostrado na Figura 3.11), é um método que visa controlar e conseguir resultados eficazes e confiáveis nas atividades de uma organização, com o objetivo de padronizar as informações do controle de qualidade, evitar erros lógicos nas análises e tornar as informações mais fáceis de entender (DEMING, 1990).

FIGURA 3.11 – Ciclo PDCA

(Fonte: Deming, 1990)

Os passos que compõe o ciclo PDCA são:

- P (*Plan*): planejamento. Definição das metas e métodos que permitirão atingi-las;
- D (*Do*): execução das atividades;
- C (*Check*): verificar os resultados da tarefa executada;
- A (*Action*): atuar corretivamente.

Fleury (1993, apud Brito, 2003) afirma que “o *Kaizen* é uma postura crítica das empresas japonesas que se traduz num esforço contínuo para aumentar a eficiência dos processos produtivos e aplica diversas técnicas para essa finalidade”, tais como:

- TQC (*Total Quality Control*): controle exercido por todas as pessoas da organização para a satisfação das necessidades dos clientes (CAMPOS, 2008);
- Análise de Valor: é um esforço realizado para atingir o valor ótimo de um produto já existente, em fase de produção, promovendo as funções necessárias ao menos custo (LUIS & ROZENFELD, 2008).
- CCQ (Círculos de Controle de Qualidade): Pode ser representado por um pequeno grupo de funcionários que voluntariamente se une para conduzir atividades de controle de qualidade dentro da mesma área de trabalho. Sua motivação básica é participação (CARDOSO & MARTINELLI, 2000).

Estabilidade

A estabilidade é considerada a base do Sistema Toyota de Produção como um todo, pois auxilia na garantia da produção de itens livres de defeitos (pilar Jidoka), na quantidade e momento certo (pilar Just-in-Time) (GHINATO, 2000).

O autor afirma ainda que o planejamento da produção e das próprias ações de melhorias só pode ser realizado em um ambiente sob controle e previsível, bem como o processo de identificação e eliminação de perdas, que só consegue ser efetivado em condições estáveis, caso contrário não é possível encontrar os problemas de forma preventiva e sim, corretiva.

3.2.5. *Pensamento Enxuto (Lean Thinking)*

O termo Produção Enxuta foi usado pela primeira vez no meio científico pelos autores Womack & Jones (1992) em seu livro “A máquina que mudou o mundo”. A Produção Enxuta é uma atualização do Sistema Toyota de Produção, descrito anteriormente. Após a utilização deste termo, foram estudadas novas formas de administrar as organizações de acordo com o pensamento enxuto.

Em seu livro “Mentalidade Enxuta nas Empresas (*Lean Thinking*) Elimine o Desperdício e Crie Riqueza”, Womack & Jones (2004) caracterizam o pensamento enxuto como “uma forma de especificar valor, alinhar na melhor sequencia as ações que criam valor, realizar essas atividades sem interrupção toda vez que alguém as solicita e realizá-las de forma cada vez mais eficaz”. O pensamento enxuto é caracterizado como um antídoto poderoso para o desperdício (WOMACK & JONES, 2004).

Os autores afirmam que o pensamento enxuto é capaz de tornar o trabalho mais satisfatório, transformando o desperdício em valor. Ressaltam ainda que o *Lean Thinking* deve ir além da empresa e ter uma visão do todo, ou seja, o conjunto inteiro de atividades desde a concepção (matéria-prima) de um produto até sua entrega ao cliente final (produto acabado).

Para a implementação de um sistema de manufatura enxuta, é necessário saber por onde começar, o que deve ser eliminado, o que não agrega valor entre outras informações. Todas elas são esclarecidas quando os cinco passos para a implementação do pensamento enxuto, descritos por Womack & Jones (2004), são analisados com o intuito de tornar a empresa mais flexível e atender às reais necessidades dos clientes.

Cusumano (1994 apud Araújo, 2004) apresenta um conjunto de fatores que influenciam a necessidade de implementação de um sistema enxuto de produção:

- Minimização de estoques intermediários;
- Concentração geográfica da produção de componentes e montagem;
- Demanda puxada por meio do *kanban*;
- Nivelamento da produção;
- Redução do *setup*;
- Padronização do trabalho;
- Trabalhadores multifuncionais;
- Melhoria contínua do processo;
- Desenvolvimento de sistemas a prova de falhas (*poka-yoke*).

A especificação do valor é o passo inicial para a implementação do sistema de produção enxuta. As organizações, responsáveis pela criação do valor de produtos e/ ou serviços, precisam saber qual o real significado de valor para seus clientes, pois somente eles poderão determinar essa questão. Isso faz com que as empresas procurem entender cada vez mais as necessidades destes.

Crabill et al (2000 apud Menezes, 2003) afirma que “é necessário identificar e separar o que o cliente define por valor da definição dada pelas áreas funcionais e estratégicas da organização”. De acordo com Womack & Jones (2004) a definição de valor dada pelo cliente é normalmente trocada pela necessidade financeira da empresa.

As empresas japonesas têm enfatizado, em sua definição de valor, onde o valor é criado, para conseguirem repensar o valor a partir da perspectiva do cliente (WOMACK & JONES, 2004).

Segundo Womack & Jones (2004), para se determinar o valor de um produto é necessário primeiramente definir o produto que será trabalhado. Em seguida, é preciso determinar o custo-alvo com base no volume de recursos e no esforço necessário para sua fabricação, com as respectivas especificações.

De acordo com Womack & Jones (2004), a cadeia de valor, ou fluxo de valor, corresponde ao conjunto de todas as ações necessárias para se levar um produto específico a passar pelas 03 (três) tarefas gerenciais críticas em um negócio:

- 1) Tarefa de solução de problemas: engloba desde a concepção até o lançamento do produto, envolve também o projeto detalhado e a engenharia;
- 2) Tarefa de gerenciamento da informação: compreende o recebimento do pedido até a entrega, por meio de um cronograma detalhado;
- 3) Tarefa de transformação física: vai da matéria-prima ao produto acabado nas mãos do cliente.

A identificação e análise da cadeia de valor mostram que ocorrem 03 (três) tipos de atividades ao longo do processo, conforme descrito na Figura 3.12:

- a) Atividades que agregam valor;
- b) Atividades que não agregam valor, mas que são necessárias;
- c) Atividades que definitivamente não agregam valor e precisam ser eliminadas (WOMACK & JONES, 2004).

FIGURA 3.12 – Agregação de valor

(Fonte: Bouzon, 2008)

Womack & Jones (2004) afirmam também que é necessário ter uma visão do todo, ou seja, a visão do pensamento enxuto deve ir além da empresa. Ela deve partir desde a empresa que fornece a matéria-prima, passando por todo o conjunto de atividades necessário para a criação e fabricação de um produto, pelo projeto detalhado, pela programação da produção até chegar às mãos do cliente.

Em resumo, Cabrill (2000 apud Menezes, 2003), descreve que o mapeamento da cadeia de valor, ajuda a identificar os pontos onde está sendo agregado valor (sob o ponto de vista do cliente) e onde os desperdícios estão sendo consolidados.

3.2.6. Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM - Value Stream Mapping)

O Mapeamento do Fluxo de Valor ou *VSM - Value Stream Mapping* é uma ferramenta qualitativa usada para descrever em detalhes como a sua produção opera e como deveria operar para criar um fluxo de valor otimizado.

O *VSM* é a ferramenta essencial da Produção Enxuta, pois permite a visão de todo o fluxo de valor dos processos produtivos da organização. Rother & Shook (1998) afirmam que esta ferramenta é entendida como o conjunto de todas as atividades que ocorrem desde a obtenção de matéria-prima até a entrega ao consumidor do produto final.

De acordo com Rentes (2003), o *VSM* é um método simples de modelagem de empresas com um procedimento para a construção de cenários de manufatura, que leva em consideração tanto o fluxo de materiais como o fluxo de informações.

Por este motivo é considerada uma ferramenta imprescindível para o processo de visualização da situação atual da organização e construção da situação futura.

As vantagens da utilização do *VSM* são descritas por Rother & Shook (1998):

- Permite a visualização de todo o fluxo e não somente dos processos individuais;
- Ajuda na identificação das fontes dos desperdícios;
- Fornece uma linguagem comum para tratar dos processos de manufatura;
- Torna as decisões sobre o fluxo visíveis, facilitando sua discussão;
- Integra conceitos e técnicas enxutas;
- Forma a base para um plano de implementação, identificando a relação entre o fluxo de material e o fluxo de informação.

Segundo Crabill *et al.* (2000 apud Menezes, 2003), a principal utilidade do Mapeamento do Fluxo de Valor é a identificação de quando e onde o valor começa a ser acionado e onde existem desperdícios, pois ao mapear o fluxo de valor os integrantes do time se tornam mais objetivos na eliminação das perdas.

Rentes (2000 apud Araújo, 2004) afirma que o mapeamento pode servir como um catalisador na análise do processo, possibilitando o compartilhamento do conhecimento sobre o processo com todos os seus componentes; além de permitir a identificação de pontos que necessitam ser melhorados, auxiliando o trabalho em equipe na obtenção de resultados.

Pizzol & Maestrelli (2005) afirmam que o *VSM* promove a visualização do fluxo de matéria-prima, do fluxo de componente e do fluxo de informação; bem como a verificação da quantidade e frequência de abastecimento das matérias-primas e da área de armazenagem necessária.

A proposta da aplicação desta ferramenta tem como objetivo assegurar a adoção de técnicas enxutas na concepção dos produtos e reduzir o desperdício contido nos fluxos de processo, material e informação, contribuindo para a redução do lead-time, do inventário em processo e para o aumento da competitividade (PIZZOL & MAESTRELLI, 2005).

Ferro (1999 e 2003 apud Menezes, 2003) sugere que o estado futuro seja definido com base na implementação de um período de seis meses a um ano, com poucos investimentos.

É primordial ressaltar também a importância do envolvimento e comprometimento da alta administração na criação do fluxo enxuto, já que esta ferramenta é capaz de olhar para os processos de agregação de valor de forma horizontal.

Na visão de Moreira & Miguel (2005) o *VSM* não é um método para dizer como as pessoas devem realizar seu trabalho eficientemente, e sim uma sistemática de aproximação que capacita as pessoas de como planejar e quando elas deverão implementar as melhorias para atingir mais facilmente a satisfação do cliente.

O *VSM* deve ser realizado em oito etapas (MOREIRA & MIGUEL, 2005):

- 1) Comprometer-se com o conceito *lean*;
- 2) Escolha do Fluxo de Valor;
- 3) Aprender com o conceito *lean*;
- 4) Mapear o estado atual;
- 5) Identificar sistemas de medição;
- 6) Mapear o estado futuro;
- 7) Criar planos *kaizen*;
- 8) Implementar planos *kaizen*.

Ferro (2008) sugere focalizar os esforços nos fluxos de valor que tenham como núcleo o objetivo do negócio; entender claramente a situação atual; definir as metas de melhoria para as famílias de produtos; definir um consenso sobre o estado futuro e implementar um plano de ação com as responsabilidades, tarefas e metas a serem atingidas. É importante ressaltar que muitas empresas não produzem somente um tipo de determinado produto.

A maioria delas fabrica produtos diversos em quantidades e demandas diferentes.

Sendo assim, o primeiro passo para o mapeamento do fluxo de valor é definir a família de produtos que será mapeada e analisada para se aplicar as técnicas e ferramentas *lean*.

A determinação da família de produtos é importante, pois os consumidores se preocupam com produtos específicos e não com todos os itens produzidos pela empresa (LUZ & BUIAR, 2004).

Para simplificar o agrupamento de vários produtos em famílias, Womack (2001 apud Pizzol & Maestrelli, 2005) sugere a criação da matriz da família de produtos de acordo com a figura abaixo. A Figura 3.13 consiste de uma tabela que descreve a lista de produtos e os processos e/ ou equipamentos utilizados em um processamento.

		P	R	O	C	E	S	S	O
		1	2	3	4	5	6	7	8
PRODUTO	A	X	X	X		X	X		
	B	X	X	X	X	X	X		
	C	X	X	X		X	X	X	
	D				X	X		X	X
	E				X	X		X	X
	F			X		X	X	X	
	G			X	X	X		X	X

FIGURA 3.13 – Matriz da família de produtos

(Fonte: Feld, 2001)

De acordo com Rentes *et al.* (2003) para a definição da família de produtos é necessário levar em consideração alguns critérios:

- 1) Similaridade de processos: verificar o grupo de produtos que passam por etapas semelhantes de processamento e utilizam equipamentos comuns em seus processos de transformação;

2) Frequência e volume da demanda: é importante para a definição da política de atendimento à demanda:

- *Assembly-to-order (ATO)*;
- *Make-to-stock (MTS)*;
- *Make-to-order (MTO)*.

3) Tempo de ciclo do produto: referente ao tempo que o produto leva para ser processado.

Rother & Shook (1999 apud Menezes, 2003) consideram ainda que nesta etapa é necessário fazer o levantamento de dados do processo:

- Dados do cliente: demanda, necessidades etc;
- Definição dos processos mapeados: cada caixa de processo indica uma área do
- Fluxo de material;
- Número de operadores para cada processo;
- Tempo de ciclo para cada processo (T/C): equivale ao tempo necessário entre um componente e o próximo a saírem do mesmo processo;
- Tempo de troca (T/R): é o tempo para mudar a produção para o produto analisado;
- Tempo útil (T/U): é a confiabilidade da máquina/ operação;
- Turnos: quantidade de turnos em que o processo é operado;
- Disponibilidade: tempo de trabalho disponível por turno;
- Tempo de ciclo total (T/C total): equivale ao tempo que uma peça leva para ser processada mais o tempo de carga e descarga;
- Índice de rejeição: determina a quantidade de produtos defeituosos gerados pelo processo;
- Estoque: antes e depois de cada processo;

- Dados dos fornecedores: dados relacionados aos seus fornecimentos:
 - Quantidade média de estoques;
 - Frequência de pedidos e a quantidade média por pedidos;
 - Lote mínimo de requisição;
 - Fluxo de informações do departamento de compras com os fornecedores;
- Fluxo de materiais: identificação de processos puxados e empurrados;
- Estoque de produto acabado;
- Fluxo de informações: identificação de como e por quem são transmitidas as informações da produção pela planta;
- Linha do tempo: com a coleta das informações anteriores, é possível calcular o lead-time de produção de determinado produto ou família de produtos. Pode-se (e deve-se) calcular também o tempo de agregação de valor.

O segundo passo do mapeamento do fluxo de valor é determinar o gerente do fluxo que terá a responsabilidade de entender o fluxo e as melhorias necessárias. O gerente de fluxo deve ter autonomia para fazer as mudanças necessárias no processo produtivo, por isso é interessante que esta pessoa esteja ligada à autoridade máxima da unidade produtiva (SHOOK, 1999 apud LUZ & BUIAR, 2004).

Ferro (2008) afirma ainda que é preciso que o gerente de fluxo se envolva diretamente com o mapeamento, caminhe pessoalmente pelos fluxos de valor e apoie explicitamente. Para o autor isso garantirá a relevância do estado futuro à alta administração, que deverá estar familiarizada com a nova linguagem e conhecerá bem o estado atual para cobrar os resultados da implementação do estado futuro.

O próximo passo é desenhar o estado atual da cadeia de valor, que é feito a partir da coleta dos dados citados anteriormente no chão de fábrica.

Após a coleta desses dados, são mapeados os processos produtivos que fazem parte da família de produtos selecionada ou do fluxo de valor em análise.

Para Rentes et al. (2003) é necessário identificar onde se localizam os estoques e a quantidade média em número de peças e em dias, tendo como base a média de consumo. Os autores mostram que o fluxo de informações também é mapeado e inclui a programação dos processos, suas frequências, previsões e solicitações de material.

Ferro (2008) acrescenta que algumas empresas inserem informações desnecessárias aos mapas, tais como o custo dos estoques, as distâncias entre as estações de trabalho e outras que acabam somente “poluindo” o mapa que impossibilita a visão do que realmente é essencial.

O mapeamento do fluxo de valor (*VSM*) é o processo prático de documentar o fluxo da cadeia de valor, considerando todos os passos do processo de fabricação, incluindo os passos que agregam valor e os que não o agregam, a partir do recebimento do material, até a sua entrega ao cliente.

O objetivo não é produzir mapas completos e perfeitos, mas sim construir um mapa capaz de tornar possível vislumbrar claramente a mudança. Durante o mapeamento do estado atual surgem ideias sobre o estado futuro.

Na Figura 3.14 é possível observar a troca de informações e a relação existente entre o mapa atual e o mapa futuro, indicando o desenvolvimento do estado atual e o futuro que se sobrepõem.

Para Rentes et al. (2004) esta etapa é composta pelo desenho do mapa atual incluindo o desenho do mapa futuro, pois o desenvolvimento de ambos são esforços superpostos, já que as ideias do estado futuro surgem no mapeamento do mapa atual.

Por outro lado, o desenho do mapa futuro mostra informações importantes sobre o estado atual que passaram despercebidas anteriormente.

FIGURA 3.14 – Etapas do Mapeamento do Fluxo de Valor

(Fonte: Rother & Shook, 1999)

Para o *VSM* são utilizados alguns ícones sugeridos por Rother & Shook (1999) conforme descritos na Figura 3.15 abaixo.

Utilizando estes ícones juntos, os mapas completos do fluxo de valor para os estados atual e futuro podem ser criados.

Araújo (2004) ressalta que outros ícones também podem ser criados pela equipe de projeto para suas peculiaridades.

FIGURA 3.15 – Ícones para Mapeamento do Fluxo de Valor

(Fonte: Rother & Shook, 1999)

Outro componente do mapa é a linha do tempo que descreve o tempo que uma peça leva para percorrer todo o caminho do chão de fábrica. Essa linha é posicionada abaixo das caixas de processos e dos triângulos de estoque para registrar o *lead-time* de produção (ARAÚJO, 2004).

A última etapa do *VSM* é a elaboração de um plano de implementação que descreva o planejamento e as ações necessárias para se chegar ao estado futuro e colocá-lo em dia. Assim que o estado futuro se tornar realidade, ou seja, estado atual, um novo mapa deve ser desenhado. Isto significa que a cadeia de valor estará sempre em melhoria contínua e que sempre deve haver um mapa do estado futuro em implementação (RENTES *et al.*, 2004).

É considerado o tempo e esforço para desenhar o mapa atual como desperdício, a menos que se utilize esse mapa para criar e implementar um estado futuro que elimine as fontes de desperdícios e agregue valor ao cliente.

De acordo com Araújo (2004) e Menezes (2003), Rother & Shook (1999) estabelecem diretrizes que devem ser seguidas na elaboração do mapa futuro:

- 1) Produzir de acordo com o *takt-time*: o ritmo de produção deve acompanhar o ritmo das vendas;
- 2) Desenvolver um fluxo contínuo onde possível: cada item processado deve ser transferido imediatamente ao processo posterior;
- 3) Utilizar supermercados para controle da produção onde o fluxo contínuo não é possível;
- 4) Enviar a programação do cliente para somente um processo de produção: como todos os processos devem estar interligados, não é necessário enviar a programação de produção para todos eles, e sim, somente para o processo puxador que determina o ritmo de produção;
- 5) Nivelar o mix de produção: distribuição de diferentes produtos uniformemente ao longo do tempo. Esse nivelamento será importante para minimizar as diferenças entre os picos e os vales de produção além de reduzir o estoque de produtos acabados;
- 6) Nivelar o volume de produção: ajuda a tornar o fluxo de produção previsível e cria uma puxada inicial com a liberação e retirada de somente um pequeno e uniforme volume de trabalho no processo puxador. Por isso, é importante emitir ordens de produção em pequenos intervalos de tempo para que a produção não se desvie dos pedidos reais.

“Mapear todos os fluxos de valor de uma organização pode ser um exercício relevante; mas a única coisa que importa é a ação concreta na implementação dos estados futuros definidos” (FERRO, 2003 apud ARAÚJO, 2004).

Os mapas ilustrados abaixo (Figura 3.16 e Figura 3.17) representam os estados (atual e futuro) do sistema de produção de uma indústria de tanques de refrigeração, após a aplicação do *VSM*:

Mapeamento do estado atual

FIGURA 3.16 – Exemplo de mapa do estado atual

(Fonte: USP EESC/DEP)

- Produção baseada em previsão de demanda;
- Programação semanal baseada no MRP;

- Produção orientada para reposição de mercadorias:
 - Alto volume de inventário de mercadorias acabadas;
 - Excesso de mercadorias desnecessárias (não vendidas);
 - Carência de mercadorias necessárias;
 - 45 dias de *lead time* para produtos que não foram previstos;
 - 5 dias para preparação final de produtos acabados previstos e expedição.

Mapeamento do estado futuro

FIGURA 3.17 – Exemplo de mapa do estado futuro

(Fonte: USP EESC/DEP)

- Montagem final contra o pedido do cliente;
- Eliminação de inventário de produtos acabados;
- Puxar a produção dos lotes;

- Minimização de estoque intermediário;
- Produção flexível: *lead time* de 05 dias para todos os produtos;
- Administração visual das operações no chão de fábrica.

Assim, dentro da metodologia de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*), o grande desafio é aprimorar o processo de fabricação com o intuito de reduzir seus custos operacionais mantendo seu produto robusto e com alta qualidade.

Atualmente, o ciclo de vida dos produtos vem se reduzindo, provocando uma maior necessidade na redução do tempo de desenvolvimento e da implementação de melhorias e de novos processos na área de manufatura.

4. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

4.1. Introdução

A palavra automação está diretamente ligada ao controle automático, ou seja, ações que não dependem da intervenção humana. Este conceito é discutível, pois a “mão do homem” sempre será necessária, pois sem ela não seria possível a construção e implementação dos processos automáticos (SILVA, 2007).

Historicamente, o surgimento da automação está ligado com a mecanização, sendo muito antigo, remontando da época de 3500 e 3200 a.C., com a utilização da roda. O objetivo era sempre o mesmo, o de simplificar o trabalho do homem, de forma a substituir o esforço braçal por outros meios e mecanismos, liberando o tempo disponível para outros afazeres, valorizando o tempo útil para as atividades do intelecto, das artes, lazer ou simplesmente entretenimento (SILVEIRA & SANTOS, 1998). Enfim, nos tempos modernos, entende-se por automação qualquer sistema apoiado em microprocessadores que substitua o trabalho humano.

Atualmente a automação industrial é muito aplicada para melhorar a produtividade e qualidade nos processos considerados repetitivos, estando presente no dia-a-dia das empresas para apoiar conceitos de produção tais como os Sistemas Flexíveis de Manufatura e até mesmo o famoso Sistema Toyota de Produção. Sob o ponto de vista produtivo, a automação industrial pode ser dividida em três classes: a rígida, a flexível e a programável, aplicadas a grandes, médios e pequenos lotes de fabricação, respectivamente (ROSÁRIO, 2005).

Ainda segundo Rosário (2005), a automação industrial pode ser entendida como uma tecnologia integradora de 03 áreas: a eletrônica responsável pelo hardware, a mecânica na forma de dispositivos mecânicos (atuadores) e a informática responsável pelo software que irá controlar todo o sistema. Desse modo, para efetivar projetos nesta área exige-se uma grande gama de conhecimentos, impondo uma formação muito ampla e diversificada dos projetistas, ou então um trabalho de equipe muito bem coordenado com perfis interdisciplinares. Os grandes projetos neste campo envolvem uma infinidade de profissionais e os custos são suportados geralmente por grandes empresas.

Ribeiro (2001) fala que o conceito de automação varia com o ambiente e experiência da pessoa envolvida. São exemplos de automação:

- a) Para uma dona de casa, a máquina de lavar roupa ou lavar louça;
- b) Para uma pessoa, pode ser a capacidade de tirar dinheiro do caixa eletrônico;
- c) Para um empregado da indústria automobilística, pode ser um robô;

O conceito de automação inclui a idéia de usar a potência elétrica ou mecânica para acionar algum tipo de máquina. Deve acrescentar à máquina algum tipo de inteligência para que ela execute sua tarefa de modo mais eficiente e com vantagens econômicas e de segurança.

Como vantagens, a máquina:

- 1) Nunca reclama;
- 2) Nunca entra em greve;
- 3) Não pede aumento de salário;
- 4) Não precisa de férias;
- 5) Não requer mordomias.

Como nada é perfeito, a máquina tem as seguintes limitações:

- 1) Capacidade limitada de tomar decisões;
- 2) Deve ser programada ou ajustada para controlar sua operação nas condições especificadas;
- 3) Necessita de calibração periódica para garantir sua exatidão nominal;
- 4) Requer manutenção eventual para assegurar que sua precisão nominal não se degrade.

Entretanto, a automação pode reduzir a mão de obra empregada, porém ela também e ainda requer operadores. Em vez de fazer a tarefa diretamente, o operador controla a máquina que faz a tarefa. Assim, a dona de casa deve aprender a carregar a máquina de lavar roupa ou louça e deve conhecer suas limitações. Operar a máquina de lavar roupa pode inicialmente parecer mais difícil que lavar a roupa diretamente. Do mesmo modo, o operador de uma furadeira automática na indústria automobilística deve ser treinado para usar a máquina com controle numérico que faz o furo realmente. A linha de montagem com robôs requer operadores para monitorar o desempenho desses robôs. Quem tira o dinheiro do caixa eletrônico, deve possuir um cartão apropriado, decorar uma determinada senha e executar uma série de comandos no teclado ou tela de toque.

A automação é utilizada com a finalidade de trazer benefícios como: aumento da produtividade, segurança, qualidade do produto, confiabilidade, melhor relação custo benefício de investimento, substituição do homem em atividades de risco (LOPES, 2007).

Exemplos de automação na manufatura:

- Máquinas industriais;
- Linhas de produção;
- Robótica.

4.2. Conceitos e definições

Um sistema automático é composto de hardwares, interligações e sistema de comando e supervisão de diversas disciplinas. Excluindo os equipamentos dedicados a determinadas aplicações específicas e os relativos a testes laboratoriais, podem-se destacar:

FIGURA 4.1 – Estrutura de um sistema de automação

(Fonte: Rother & Shook, 1999)

- 1) Dispositivos de entrada e sensores: composto de elementos que emitem informações (sinais elétricos) ao sistema por meio de uma ação muscular, mecânica, elétrica, eletrônica ou uma combinação entre elas.

Entre esses elementos, podemos citar:

- a) Botoeiras: são chaves acionadas manualmente, constituídas por: botão, contato NA (normal aberto) ou NF (normal fechado). Quando seu botão é pressionado, invertem seus contatos, e quando este for solto, devido a ação de uma mola seus contatos voltam à posição inicial.
- b) Chaves Fim de curso: são chaves acionadas mecanicamente, por meio de um rolete mecânico, ou gatilho (rolete escamoteável), fazendo com que seus contatos sejam invertidos ao serem acionadas. Geralmente são posicionadas no decorrer do percurso de cabeçotes de máquinas, ou hastes de cilindros.
- c) Sensores de proximidade: são chaves eletrônicas que emitem um sinal ao detectar a proximidade de um objeto em esteiras, hastes de cilindros ou cabeçotes de máquinas.
- d) Sensores Indutivos: são sensores que são acionados quando um objeto metálico é aproximado, entrando em um campo eletromagnético.

- 2) Dispositivos de saída e atuadores: recebem as informações (sinais elétricos) enviadas pelo sistema, com a finalidade de auxiliar ou até mesmo realizar diretamente um trabalho elétrico, mecânico, pneumático ou hidráulico em uma máquina ou processo industrial, ou apenas a fim de realizar sinalização visual ou sonora aos operadores.

Entre esses elementos, podemos citar:

- a) Relés: são chaves composta de vários contatos, acionadas por bobinas eletromagnéticas. São utilizados para comando, sinalização e intertravamento de circuitos elétricos. Quando a bobina é energizada, os contatos NA (normal aberto) fecham e os contatos NF (normal fechado) abrem, permitindo ou interrompendo a passagem de corrente elétrica por eles.

Quando a bobina é desenergizada, uma mola retorna os contatos à posição original.

- b) Contatores: apresentam as mesmas características dos relés, porém seus contatos são dimensionados para suportarem correntes mais elevadas, permitindo assim sua utilização no acionamento direto de motores.
- c) Cilindros: também conhecidos como atuadores pneumáticos ou hidráulicos, podem ser do tipo linear, rotativo ou oscilante. Os mais comuns são os do tipo linear, que transformam a pressão do ar comprimido ou do óleo, em movimento linear e força. Os tipos de cilindros lineares mais utilizados são o de simples ação e o de dupla-ação. O cilindro de simples ação possui um único orifício pelo qual o ar ou óleo entra e sai. Ao colocarmos pressão neste cilindro ele é movimentado e ao retirarmos pressão, uma mola retorna a haste do cilindro para a posição original. Já os cilindros de dupla-ação, possuem dois orifícios pelos quais podem entrar e sair o ar ou óleo, dependendo do movimento desejado, portanto, um orifício serve para o avanço do cilindro e outro para o seu retorno. O fluxo de ar ou óleo que o cilindro recebe, é transmitido por válvulas direcionais.
- d) Válvulas direcionais: para os cilindros pneumáticos e hidráulicos trabalharem, efetuando seu avanço e recuo, é necessária a utilização de válvulas que permitam direcionar o fluxo de ar comprimido ou óleo para dentro ou para fora do cilindro. As válvulas direcionais são descritas pelo número de vias e posições que ele possui. As vias são conexões de entrada, saída e escape de ar ou óleo, e as posições são a quantidade de manobras que a válvula permite realizar, como por exemplo, uma válvula de 2 vias e 2 posições, permite ora a passagem de ar ora o bloqueio de ar da entrada para a saída.

As válvulas podem ser acionadas por comando manual, elétrico, pneumático ou mecânico. São utilizadas solenóides (bobinas eletromagnéticas) para a mudança de posição da válvula, pois tem a vantagem de ser acionada a distância e com bastante segurança e precisão.

e) Motores elétricos: são equipamentos que, quando energizados, realizam movimentos giratórios de seu eixo, que podem ser medidos em rotações por minuto (rpm). Existem motores de diversos tipos e finalidades, variando de acordo com sua forma construtiva e tipo de alimentação (tensão contínua ou alternada), consumo de corrente, etc. São utilizados para inúmeras aplicações: movimentar e acionar esteiras, elevadores, bombas, compressores, partes móveis de máquinas, extrusoras, robôs, misturadores, ventiladores, furadeiras, bem como sua utilização já bastante difundida na área de eletrodomésticos, automóveis, aviões, etc.

- 3) Sistema de controle e supervisão: equipamento que funciona como o "cérebro" do sistema de automação, recebendo as informações dos sensores e, em função delas e de acordo com parâmetros pré-definidos, transmite "ordens" aos atuadores.
- 4) IHM – Interface Homem Máquina: este tipo de equipamento, também denominado de terminal de diálogo, permite a comunicação do(s) operador(es) com a(s) máquina(s) ou processo(s) industrial, nomeado para escolher programas e alterá-los se necessário (e permitido), visualizar as variáveis mais importantes do processo, definir e alterar parâmetros, reagir a alarmes, iniciar e parar o processo, etc. Existe uma vasta gama de produtos no mercado com estas funções, desde os simples consoles (terminais industriais) alfanuméricos, até às mais evoluídas (gráficas com *touch screen*).

A importante diferença é que umas privilegiam o preço e outras a funcionalidade e interoperacionalidade com outros sistemas, com maior ou menor individualização do equipamento e outras ainda uma maior personalização. Através de um display de texto ou tela gráfica, a IHM cumpre a função de apresentar de forma inteligível o status de sinais de sensores e atuadores, válvulas, motores, valores de variáveis de processo, alarmes e indicações de falhas. E através de um teclado ou tela sensível ao toque (*touch screen*) que possibilita de forma interativa a realização dos comandos, acionamento de atuadores, alterações de *Set Points* (valores ideais determinados pelo operador), mudança de manual para automático e definição delimites de funcionamento.

4.3. Sistemas de Automação

Conforme Ribeiro (2001), a aplicação de automação nos processos industriais resultou em vários tipos de sistemas, que podem ser geralmente classificados como:

- Máquinas com controle numérico;
- Controlador lógico programável;
- Sistema automático de armazenagem e recuperação;
- Robótica;
- Sistemas flexíveis de manufatura.

1) Máquina com controle numérico: uma máquina ferramenta é uma ferramenta ou conjunto de ferramentas acionadas por potência para remover material por furo, acabamento, modelagem ou para inserir peças em um conjunto.

Uma máquina ferramenta pode ser controlada por algum dos seguintes modos:

- Controle contínuo da trajetória da ferramenta onde o trabalho é contínuo ou quase contínuo no processo.
- Controle ponto a ponto da trajetória da ferramenta onde o trabalho é feito somente em pontos discretos do conjunto.

Em qualquer caso, as três coordenadas (x, y, z ou comprimento, largura e profundidade) devem ser especificadas para posicionar a ferramenta no local correto. Programas de computador existem para calcular a coordenada e produzir furos em papel ou fita magnética que contem os dados numéricos realmente usados para controlar a máquina. A produtividade com controle numérico pode triplicar. No controle numérico, exige-se pouca habilidade do operador e um único operador pode supervisionar mais de uma máquina. Se em vez de usar uma fita para controlar a máquina, é usado um computador dedicado, então o sistema é tecnicamente chamado de máquina controlada numericamente com computador (CNC). Um centro com CNC pode selecionar de uma até vinte ferramentas e fazer várias operações diferentes, como furar, tapar, fresar, encaixar. Se o computador é usado para controlar mais de uma máquina, o sistema é chamado de máquina controlada numericamente e diretamente. A vantagem deste enfoque é a habilidade de integrar a produção de várias máquinas em um controle global de uma linha de montagem. A desvantagem é a dependência de várias máquinas debaixo de um único computador.

- 2) Controlador lógico programável (CLP): é um equipamento eletrônico, digital, micro processado, que pode:

- a) Controlar um processo ou uma máquina;
- b) Ser programado ou reprogramado rapidamente e quando necessário;
- c) Ter memória para guardar o programa.

O programa é inserido no controlador através de microcomputador, teclado numérico portátil ou programador dedicado. O controlador lógico programável varia na complexidade da operação que eles podem controlar, mas eles podem ser interfaceados com microcomputador e operados como um DNC, para aumentar sua flexibilidade. Por outro lado, eles são relativamente baratos, fáceis de projetar e instalar.

- 3) Sistema de armazenagem e recuperação de dados: atividades de armazenar e guardar peças são centralizados em torno de inventário de peças ou materiais, para posteriormente, serem usadas, embaladas ou despachadas. Em sistemas automáticos, um computador remoto controla empilhadeiras e prateleiras para receber, armazenar e recuperar itens de almoxarifado. O controle da relação é exato e os itens podem ser usados ou despachados de acordo com os dados recebidos. Por exemplo, os restaurantes da cadeia McDonald's têm um dispensa automática para armazenar batatas fritas congeladas.

- 4) Robótica: um robô é um dispositivo controlado a computador capaz de se movimentar em uma ou mais direções, fazendo uma sequência de operações. Uma máquina CNC pode ser considerada um robô, mas usualmente o uso do termo robô é restrito aos dispositivos que tenham movimentos parecidos com os dos humanos, principalmente os de braço e mão. As tarefas que os robôs fazem podem ser tarefas de usinagem, como furar, soldar, pegar e colocar, montar, inspecionar e pintar.

Os primeiros robôs eram grandes, hoje eles podem ser pequeníssimos. Quando uma tarefa é relativamente simples, repetitiva ou perigosa para um ser humano, então o robô pode ser uma escolha apropriada. Os robôs estão aumentando em inteligência, com a adição dos sentidos de visão e audição e isto permite tarefas mais complexas a serem executadas por eles.

- 5) Sistema de manufatura flexível: a incorporação de máquinas CNC, robótica e computadores em uma linha de montagem automatizada resulta no que é chamado sistema de manufatura flexível. Ele é considerado flexível por causa das muitas mudanças que podem ser feitas com relativamente pouco investimento de tempo e dinheiro. Em sua forma final, matéria prima entra em um lado e o produto acabado sai do almoxarifado em outro lado, pronto para embarque sem intervenção humana. A Figura 4.2 mostra um exemplo desse sistema de manufatura.

FIGURA 4.2 – Exemplo de sistema de manufatura flexível com robôs

(Fonte: Kuka Fanshop)

4.3.1. Robótica

De acordo com a *American Heritage Dictionary*, a robótica é a ciência ou o estudo da tecnologia associado com o projeto, fabricação, teoria e aplicação dos robôs.

Foi na Tchecoslováquia em 1921 na apresentação de uma peça de teatro que tinha como título *Rossum's Universal Robots* - R.U.R, escrita por Karel Capek que o termo robô foi inicialmente usado. “A palavra tcheca robota significa “trabalho forçado” e foi usado *Robot* no sentido de uma máquina substituir o trabalho do ser humano” (KLOC; KOSCIANSKI; PILATTI, 2009).

A complexidade dos robôs e suas aplicações requerem conhecimentos múltiplos de: engenharia (elétrica, mecânica, industrial); ciências da computação; economia e matemática.

A *Robot Institute of America* adota a seguinte definição oficial: “*Um robô é um manipulador multifuncional reprogramável projetado para movimentar materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais seguindo movimentos programados variáveis, tendo por objetivo a realização de tarefas variadas.*”

Atualmente a robótica é utilizada para designar virtualmente qualquer equipamento que opera com algum grau de autonomia, em geral controlado por computador.

Após alguns anos de desenvolvimento, a necessidade de se controlar um sistema mecânico de forma automática, passou a ser realizada por computadores, os quais executam as operações aritméticas, e a partir daí foi desenvolvido o CNC (Controle Numérico Computadorizado) para máquinas ferramenta.

Estas máquinas têm suas velocidades controladas através de um computador conectado aos motores de acionamento dos avanços e da rotação, que controla a trajetória das ferramentas de corte, conforme a geometria final desejada. Se desejarmos alterar a forma final do produto, tudo a que temos a fazer é alterar o programa do computador.

Seguindo a lógica da CNC, podemos considerar que um computador tanto pode controlar uma máquina através de todos os seus eixos, como também pode controlar vários eixos simultaneamente como se fosse um braço humano no espaço a realizar inúmeras tarefas.

O ponto chave nessa definição é a reprogramabilidade dos robôs. É, portanto, o computador que dá ao robô sua utilidade e sua adaptabilidade.

Os robôs prestam-se não apenas à substituição do ser humano, mas também, em áreas onde é impossível o trabalho do homem, tais como: exploração submarina, planetária, desmontagem de explosivos, tarefas em ambientes radioativos, etc.

Segundo Groover (1988), o braço robótico é composto pelo braço e punho. O braço consiste de elementos denominados elos, unidos por juntas de movimento relativo, onde são acoplados os acionadores para realizarem estes movimentos individualmente, dotados de capacidade sensorial, e instruídos por um sistema de controle. O braço é fixado à base por um lado e ao punho pelo outro. O punho consiste de várias juntas próximas entre si, que permitem a orientação do órgão terminal nas posições que correspondem à tarefa a ser realizada. Na extremidade do punho existe um órgão terminal (mão ou ferramenta) destinada a realizar a tarefa exigida pela aplicação.

A cinemática diz respeito ao movimento de corpos de um mecanismo robótico sem levar em consideração as forças / torques que o causam. Desde quando mecanismos robóticos são em essência projetados para movimentar-se, a cinemática é o aspecto mais fundamental do projeto, análise, controle e simulação de robôs.

A Figura 4.3 mostrada a seguir, apresenta a representação gráfica da cinemática de um robô polar de 06 eixos, com a cinemática das articulações mais comumente encontradas em mecanismos robóticos, de forma a representar a geometria de mecanismos robóticos.

FIGURA 4.3 – Braço mecânico com juntas esféricas

(Fonte: Cincinnati Milacron Corporation)

O computador guarda em sua memória um programa que detalha o curso que o braço seguirá. Quando o programa está rodando, o computador envia sinais ativando os motores que movem o braço e a carga no final dele, que é mantida sob controle pelo atuador do robô (“*end-effector*”).

Dois aspectos importantes do funcionamento de um braço mecânico correspondem ao sensoreamento do ambiente e como se realiza a programação do mesmo.

- a) Sensoreamento: para realizar certas tarefas os robôs precisam de habilidades sensoriais similares às do homem. Os modelos avançados de robôs estão equipados com sensores, mas sua capacidade ainda é limitada, assim como sua capacidade de movimentação, já que os robôs ficam fixos em um local, ou tem um espaço restrito para se mover.

b) Programação: o computador que controla o robô deve possuir as seguintes características:

- Memória para guardar os programas;
- Conexões para os controladores dos motores;
- Conexões para entrada e saída de dados e para ativar os programas operacionais;
- Unidade de comunicação controlada por um humano.

4.3.2. Porque investir em automação

Segundo a *Pollux Automation*, os processos automáticos tendem a ser muito mais rápidos e consistentes do que o processo manual, eliminando os gargalos em processos de fabricação, montagem e de inspeção. Além disso, propiciam a geração de informações em tempo real sobre a estabilidade do processo, permitindo rápidas tomadas de decisão. Com isso, aprimoram-se os controles de inventário e de produção. Componentes e produtos defeituosos que geram recalls e retornos de lotes resultam em grandes prejuízos para as empresas. Somam-se a estes elevados custos as despesas para atender os clientes insatisfeitos e também o risco de processos judiciais. Sistemas automáticos são mais eficientes e seguros, asseguram 100% da produção de forma consistente e eliminam o erro humano no processo.

Além disso, a análise de retorno do investimento deve também considerar os custos de contratação, retenção, demissão e passivos trabalhistas em um mercado com alta rotatividade de pessoas, e não apenas o valor hora do funcionário. Também entram no cálculo os custos com treinamento, curvas de aprendizado e outros custos indiretos, tal como o custo de pessoal em áreas de suporte (RH, financeiro, alimentação, segurança, saúde, supervisão).

A automação também permite reduções expressivas nos custos ligados às contratações e demissões realizadas para atender a demandas sazonais ou variáveis, além da simplificação da estrutura organizacional e da gestão de pessoas.

Outro aspecto importante está ligado à prevenção do risco de Lesão por Esforço Repetitivo (LER) em atividades de inspeção e montagem.

A *Advatec (FANUC robotics authorized integrator)* relaciona as 10 razões principais para se investir em automação:

- 1) *Integração entre a Produção Enxuta (Lean Manufacturing) e Automação é a chave para o crescimento sustentável*: identificando desperdícios e eliminando as atividades que não agregam valor ao produto, estão se tornando padrão na maioria dos ambientes de produção principal. O uso da automação com os princípios do *Lean* é o melhor investimento que os fabricantes de hoje podem fazer para eliminar os desperdícios e aumentar o crescimento e a rentabilidade;
- 2) *Aumento da flexibilidade com a robótica*: as células robotizadas do passado exigiam uma grande dose de engenharia e eram dedicadas a um único processo ou produto. Devido a isso, muitos processos de produção não tinham volume para justificar uma célula robótica. Com as inovações modernas, as células robóticas de hoje podem ser muito mais flexíveis, permitindo mais processos a serem combinados ou produtos diferentes para uma mesma célula. Uma vez programada, a célula poderá até alternar entre os processos de forma autônoma, de processamento de diferentes partes em um fluxo contínuo.

- 3) *Reduzir os custos operacionais*: o uso da robótica e automação reduz os custos diretos e indiretos de fabricação. Isso pode ajudar a identificação e justificação dos projetos olhando para ambas as aplicações e também para o impacto financeiro.
- 4) *Melhoria da qualidade e consistência*: a implementação de um processo produtivo altamente repetitivo através da robótica, gera um impacto direto sobre os custos envolvidos, reduzindo os defeitos de qualidade. O custo total da qualidade é normalmente uma das maiores perdas em uma fábrica, e uma solução robótica de qualidade elimina a variabilidade inerente dos processos controlados pelo ser humano.
- 5) *Aumento da produtividade*: uma linha robótica bem desenhada irá aumentar o rendimento da linha de produção. Os robôs de hoje são mais rápidos do que nunca, com o movimento de alta precisão e repetibilidade, juntamente com tecnologia melhorada como sistema de visão, irão permitir uma ampla gama de operações. Soluções de robótica também eliminam a variabilidade dos ciclos que muitos processos têm, por depender do fator humano.
- 6) *Redução do custo da tecnologia*: assim como o preço de eletroeletrônicos caiu, o preço de automação industrial é muito menos dispendioso do que era há 10 anos. Em algumas indústrias, a robótica pode ainda parecer fora de alcance, mas um olhar mais cuidadoso revela frequentemente soluções com um retorno financeiro (*payback*) de 18-24 meses, ou menos.

- 7) *Falta de trabalhadores qualificados*: de acordo com um relatório da Associação Nacional de Fabricantes, 80% dos executivos de fabricação, reportam uma escassez de trabalhadores qualificados. Com a iminente aposentadoria dos funcionários seniores (~50 a 65 anos) esta diferença será ainda maior.
- 8) *A competitividade é automatizar*: as melhores empresas estão atualmente investindo em automação para continuar empurrando os custos para baixo, se posicionar para ganhar mercado e aumentar a rentabilidade social.
- 9) *Facilidade de integração na menor capacidade*: freqüentemente muitas das empresas passam por períodos de calma na produção, quando tem o seu regime de produção em marcha lenta, e por isso não fazem o investimento para o futuro. Entretanto, quando sua produção aumenta, eles lutam para se ajustarem com a implementação de melhorias no exato momento em que eles precisam, para executar a plena produção requerida. O correto é utilizar o período lento para melhorar sua eficiência e capacidade, posicionar-se e planejar-se para o retorno econômico.
- 10) *Os bancos estão emprestando*: apesar do paradigma comum, os bancos estão emprestando mais para as empresas. Essas linhas de financiamento facilitam os valores em crédito para as empresas, um aumento e ajuda significativa em relação ao que era praticado no passado.

4.3.3. Aplicações da robótica na indústria

A utilização de robôs cresce de forma acelerada nos ambientes fabris, onde a parte mais visível da automação atualmente está ligada à robótica, que vindo sendo crescentemente utilizada nos diferentes setores da indústria: automobilística, aeroespacial, química, papel e celulose, petroquímica, farmacêutica, alimentícia, farmacêutica, entre outras.

Devido sua grande versatilidade, os robôs têm sido adotados maciçamente para executar funções repetitivas ou insalubres, e também para conferir flexibilidade ao processo. Essa aplicação visa principalmente, a produtividade, a qualidade, a repetibilidade e a segurança em um processo, além de estratégias industriais envolvidas no negócio.

É largamente aplicada nas mais variadas áreas de produção industrial.

Alguns exemplos de máquinas e processos possíveis de serem automatizados são listados a seguir (WIKIPEDIA, 2011):

a) Indústria automobilística

- Processos de estamparia (moldagem de chapas ao formato desejado do veículo);
- Máquinas de solda;
- Processos de pintura;

b) Indústria química

- Dosagem de produtos para misturas
- Controle de PH;
- Estações de tratamento de efluentes

c) Indústria de mineração

- Britagem de minérios
- Usinas de Pelotização
- Carregamento de vagões

d) Indústria de papel e celulose

- Corte e descascamento de madeira
- Branqueamento
- Corte e embalagem

e) Embalagens em todas as indústrias mencionadas

- Etiquetado
- Agrupado
- Lacrado
- Ensacado

f) Indústria aeronáutica

- Corte de matéria-prima (painéis)
- Usinagem e solda
- Laminação de camadas de material compósito
- Furação automática
- Rebitagem automática

A Figura 4.4 ilustra a seguir algumas aplicações realizadas por meio de robôs, tais como: manipulação, embalagem, paletização, solda e pintura.

FIGURA 4.4 – Exemplos de aplicações na indústria

(Fonte: autor)

4.4. Automação na indústria aeronáutica

Durante muito tempo em domínio quase exclusivo pela indústria automotiva.

A automação por meio de robôs está sendo cada vez mais implementada na indústria aeronáutica, tanto na aviação comercial quanto de defesa, utilizada para aplicações nos processos de furacão, fixações, pintura, revestimento e soldagem (WAURZYNIAK, 2011).

Segundo Waurzyniak (2006), as técnicas avançadas para a fabricação e montagem permitem que os fornecedores de aeronaves cumpram as metas rigorosas de custos e restrições severas de tempo para grandes programas aeroespaciais.

Cada vez mais a fabricação de produtos aeronáuticos complexos, componentes e partes, envolvem significativas funções de automação (SARH *et al.*, 2009).

As reduções de custos na fabricação de aeronaves se tornaram possíveis através do desenvolvimento de tecnologias avançadas e do uso aplicado da automação, para produzir produtos de alta qualidade, tornar o transporte aéreo mais acessível e melhorar o padrão de vida das pessoas ao redor do mundo (ZIMMERMAN, 2001).

A fabricação e montagem de uma aeronave comercial envolvem uma variedade de detalhes da parte de fabricação e montagem. A montagem da fuselagem envolve operações de rebiteagem / fixação em cinco níveis de montagem principais, desde a fabricação dos painéis e perfis até a função dos segmentos da fuselagem, conforme representado a seguir no gráfico da Figura 4.5.

FIGURA 4.5 – Níveis de montagem da fuselagem

A asa tem três níveis principais de montagem, que está compreendido em montagem dos bordos de ataque e de fuga, caixão da asa e fechamento do conjunto.

A Figura 4.6 representa a seguir os níveis de montagem.

FIGURA 4.6 – Níveis de montagem da asa

A propulsão, os sistemas de trem de pouso, interiores e vários outros sistemas como: elétricos, hidráulicos e pneumáticos são instalados para completar a aeronave estruturalmente. Em seguida os testes funcionais e operacionais são executados, o avião é pintado e vai para a rampa de voo para verificação, aceitação e a entrega ao cliente final.

As técnicas de fabricação de aeronaves estão bem desenvolvidas, os processos de fabricação e montagem seguem uma sequência definida e os parâmetros de processo para fabricação manual e automatizado são precisamente controlados.

As etapas do processo são inspecionadas e documentadas para atender os requisitos de qualidade da *FAA (Federal Aviation Administration)*, assegurando as funções de confiança dos componentes, estruturas e de sistemas, que resultam em um desempenho seguro da aeronave.

4.4.1. Fabricação de peças primárias

A fabricação automática de peças de aeronaves envolve uma variedade de técnicas de fabricação e sistemas relacionados, todos adaptados para o processamento de materiais específicos e configurações dos componentes, variando desde as ligas de alumínio e titânio até materiais epóxi de fibra de carbono, utilizando automação inteligente para produzir peças fortes e leves, a preços acessíveis e com custos competitivos.

Desde o advento da construção de estruturas metálicas, a fabricação do avião tem sido intensivamente feita por meio de usinagem, principalmente porque as formas dos materiais de partida (ex. placas, extrudados, forjados, etc.) não estavam disponíveis em formas próximas.

Para minimizar o peso de vôo do avião e garantir uma boa vida de fadiga, a maioria das superfícies metálicas é usinada para se obter a configuração final dos componentes e atingir um acabamento superficial especificado.

Uma expressão importante na indústria de usinagem aeroespacial é a razão *comprar-voar*, o que indica a relação entre o excesso de material removido durante uma operação de usinagem, em relação ao restante do material que voa no avião. Para uma média de aeronaves comerciais, esta proporção é de cerca de 8:1. O processo de usinagem geralmente emprega um cortador montado em um eixo rotativo, onde o eixo ou a peça pode ser movido em relação ao outro, através de um controle numérico (N/C), utilizando os servos-motores. A rotação do eixo pode variar de 0 a 40.000 RPM, dependendo do material. As usinagens de painéis de asas empregam fusos múltiplos com potências de até 200 HP. Máquinas ferramentas N/C comumente utilizadas dentro da indústria aeroespacial são algumas das maiores máquinas ferramentas do mundo, com tamanhos das mesas que vão até 7,3 m de largura por 82,3 m de comprimento (WATTS, 2002).

a) Máquinas para fabricação de painéis de asa

A máquina de painéis de asa mostrada na Figura 4.7 é capaz de usinar duas semi-asas simultaneamente. A placa de alumínio a partir do qual os painéis de asa são produzidos é mantida fixada na mesa por meio de vácuo. Normalmente, a superfície aerodinâmica externa da asa, conhecida como linha de sistema externa é fabricada primeiro. Depois de concluída, o painel da asa é rotacionado, o vácuo é reaplicado e a usinagem na linha de sistema interna é concluída. O lado interno do painel contém almofadas e outras características que combinam com outros componentes da estrutura da asa, com nervuras e longarinas.

Além disso, os painéis das asas são mais espessos perto da fuselagem, e vão diminuindo de espessura na direção da ponta das asas. Cortadores com face de até 1 m de diâmetro são utilizados para cobrir rapidamente a vastidão dos painéis de asa, gerando um grande volume de cavacos de alumínio, que são recolhidos por um sistema de vácuo para coleta que exigem um motor de 100HP (SARH, 2009).

A Figura 4.7 abaixo ilustra essa aplicação.

FIGURA 4.7 – Máquina Cincinnati Milacron e painel de asa usinado

(Fonte: Springer Handbook of Automation, 2009)

b) Máquinas de conformação por estiramento

A máquina mostrada na Figura 4.8 é capaz de conformar grandes contornos de painéis de fuselagem.

Os principais componentes da máquina são:

- Uma superfície da matriz para apoio e movimento da forma de estiramento (as matrizes contem a configuração final do painel e são colocados sobre a mesa) verticalmente, durante o processo de conformação por estiramento.
- Duas garras articuladas (uma de cada lado da matriz), compostas por segmentos de mandíbulas múltiplas, permitindo a articulação de cada mandíbula em torno dos eixos longitudinal e transversal, de forma a acomodar a geometria do painel conformado. Os segmentos de mandíbulas são feitos com braçadeiras hidráulicas que apertam bem as folhas metálicas antes do processo de conformação por estiramento. Durante o processo de conformação, cada mandíbula move-se longitudinalmente a partir da superfície da matriz.
- Um controle numérico computadorizado (CNC) executa os programas de conformação por estiramento ativando os componentes da máquina (SCHEY, 1987).

A Figura 4.8 ilustra a aplicação do processo de conformação de estiramento, para a fabricação de painéis de componentes aeronáuticos.

FIGURA 4.8 – Máquina de conformação por estiramento para painéis

(Fonte: Springer Handbook of Automation, 2009)

c) Usinagem química e sistemas de aparagem

A usinagem química é um processo de remoção de material, onde se utiliza a reação química para dissolver o material em determinados locais da peça, para a produção de painéis contornados com variações de espessura nas seções transversais, acomodando mudanças nas condições de carga ao longo da fuselagem.

Este processo envolve vários subsistemas:

- Tanques de tratamento galvânico para limpeza e preparação da superfície de painéis conformados por estiramento;

- Um sistema robótico de cinco graus de liberdade (DOF) robótico aplicando uma máscara na superfície do painel;
- Um sistema de pórtico robótico de cinco graus de liberdade e pogo flexível usando um laser de dióxido de carbono para corte que permite a remoção da máscara em locais determinados do painel;
- Usinagem química e tanques de tratamento galvânico para realizar a remoção de metal;
- Um sistema de pórtico robótico CNC de cinco graus de liberdade e mesa de pogo flexível para cortar e furar os painéis.

Os painéis conformados por estiramento devem ser limpos e ter a superfície preparada para a aplicação da máscara de usinagem química. Um sistema robótico sob programa de controle automático aplica a máscara de espessura definida para ambos os lados do painel, movendo um bico de pulverização ao longo dos moldes otimizados para conseguir uma cobertura homogênea de espessura da máscara e para minimizar o excesso de pulverização. Após a máscara estar suficientemente seca, os painéis são posicionados sobre a mesa de pogos (batentes) flexíveis, estabilizado-os com ventosas. A superfície do painel apontando para o exterior da aeronave é posicionado em pogos e não requer qualquer usinagem química.

O cabeçote do robô com um laser de dióxido de carbono trabalhando em cinco graus de liberdade se move em toda a superfície interna do painel e risca a máscara (corte) ao longo dos modelos (formas), para facilitar a remoção da máscara. Depois que todos os modelos padrões são cortados, os painéis são processados por meio de guias controladas por computador, com o objetivo de mover os painéis para os tanques de usinagem química.

Antes de ir para os tanques, a máscara é removida das áreas dos painéis que terão as mais finas seções transversais, conforme Figura 4.9.

FIGURA 4.9 – Processo de usinagem química

(Fonte: Springer Handbook of Automation, 2009)

Em seguida, o painel é mergulhado no tanque de usinagem química, permitindo que o hidróxido de sódio NaOH (mantido em temperaturas elevadas) reajam o suficiente com as superfícies de alumínio expostas, para alcançar a desejada seção transversal remanescente (SCHEY, 1987 & WICK, 1984).

d) Sistema para corte de peças de material compósito

- *Máquina de corte por ultrassom*: tecidos de fibra de carbono, fibra de vidro, *prepeg* (pré-impregnado), kevlar e materiais sanduiche (colmeias), podem ser cortados em vários formatos ou formas (pré-formas), antes da laminação manual. As máquinas de corte por ultrassom são controladas automaticamente por computador e executam precisamente essas tarefas,

com o mínimo de desperdício desses materiais caros, devido aos avançados programas computadorizados de *nesting*. Até dez folhas de *prepreg* podem ser cortadas ao mesmo tempo por uma lâmina de carbeto com ultrassom, que translada para cima e para baixo em torno de 30.000 movimentos por segundo, proporcionando um corte limpo. O material pré-impregnado que inclui uma lâmina suporte no filme, é puxado para fora do rolo no final da mesa da máquina de corte e estendido sobre uma mesa de borracha. Um saco descartável é então colocado sobre o material *prepreg* e qualquer ruga é suavizada. Vácuo é ligado na mesa, que puxa o saco para baixo em cima do material *prepreg* e o estabiliza durante a operação de corte.

A máquina N/C de dois eixos precisamente posiciona a lâmina de ultra-som ao longo de uma trajetória pré-programada para atingir a forma desejada. Uma vez que a operação de corte está completa, o vácuo é liberado e o saco de vácuo é removido. Em seguida, as pré-formas e os refugos (migalhas) são removidos manualmente da mesa da máquina (CAMPBELL, 2004).

FIGURA 4.10 – Máquina de corte por ultrassom de 02 eixos

(Fonte: [http://www.gfmuk.net/GFM\(UK\)Ultrasonic Knife Cutting Machines.html](http://www.gfmuk.net/GFM(UK)UltrasonicKnifeCuttingMachines.html))

- *Corte por jato d'água*: estruturas compostas de grafite-epóxi curado têm muitas fibras fortes em uma matriz mais macia, portanto apará-las com técnicas de usinagem convencional não funciona muito bem, pois o calor e a natureza abrasiva dos materiais compósitos tendem a desgastar rapidamente as ferramentas de corte e delaminar ou puxar as fibras para fora da matriz adesiva.

Os jatos abrasivos estão sendo amplamente utilizados para aparar, e em alguns casos para abrir furos nestes materiais, devido ao corte limpo, baixa remoção de fibras e pouca ou nenhuma delaminação. A maioria dos sistemas jato d'água utilizados na indústria aeroespacial são de alta pressão (60.000-87.000 PSI) com unidades abrasivas de granalha ou óxido de alumínio.

Uma máquina N/C posiciona o jato abrasivo de alta pressão perto da periferia de uma peça de material compósito que é segurada em seu contorno por uma série de cabeçotes ou pogos (batentes). O programa de computador dirige a máquina N/C em uma trajetória muito precisa e em várias velocidades de corte para aparar o excesso de material e proporcionar o acabamento na extremidade da peça (KISCH, 2006).

A Figura 4.11 mostra um modelo de máquina de corte por jato d'água utilizada em larga escala para aplicações dessa natureza.

FIGURA 4.11 – Máquina de corte por jato d'água

(Fonte: <http://www.flowwaterjet.com>)

e) Máquinas de laminação automática

- *ATL - Automated Tape Layup*: é um processo aditivo usado para a construção de grandes estruturas, através da laminação automática de fitas de material compósito *prepreg*.

É usado principalmente na indústria aeroespacial. Máquinas geralmente têm um cabeçote em pórtico com precisão em cinco eixos e que está suspenso por um trilho em cruz. O movimento da máquina e as funções do cabeçote são controlados por um computador com uma programação especializada.

O conceito da máquina de *ATL* é ilustrado na Figura 4.12.

FIGURA 4.12 – Configuração típica de máquina ATL

(Fonte: Cincinatti)

A largura da fita de *prepreg* é tipicamente maior que 03 polegadas e é adequada para contornos planos ou suaves. O cabeçote altamente especializado pode precisamente laminar qualquer número de camadas de fita adesiva de filamento composto, em qualquer orientação desejada, assegurando um consistente formato da peça, a espessura e a qualidade requerida. Uma máquina típica retira das bobinas de fornecimento, em seguida deposita 3, 6 ou 12 polegadas de fita em ferramentas de laminação planas ou de contorno suave. Os cabeçotes de laminação podem aquecer a fita antes da aplicação, e então compactar ou comprimir a fita depois que ela estiver posicionada sobre a ferramenta.

Cada camada ou camadas de fita podem ser orientadas em uma direção que aperfeiçoe as características específicas desejadas para a peça fabricada (CAMPBELL, 2004).

FIGURA 4.13 – Máquina ATL

(Fonte: *Ingersoll*)

- *AFP - Automated Fiber Placement*: é o processo automático para colocação da fibra, conforme mostrado na figura a seguir. É a combinação de duas tecnologias largamente utilizadas na indústria: o *ATL – Automated Tape Layup* e o *FW - Filament Winding* (enrolamento filamental).

O processo *AFP* é utilizado pela indústria aeroespacial para construir estruturas de circunferência largas e complexas, tais como: barris de fuselagem, dutos e vasos de pressão a partir de materiais compósitos *prepreg*.

A Figura 4.14 mostra a aplicação do processo de *AFP* para fabricação do barril da seção de fuselagem da aeronave *Airbus 350XWB*.

FIGURA 4.14 – *AFP* para fabricação de barril

(Fonte: *Airbus*)

4.4.2. Sistemas para inspeção automática de peças

A inspeção não-destrutiva (*NDI*) de sistemas de aeronaves é realizada no mais alto nível de sensibilidade, devido à criticidade dos componentes. A radiografia Raios-X é o principal método para a inspeção de componentes metálicos, especialmente soldas em tubos e dutos de titânio e inonel, bem como outras juntas soldadas aeroespaciais (WICK, 1984 & ZIMMERMAN, 2001).

A inspeção ultrassônica é método primário para compósitos poliméricos de fibra de carbono. Ambos os raios-x e ultrassom trazem benefícios em termos de qualidade e valor através da alta aplicação em sistemas automatizados. Sistemas de ultrassom têm exigido desenvolvimentos importantes na área da robótica para a taxa de inspeção e requisitos de sensibilidade, tanto para uso na produção quanto para operações de inspeção em serviços de campo (SCHEY, 1987 & WATTS, 2001).

Os sistemas automatizados de raios-X têm sido mais lentos a serem implementados, mas o progresso está sendo feito. A direção futura na inspeção de peças de aeronaves será a interpretação automatizada dos dados *NDI*, que está atualmente sendo implementado em indústrias de maior taxa de produção.

a) Sistemas de inspeção por Raios-X

A Figura 4.15 mostra um diagrama e uma fotografia de um sistema CNC de sete eixos de radiografia digital (*DR*) de soldas na fabricação da *Boeing Commercial Airplanes*, divisão em Auburn, WA, EUA.

O manipulador CNC, fonte e detector estão localizados em uma radiação. Um duto soldado complexo é posicionado pelo manipulador CNC em uma série de locais pré-programados entre a fonte de raios-x e o detector digital, como mostrado na imagem da Figura 4.15.

O inserto no canto inferior direito da Figura 4.15 mostra a imagem *DR* do display do operador. O sistema consiste em 05 grandes componentes: o controlador Siemens baseado no manipulador CNC, a fonte de raios-X, o detector digital de raios-X, o computador de controle para o manipulador CNC e o visualizador de imagens e sistema de análise.

O requisito do sistema é um indicador de sensibilidade de qualidade de imagem raios-X de 1-1T (1% da espessura da peça com furo visível da parte de 1% diâmetro da espessura da peça) na imagem radiográfica de 100% cobertura da peça. Para alcançar esta qualidade de imagem um ponto de raios-X tamanho nominal de $20\mu\text{m}$ e uma ampliação de $4,5 \times$ é usado para criar imagens com resolução maior que dez pares de linha / milímetro e melhor que 1% de sensibilidade ao contraste. A posição da solda a ser inspecionado é fundamental para alcançar a qualidade da imagem requerida e este é realizado através do controle automatizado do manipulador CNC (BOSSI et al, 2002).

A Figura 4.15 mostra abaixo essa aplicação.

FIGURA 4.15 – Sistema de radiografia robótico digital

(Fonte: *Boeing*)

b) Sistema de inspeção por Ultrassom

Para os materiais de fibra de carbono-polímero incluindo laminados, estrutura em sanduíche e colagens, o sistema de ultrassom é o método de inspeção principal e exige muitos *scanners* automatizados para acompanhar o ritmo de produção. Automação sofisticada é também necessária para lidar com geometrias de contornos complexos de grandes conjuntos de materiais compósitos.

Sistemas de varredura ultrassônica podem ser construídos em uma variedade de formas, desde pequenas unidades portáteis até grandes sistemas em pórtico.

A inspeção ultrassônica é mais comumente realizada com algum tipo de engate de água da energia ultrassônica entre o transdutor piezo-elétrico e a parte do teste.

Os métodos incluem: *imersão* onde a parte está submersa em um banho de água com o transdutor e *sistemas borbulhados*, onde os transdutores correm na superfície de uma sapata que também tem um fluxo de água e *sistemas injetor de sinais*, onde o transdutor é localizado em um bocal que atira água na peça a uma distância curta.

A inspeção ultrassônica pode usar um ou mais transdutores em uma variedade de combinações. A inspeção típica usa um transdutor de pulso do eco (PE), ou dois transdutores, cada alinhado nos lados opostos da peça, por meio de transmissão ultrassom. Para passagens elevadas utilizando sistemas automáticos, os robôs *scanners* de digitalização podem manipular matrizes de transdutores que oferecem cobertura de grandes áreas de material (WORKMAN, 2007).

A Figura 4.16 mostra uma importante aplicação desse processo, utilizada para inspeção da fuselagem dianteira do avião B787 em material compósito.

FIGURA 4.16 – Inspeção por ultrassom da fuselagem dianteira do B787

(Fonte: *Spirit aerosystems*)

4.4.3. Sistemas para montagem automática

A conversão das peças definidas para modelos digitais é um fator chave que permitiu a utilização generalizada da automação nos processos de montagem aeronáutica.

Máquinas de montagem de aeronaves são projetadas de forma personalizada para se cumprir os requisitos específicos, onde a combinação de tolerância de engenharia apertada, a necessidade de reduzir a variação da peça e envelopes de grandes volumes, orienta para máquinas grandes e caras. Apesar do alto custo inicial, o uso da automação tem sido muito bem sucedido no atendimento das necessidades para se melhorar a qualidade, reduzir os custos e melhorar a ergonomia na fabricação e montagem de aeronaves.

Os sistemas de montagem são projetados em torno de um tipo de estruturas para serem montados.

a) Sistema *C-frame*

Para painéis simples e de grandes dimensões, são utilizadas as máquinas *C-frame* para rebiteagem / fixação automática, que são montadas sobre trilhos que percorrem o comprimento da peça. Um cabeçote ferramenta suporta temporariamente o conjunto a ser montado para junto da peça, de modo a garantir o posicionamento adequado durante a instalação do prendedor permanente. O *C-frame* envolve o painel e aplica ferramentas de furação e cravação em ambos os lados do painel. O ciclo típico de instalação de um rebite envolve o posicionamento da máquina no local adequado, a sujeição (aperto) do conjunto painel / longarina, abertura do furo, inserção e compressão hidráulica do rebite e aplainação da cabeça formada. Em seguida, um sistema de visão eletrônica verifica se a cabeça aplainada do rebite atende o requisito de planicidade.

Os parafusos são aplicados em uma sequência similar, com selante aplicado antes da inserção do parafuso, as porcas instaladas e torquedadas na sequência (GEMCOR, 2009).

A Figura 4.17 ilustra esse conceito de máquina.

FIGURA 4.17 – Sistema *C-frame* para montagem de painéis

(Fonte: *Gemcor*)

b) Sistema MTGRS (*Multi Task Gantry Riveting System*)

É o sistema mais adequado para montar as conchas (seções ou barris de fuselagem) para grandes segmentos de fuselagem.

Esse sistema de rebitagem / fixação controlado por computador é usado para unir automaticamente seções ou meias fuselagens, feitas a partir de painéis individuais ao longo das junções longitudinais e radiais.

É constituído por:

- O anel externo que se desloca sobre trilhos longitudinais, levando um cabeçote chamado *End-Effector* (Efetuador) multi-funções, que se move radialmente no interior da estrutura do anel da máquina;
- Um braço robótico, movendo-se no chão no interior do anel sobre trilhos longitudinais, carregando um segundo efetuador multi-funções;
- Um dispositivo flexível para apoiar as conchas de fuselagem durante as operações de montagem;
- Controlador da máquina, executando os programas da sequencia de montagem, gerados através de um sistema de programação off-line (WICK, 1984 & SCHEY, 1987).

Esse processo já é fortemente estabelecido e de domínio na indústria aeronáutica, no tocante a montagem estrutural. Entretanto, em virtude dos grandes monumentos e integração de sistemas, seu custo ainda é elevado.

A Figura 4.18 mostra uma importante aplicação utilizada na montagem da fuselagem dianteira da aeronave *Boeing 787 Dreamliner* em material compósito, onde os reforços estruturais são montados pela máquina de rebitagem automática.

FIGURA 4.18 – Sistema *MTGRS* para montagem de seções de fuselagem

(Fonte: *Spirit Aerosystems*)

Os painéis soltos e todas as partes que compõem a meia-concha (seção de fuselagem) são fixados provisoriamente e o conjunto estabilizado em um dispositivo flexível, que se move dentro do envelope de trabalho do anel de cravação. O *end-effector* multi-funções se movimenta do lado de fora da meia-concha da fuselagem e o *end-effector* multifuncional interno realiza de forma sincronizada as operações de rebitagem / fixação através do painel. O *end-effector* externo usa um módulo de furacão, um módulo alimentador de prendedor e uma ferramenta de recalque do rebite, enquanto o outro *end-effector* utiliza uma ferramenta de sujeição e uma para instalação do rebite, ou um módulo para instalação de luvas, em caso de fixação por 02 peças. Os parâmetros de processo como a força de aperto gerado pelas buchas dos *end-effectors* interno e externo no local da furação são ajustados conforme o tipo do material (alumínio, titânio, compósitos) e rigidez.

5. MODELO DE ANÁLISE PARA AUTOMAÇÃO

5.1. Introdução

Baseado na experiência do autor, junto a linhas de fabricação de componentes de aeronaves e *benchmarking* realizado nos últimos anos em empresas ao redor do mundo que atuam no setor aeronáutico, pode-se evidenciar que na maioria dos casos, os sistemas produtivos não foram concebidos, detalhados e estabelecidos visando à automação na produção. Isso se deve ao fato da não aplicação de metodologias de projeto, durante o desenvolvimento do produto e processos, previstos para acontecer em ambiente de Engenharia Simultânea.

Por essa razão, é fácil encontrar e entender as dificuldades que são encontradas ao longo do processo produtivo, no que diz respeito aos requisitos de *layout*, ferramentais, dispositivos, fluxos produtivos, carregamento e descarregamento das peças, logística, fatores de ergonomia e segurança ocupacional, *setups* das linhas e flexibilidade, além de uma grande quantidade de mão de obra envolvida nas atividades. Essas condições que afetam o negócio da empresa, principalmente em termos de produtividade e qualidade, nos mostra que o desenvolvimento dos produtos e seus respectivos processos de fabricação, têm sido tradicionalmente elaborados, sem uma verificação cuidadosa dos requisitos necessários que possibilitem e garantam condições para a implantação de automação na manufatura.

As análises para desenvolvimento de um projeto que vise à automação na produção devem ser iniciadas durante a fase de concepção do produto, onde as definições do projeto do

produto começam a serem estudadas e em seguida, na definição dos processos de fabricação possíveis de serem aplicados no ambiente de produção, com o objetivo de assegurar os requisitos de automação especificados. Isso pode evitar o aumento dos custos com revisões e readaptações futuras e que encarecem o produto final, além da possibilidade de redução da porcentagem de automação, no caso em que se pretende viabilizar a automação em um projeto já concebido anteriormente sem provisões para esse fim.

No decorrer do desenvolvimento integrado em ambiente de Engenharia Simultânea, onde os diversos e diferentes segmentos estruturais e sistemas da aeronave são desenvolvidos, os processos de fabricação devem ser analisados, a fim de garantir que o projeto atenda todas as necessidades de automação da manufatura. Modificações posteriores no projeto dos processos podem ainda ser realizadas, porém os custos e impactos são mais elevados, além de geração de transtornos na produção.

A Figura 5.1 mostra a forma tradicional de desenvolvimento de um novo produto em relação ao desenvolvimento com foco na manufatura.

FIGURA 5.1 – Porcentagem de influência no custo de manufatura

(Fonte: Martins & Laugeni, 2010)

Pode-se notar que quando se busca uma maior participação e porcentagem da fase de projeto em desenvolvimento integrado (produto / processos) em relação às demais, é possível se obter uma redução de custo em termos de materiais, mão de obra e também de *overhead*.

Overhead são os custos excessivos para processamento e administração, seja de tempo, de materiais, de informações ou condições impeditivas para executar uma determinada tarefa, e que consequentemente pioram o desempenho organizacional.

Muitas vezes, falhas e melhorias nos processos são identificadas somente na fase de implantação do produto na linha de montagem, causando gastos inesperados para a empresa e dificultando o aprendizado da produção, além de atrasos na incorporação do novo processo na produção em série. Sendo assim, se gasta muito para corrigir todos os pontos falhos detectados na produção, antes do início do segundo produto.

A fase de projeto é a responsável pela definição das partes, componentes, segmentos estruturais e sistemas da aeronave. É nesta fase que as Engenharias de Produto e Processos trabalham simultaneamente, no intuito de desenvolver um produto viável do ponto de técnico e financeiro, além de assegurar sua competitividade no mercado global.

Para ser competitiva, a empresa precisa ter condições de concorrer com um ou mais fabricantes e fornecedores de um produto, ou serviço em um determinado mercado. Essa condição de concorrência é caracterizada pelo fato de não existir um fornecedor, ou conjunto de fornecedores, que dominem de forma absoluta o mercado. Essa capacidade de competir normalmente varia ao longo do tempo e não são raros os exemplos de empresas que perdem tal capacidade e são expulsas do mercado. A medida que crescem as vantagens competitivas (atributos do competidor que são únicos ou superiores aos demais competidores) de uma empresa, aumenta sua parcela de mercado. Assim, em uma situação normal de mercado oligopolista (com um limitado número de empresas, sendo cada uma suficientemente forte para influenciar o mercado, porém não tão forte para desprezar os competidores existentes), uma empresa só sobrevive enquanto mantém alguma vantagem competitiva sobre seus concorrentes (MARTINS & LAUGENI, 2010).

Frente à acirrada concorrência do mercado aeronáutico, é de extrema importância para as empresas fabricantes de aviões, o desenvolvimento de seus produtos e processos de fabricação em um ambiente integrado, em condições que possibilitem a implantação de automação na produção, como fator decisivo de competitividade.

Com base nas necessidades e premissas de mercado mencionadas acima, e com o objetivo em conceber um projeto (produto e processos) que contribua para as melhores condições da automação da manufatura, é de extrema importância que os conceitos da metodologia *DFX (Design for Excellence)* onde o atributo de excelência é a automação, então aqui denominado *DFA_{TM} (Design for Automation)*, sejam aplicados no desenvolvimento do projeto do produto juntamente com os requisitos de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) para os processos.

Para que a aplicação dessas metodologias seja viabilizada dentro do ambiente de desenvolvimento integrado (Engenharia Simultânea) do projeto aeronáutico, é recomendável uma efetiva exploração dos princípios e conceitos dessas metodologias, em concordância com as variáveis e necessidades específicas desse setor da indústria. Além disso, é necessária uma participação efetiva da Engenharia de Manufatura desde o início do desenvolvimento do produto, até a implantação na produção.

Segundo Prasad (1996), a Engenharia Simultânea representa a capacidade que uma organização tem para realizar o desenvolvimento do produto em uma série de fases que se sobrepõem e que oferece produto no tempo certo e proporciona a satisfação do cliente a um preço justo.

A Figura 5.2 representa as fases de desenvolvimento integrado do produto (*DIP*) em ambiente de Engenharia Simultânea, mostrando os momentos adequados para a aplicação das metodologias de projeto (*DFX* e *Lean Manufacturing*), com o foco na implantação de automação na produção.

FIGURA 5.2 – Aplicação das metodologias no ambiente de DIP

O momento mais indicado e apropriado para a aplicação da metodologia DFA_{TM} (*Design for Automation*) é durante a fase do projeto do produto, onde os atributos da metodologia *DFX* visando automação são explorados. A fase de concepção do produto é tão importante quanto à fase de desenvolvimento dos processos para fabricação, onde realmente tornam-se efetivas as definições dos métodos e as condições de manufatura, em função dos requisitos de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*).

5.2. Fatos e evidências relevantes

Conforme Martins & Laugeni (2010), toda empresa existe para produzir um produto ou serviço final que tenha valor para o consumidor. Assim, obter esse diferencial na fabricação ou na prestação de um serviço constitui o objetivo das operações da empresa.

No estabelecimento de uma estratégia de manufatura ou de operações, para ser mais abrangente, devem ser analisados e formulados objetivos e diretrizes quanto a:

- Custos;
- Qualidade;
- Prazos de entrega;
- Flexibilidade;
- Inovação;
- Produtividade;
- Tecnologia.

Nota-se que toda empresa tem um produto ou serviço que deve atender às necessidades de seus consumidores ou clientes. Seu sucesso estará diretamente relacionado à sua capacidade de satisfazer e até mesmo suplantando as expectativas de seus clientes. Dessa forma, o projeto de seu produto, seja um bem tangível ou um serviço, adquire alta relevância no mundo atual. O projeto do produto passa a ser um elemento básico de vantagem competitiva, podendo ser diferenciado quanto a seu custo, com menor número de peças, mais padronização, modularidade, qualidade, robustez e inexistência de falhas (MARTINS & LAUGENI, 2010).

Portanto, desenvolver novos produtos é um desafio constante no mundo em que vivemos. Todos os produtos devem ser funcionais, de fácil utilização, com aspectos ergonômicos envolvidos, ter estética, ser compatível com as preocupações de preservação do meio ambiente, e seu projeto ser apoiado em tecnologia conhecida e ter contado com a colaboração de equipes multidisciplinares, no sentido de ser facilmente fabricado e montado.

Um bom projeto deve levar em consideração as seguintes técnicas:

- *Design for Manufacturing (DFM)* – Facilidade de fabricação;
- *Design for Assembly (DFA)* – Facilidade de montagem;
- *Design for Disassembly (DFD)* – Facilidade de desmontagem;
- *Design for Environment (DFE)* – Facilidade para o meio ambiente.

Além das técnicas acima mencionadas, o *Design for Automation (DFA_{TM})* aqui destacado e a Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) quando aplicadas em conjunto, podem contribuir significativamente para a busca da excelência no ambiente da indústria aeronáutica.

Problemas relacionados com os requisitos para automação da produção que não forem corretamente atendidos durante as fases de projeto serão identificados e reportados durante a fabricação do primeiro produto. Caso isso ocorra, imediatamente a realimentação deverá ser feita, de forma a possibilitar a correção dos fatores afetados e incorporação rápida da modificação na linha de produção, visando solucionar os problemas no menor tempo possível. Nem sempre será possível uma correção simples e de baixo custo, pois alguns requisitos são de complexidade extremamente alta, como por exemplo, um ferramental de montagem de asas, que muitas vezes poderá implicar em inviabilidade técnica ou financeira da solução de automação.

Baseado em evidências de projetos, onde os produtos e seus respectivos processos não foram concebidos com foco em automação e também nas variáveis técnicas que dificultam ou até mesmo não permitem a implantação de automação na montagem, foi possível identificar casos de problemas críticos que geram impactos significativos na montagem dos segmentos e partes estruturais dos aviões.

Sendo assim, exemplos de problemas foram reportados e analisados de modo a caracterizar a natureza de cada causa e em seguida, relacionados conforme o tipo de impacto gerado à produção.

Entende-se que a dificuldade de operação na linha de produção é decorrência de falhas que deveriam ter sido detectadas com a aplicação eficaz das metodologias *DFA_{TM}* (*Design for Automation*) e Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) durante o desenvolvimento do projeto.

Verificou-se que os problemas encontrados ocorreram em virtude da falta de análises baseadas nos requisitos necessários para automação.

As discrepâncias mais frequentes foram:

- Características e peso do material do produto;
- Geometria e quantidade de ferramental agregado;
- Tipos e quantidades de fixadores utilizados no produto;
- Forma de indexação do produto ao longo do processo;
- Dificuldades de movimentação do produto no fluxo produtivo;
- Arranjo físico não otimizado no menor espaço;
- Dificuldades nas tarefas de manutenção;
- Falta de provisão para atender aumento de demanda;
- Riscos de segurança e manuseio do produto.

A fase de processamento do primeiro produto é também uma fase para treinamento dos operadores na solução, na qual o processo automático, bem como as particularidades do novo processo é aprendido pelas pessoas que irão trabalhar na produção em série do produto em questão. Deste modo, é também esperado que ocorram pequenos problemas devido à “falta” de treinamento e experiência das pessoas, até que a cadência de produção entre em regime. Outro fator considerado é a questão do abastecimento de peças e materiais de consumo necessários para a operação, como por exemplo, ferramentas de corte. Observou-se em alguns casos que a ferramenta de corte desenvolvida não atendia as especificações técnicas descritas para o processo.

Para garantir o atendimento aos requisitos, bem como as melhores condições de operação e desempenho das máquinas, foram necessários novos desenvolvimentos integrados com o equipamento, baseado em testes e avaliação dos parâmetros do processo.

A Tabela 5.1 mostra alguns exemplos de problemas encontrados na fabricação do 1º produto (estrutura da asa de um avião comercial), processado por meio de robô de furacão. A quantidade total de homens-hora na solução dos problemas em tempo hábil na linha de produção foi substancial. O tempo de ciclo para resolução dos problemas detectados na produção engloba desde a elaboração dos programas, *setup* da máquina, testes e validação em corpos de prova, análises dos resultados obtidos, primeiras operações produtivas, treinamento das pessoas envolvidas, análise de falhas (*troubleshooting*), correções no processo e definição da solução, até a produção do produto conforme os requisitos de qualidade especificados.

TABELA 5.1 – Exemplo dos problemas de DFA_{TM} – *Design for Automation*

PROBLEMA	CAUSA	EFEITO
<i>Dificuldade de acesso do efetuador do robô junto à região de furação próxima à raiz da asa.</i>	<i><u>Projeto (Acessibilidade)</u> – falta de análise de interface entre gabarito (ferramental) e robô.</i>	<i>Diminuição da porcentagem de automação na montagem.</i>
<i>Esforço físico do operador para carregamento das peças no ferramental (gabarito).</i>	<i><u>Projeto (Ergonomia)</u> – falta de recurso para possibilitar o abastecimento automático de peças.</i>	<i>Existência de atividades manuais e situações de difícil operação para o operador.</i>
<i>Célula de produção não atende um aumento na demanda de produção.</i>	<i><u>Processo (Desempenho)</u> - falta de provisão para aumento na carga produtiva da célula.</i>	<i>Necessidade de duplicação do recurso produtivo.</i>
<i>Refluxo do produto na linha de produção durante a operação.</i>	<i><u>Processo (Layout)</u> – falta de análises dos tempos de ciclos e dos fluxos produtivos.</i>	<i>Aumento dos ciclos produtivos e taxa de ocupação dos equipamentos.</i>

Os exemplos acima nos permitiram constatar casos que poderiam ter sido evitados, ou ao menos percebidos durante o desenvolvimento do projeto, se os requisitos das metodologias *DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing* tivessem sido efetivamente aplicados em estágios anteriores, durante a concepção do produto e desenvolvimento dos processos.

Na linha de produção, a maioria dos problemas identificados está relacionada com falhas evitáveis ou previsíveis por meio da aplicação das metodologias.

Outro aspecto importante que foi verificado foi a diminuição das ocorrências de discrepâncias dessas naturezas durante o desenvolvimento de um novo segmento ou produto similar a outro já em fabricação, visto que na maioria das vezes, foi possível extrair as “lições aprendidas” do projeto concebido anteriormente, de modo que o novo projeto fosse melhorado e as falhas detectadas em tempo hábil.

Nota-se mais uma vez que a maior parte dos problemas analisados ocorreu logo durante a fabricação do primeiro produto da série. Isto permite acreditar que estes casos, decorrentes de falhas tão evidentes e com implicações negativas tão óbvias, poderiam ter sido facilmente detectados antecipadamente nas fases de desenvolvimento.

É certo que outros casos apareceram, porém, em sua maioria, foram problemas e discrepâncias menos evidentes e decorrentes de fatores humanos, como erros de programação, falta de treinamentos em tempo hábil, inexperiência e falta de familiaridade com o processo automático, mas que naturalmente apresentaram tendência decrescente no decorrer do plano de produção do produto.

É importante ainda frisar que todas as dificuldades e falhas encontradas durante a fabricação do primeiro produto, devem ser solucionadas antes do início da produção em série, ou seja, corrigidos durante a fase de desenvolvimento e testes do novo processo, visto que a área produtiva não poderá contar atrasos decorrentes de horas gastas com atividades de desenvolvimento de engenharia.

Entretanto, não se pode negar que os custos para correção e solução das variáveis discrepantes encontradas no projeto durante a fabricação, é muito maior do que quando analisados e simulados antecipadamente e cuidadosamente durante as fases de prospecção, desenvolvimento e implementação do projeto.

5.3. Aplicação de metodologias no ambiente de Engenharia Simultânea

Tradicionalmente, a indústria aeroespacial se via como um setor de mercados muito especializados, materiais e processos com mão de obra intensiva, que não se davam a uma produção de alto volume, como o setor automotivo. Agora, a mudança está na mão com alta precisão, técnicas automatizadas sendo desenvolvidas para lidar com tarefas repetitivas e desajeitadas, buscando a redução de custos e aumento da competitividade (BRIAN, 2005).

Segundo Calabrese (1995), automação é uma antiga palavra no jargão econômico, mas seu sentido e alcance mudaram recentemente e radicalmente com a automação rígida sendo substituída por uma forma nova e flexível de automatizar o processo de produção. Ela tem sido utilizada pelas empresas como um dispositivo de competitividade, para criar uma nova forma de competição tecnológica, não baseada somente no preço.

Frente ao cenário de competitividade global no mercado aeronáutico, as necessidades de aplicação das metodologias *DFA_{TM}* (*Design for Automation*) em conjunto com os conceitos de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) no desenvolvimento do produto e processos da manufatura, tem se tornado cada vez mais necessário para possibilitar a atratividade, competitividade e perpetuidade das empresas fabricantes de aeronaves.

Os fatores relevantes e positivos quando essas metodologias são associadas e aplicadas em conjunto, bem como as razões que justificam e viabilizam a aplicação no desenvolvimento integrado de projeto, podem ser descritos abaixo:

- Projeto do produto conforme tendências tecnológicas;
- Projeto do produto que facilite a implantação de automação;
- Processos de manufatura que auxiliem a automação;
- Agregação de valor nos processos de manufatura;
- Redução / eliminação dos possíveis desperdícios;
- Otimização do arranjo físico do ambiente produtivo;
- Melhoria nas movimentações e fluxos;
- Inovação tecnológica;
- Aumento da competitividade.

Esses fatores contribuem para o aumento da competitividade das empresas fabricantes de aeronaves frente a seus concorrentes, tem como objetivo principal a redução dos ciclos de produção, na busca incessante do aumento de produtividade, melhoria da qualidade agregada ao produto final, aumento da padronização e robustez dos processos, favorecimento das condições humanas, inovação tecnológica e satisfação dos clientes.

Durante o desenvolvimento de um novo produto, uma técnica cada vez mais presente é a Engenharia Simultânea, também conhecida como Engenharia Concorrente (*Concurrent Engineering*), em que o termo concorrente significa aquilo que ocorre ao mesmo tempo. A utilização da Engenharia Simultânea traz uma série de vantagens, como a redução do período gasto para o lançamento do produto (*time-to-market*), pois várias atividades são desenvolvidas simultaneamente. A qualidade é melhorada, já que todos os envolvidos contribuíram para o projeto. As chances de sucesso no mercado são maiores, pois os possíveis clientes foram previamente consultados. Muitas das vantagens obtidas pelos fabricantes japoneses, em relação aos americanos e europeus, devem-se à aplicação efetiva da Engenharia Simultânea (WOMACK, 1992).

Nevins & Whitney (1989) dizem que a forma convencional de projetar, dificulta a comunicação e coordenação das atividades, o que pode ser evitado através de uma abordagem integrada entre o produto-processo. Essa integração permite aos engenheiros de produção, projeto, compras, ferramental, etc., a oportunidade de trabalharem juntos, simultaneamente, para que o projeto resultante represente uma rede interconectada de decisões. Portanto, o projeto integrado é definido como o esforço de desenvolvimento coordenado em tempo e conteúdo, das várias disciplinas e funções organizacionais que abrangem o ciclo de vida de novos produtos e serviços.

O projeto integrado pode promover uma melhor compreensão do cliente e do mercado, em duas maneiras importantes. Em primeiro lugar, as necessidades do mercado e capacidades são avaliadas simultaneamente, ao invés de ser filtrada por representantes das diferentes fases (SOUDER & PADMANABHAN, 1989). Em segundo lugar, a qualidade do produto entregue (conformidade em relação às especificações e satisfação das necessidades dos clientes) é potencialmente bastante elevada, porque a aspiração e a realidade podem ser trazidas juntamente durante o ambiente de desenvolvimento integrado.

Segundo Von Hippel (1988), o cliente e fornecedor são partes do projeto integrado.

As abordagens de projeto integrado em ambiente de Engenharia Simultânea podem reduzir significativamente a incerteza informações de mercado e complexidade da tarefa, para facilitar o gerenciamento do projeto e lançamento do produto. Portanto, argumenta-se que por integração de *marketing*, pesquisas, desenvolvimento e fabricação, as necessidades do cliente são mais bem integradas de desenvolvimento, o que por sua vez promove o sucesso comercial de novos produtos (ETTLIE & JOHNSON, 1994),

Assim, conclui-se que uma ferramenta ideal para a aplicação em conjunto das metodologias *DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing* no ambiente de desenvolvimento integrado do produto da indústria aeronáutica é aquela que, além das funções apresentadas, também atenda:

Os seguintes requisitos:

- Modelo específico para as exigências da indústria aeronáutica;
- Esteja em acordo com as estratégias definidas pela empresa;
- Esteja em concordância com as tendências do mercado;
- Aplica o *DFA_{TM}* e *Lean* conforme com as estratégias e mercado;
- Auxilie nas tomadas de decisões estratégicas;
- Serve de modelo padrão para os engenheiros.

A estrutura abaixo (Figura 5.3) mostra relação entre as metodologias *DFX / DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing* aplicadas dentro do desenvolvimento do projeto (produto e processos), em ambiente de Engenharia Simultânea.

FIGURA 5.3 – Interação das metodologias de projeto no ambiente DIP

As evidências apresentadas até aqui nos mostraram que as metodologias DFX / $DFATM$ e *Lean Manufacturing* devem ser utilizadas em conjunto durante o desenvolvimento do projeto aeronáutico, onde a concepção do produto e a definição dos processos de fabricação se realizam de forma conjunta, relacionando-se intensamente para obter a melhor viabilidade técnica / financeira possível, no intuito de atender as especificações técnicas do produto conforme as exigências do mercado consumidor.

5.4. Motivação para o desenvolvimento de um modelo de análise

Levando em consideração as informações contidas nos dados reportados nos capítulos anteriores, baseado nas referências e citações descritas até aqui, a implantação de automação na produção permite a obtenção de ganhos tangíveis e intangíveis relevantes para a estratégia e competitividade da organização, apesar de algumas vezes ainda existir certa resistência humana para implantação de conceitos novos e desconhecidos.

Podem-se relacionar abaixo alguns exemplos de ganhos obtidos com a implantação de processos automáticos na manufatura:

Tangíveis:

- Redução de mão de obra direta → aumento de produtividade;
- Eliminação de custos com não qualidade e correção de defeitos;
- Redução de desperdícios com material de consumo e sobras;
- Custos evitados com manutenção de gabaritos e ferramentais;
- Redução de custo com gastos em manutenção de máquinas manuais;
- Redução de custos com capacitação e giro da mão de obra.

Intangíveis:

- Eliminação de riscos e custos ocupacionais;
- Ousadia, inovação tecnológica e aumento de competitividade;
- Aumento da repetibilidade do processo → melhoria de qualidade;
- Padronização dos processos existentes;
- Flexibilidade em suportar aumento de cadência;
- Estratégia industrial.

Quando um sistema de automação é implantado em um ambiente fabril, isto significa que são aplicados os conceitos do sistema de produção automática, para que uma empresa de manufatura possa atingir os objetivos de desempenho no ambiente de mercado de hoje. Para sobreviver nesse tipo de mercado, flexibilidade e produtividade são muito importantes. Uma produção com alta produtividade pode produzir um produto de boa qualidade com um custo competitivo. Para tal situação, a automação flexível deve ser enfatizada, pois a variabilidade dos trabalhadores, tais como: o número necessário e as habilidades disponíveis, serão muito elevados e os gestores terão que ajustar a capacidade da fábrica dinamicamente.

Sendo assim é extremamente importante à realização das análises de viabilidade econômica financeira, tomando como base os ganhos com redução de mão de obra, ciclos e homem-hora, redução da não qualidade do produto, melhoria dos requisitos de segurança ocupacional e ergonomia, diminuição dos custos com manutenção, otimização e melhoria do layout, redução / eliminação do *WIP (Work In Process)*, redução com materiais de consumo, padronização, entre outros, além de inovação tecnológica e aumento da competitividade.

A Figura 5.4 mostra um exemplo de estudo de análise de viabilidade econômica realizado para um investimento de US\$ 3000 K em automação para a produção de fuselagens.

Ganhos anuais (em K de US\$)		
Fatores	Recorrentes	Não Recorrentes
Redução de mão de obra (produtividade)	812	
Melhoria da qualidade do produto	260	
Redução com desperdícios e sobras de material	122	
Custo com manutenção de máquinas manuais	115	
Redução de WIP (<i>work in process</i>)	67	
Meio Ambiente, Saúde e Segurança Ocupacional	25	
Custo evitado com aquisição de novos gabaritos		250
Custo evitado com giro de mão de obra (contratação)		203
Total dos ganhos	1401	453
Investimentos em automação	3000	
Payback (anos)	1.8	

FIGURA 5.4 – Modelo de análise de viabilidade econômica

O exemplo em questão mostra que foram relacionados todos os potenciais ganhos possíveis de serem obtidos com a implantação desse sistema de automação.

Para realização dessa análise, foram consideradas as seguintes premissas:

- Redução de 08 pessoas: de: 10 para: 02
- Taxa hora de produção: US\$ 60
- Horas mensais trabalhadas: 140
- Investimento previsto: US\$ 3.000.000

Com base nesse estudo, certifica-se que o investimento é viável economicamente, pois além de trazer ganhos mensuráveis e também referentes à inovação tecnológica, o investimento se paga em 1,8 anos após sua implantação no ambiente fabril.

É importante salientar que os potenciais ganhos intangíveis (não mensuráveis) tais como: padronização, atualização tecnológica, etc., não foram evidenciados nesse momento.

Entende-se então que, com uma boa prospecção tecnológica, estudos técnicos bem detalhados e sob uma análise de viabilidade bem elaborada, é possível a implantação de um sistema automático flexível, robusto e inovador, que trará inúmeros ganhos e colocará a empresa em posição de destaque e de vantagem competitividade no mercado.

Analisando os projetos das linhas de produção de empresas fabricantes de segmentos e peças de aviões de diversos modelos, baseado em estudos, artigos, revistas de aviação, dados reportados, visitas técnicas realizadas e *benchmarking*, foi evidenciado que na maioria dos casos, o desenvolvimento do projeto no tocante ao produto / processos, não foi realizado visando à automação, o que ainda representa uma porcentagem de automação muito pequena e tímida, quando comparado com a indústria automobilística.

Isso se dá pelo fato do tradicional processo de montagem aeronáutica requerer uma grande quantidade de mão de obra especializada (manual) e principalmente pelo fato das soluções tecnológicas inovadoras aplicáveis nesse setor da indústria estar sendo desenvolvidas e disponíveis para o mercado recentemente.

Visando facilitar a aplicação dos conceitos de $DFATM$ (*Design for Automation*) e Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) no ambiente da indústria aeronáutica, com o objetivo de facilitar a implantação de automação na manufatura, foi desenvolvida uma ferramenta simples, em forma de fluxogramas, com os critérios necessários para análise dos requisitos mais importantes a serem analisados e explorados para desenvolvimento do projeto e que servisse como guia durante o desenvolvimento do projeto, com foco em automação da manufatura. A ferramenta (modelo de análise) criada pode ainda ser utilizada como instrumento padrão dos métodos de trabalho a serem seguidos, como um guia detalhado dos requisitos fundamentais para desenvolvimento do produto e processos, que facilite a incorporação de sistemas automáticos na manufatura e que esteja em sintonia com as estratégias corporativas e de mercado, visando aumento de competitividade da empresa.

5.5. Modelo de análise proposto

O modelo de análise proposto, desenvolvido e apresentado neste trabalho tem como objetivo auxiliar a implantação de automação no ambiente da indústria aeronáutica, servindo como ferramenta de auxílio para aumento de competitividade das empresas desse ramo.

Com base nas 03 fases principais de implantação de um projeto de automação, citadas abaixo, o modelo de análise proposto deverá ser aplicado somente nas 02 primeiras etapas:

1. Concepção do projeto do produto:

Determinam-se os objetivos do produto, isto é, qual será sua função, suas características básicas, seus materiais, demais insumos e fontes de suprimentos, os ferramentas necessários para fabricação, que mercados específicos deverá atender, quanto irá custar, vantagens e desvantagens em relação a seus concorrentes, etc.;

2. Desenvolvimento dos métodos e processos:

Define-se como o produto será fabricado e montado, os métodos, equipamentos e máquinas que serão utilizadas na manufatura, suas folhas de processos, lista de materiais, projeto do *layout*, etc.;

3. Implantação na manufatura:

É nessa etapa que se inicia a o processo de fabricação do produto por meio do sistema automático desenvolvido. Acontece a realização dos testes iniciais e as avaliações de desempenho do sistema, até a entrada em regime de produção.

É importante salientar que o processo de introdução de novo projeto, pode melhorar a competitividade da organização através das tomadas de decisões nas fases 01 e 02 acima descritas, pois os critérios mais importantes a serem analisados em cada uma dessas etapas são discutidos, analisados e detalhados em ambiente de Engenharia Simultânea.

É dentro desse contexto de desenvolvimento integrado que os requisitos específicos das metodologias de projeto, tanto a de produto que é o *DFA_{TM}* (*Design for Automation*), quanto à de produção que é a Produção Enxuta (*Lean*) são aplicados em conjunto.

A Figura 5.5 representa as etapas do modelo de análise, mostrando as fases em que as metodologias devem ser aplicadas.

FIGURA 5.5 – Etapas do modelo de análise para automação

No ambiente de Engenharia Simultânea, é o possível o desenvolvimento de uma automação inteligente e viável dos pontos de vista técnico e financeiro, onde tanto o produto quanto os processos, já podem nascer provisionadas para esse fim. O objetivo é alcançar uma manufatura fácil e simples, com a maior quantidade de automação possível, além de proporcionar uma qualidade intrínseca ao produto, eliminação de desperdícios (produção enxuta) e a maior quantidade de valor agregado possível.

É importante salientar que a *Modelo de Análise para Automação da Manufatura* é uma ferramenta desenvolvida principalmente para o projeto do produto e dos processos, que visa sanar as dificuldades encontradas durante a montagem dos segmentos de aeronaves.

Esta é a etapa da produção que demanda uma grande quantidade de mão de obra e o prazo de entrega geralmente é curto. Contudo, devido ao fato de utilizar os princípios básicos do *DFA_{TM}* e *Lean*, o modelo de análise pode também ser aplicado em outras operações de fabricação, como, por exemplo, peças primárias (usinados, estampados, tubos e compósitos).

Sendo assim, e considerando a aplicação efetiva dessa ferramenta nas fases do projeto citadas acima, espera-se que bons resultados também sejam observados em termos de retorno financeiro anual (*payback*), inovação tecnológica e competitividade da empresa.

Conforme o *PMI – Project Management Institute* (Instituto de Administração de Projetos), todo projeto possui um prazo limitado, com data estipulada para início e conclusão, além de recursos próprios incluindo financeiros e humanos. Podem ser de longos prazos e que exijam grandes recursos financeiros e materiais, altos níveis de habilidade técnica e científica e estruturas de administração complexas. Sendo assim, é importante que o desenvolvimento integrado busque sempre uma boa gestão para o projeto, uma liderança técnica, motivada, aplicada e disciplinada, juntamente com uma equipe multidisciplinar engajada e experiente. Esses são os ingredientes vitais para um bom planejamento, controle das atividades dentro de cada uma das fases e posterior sucesso do projeto.

Para cada uma das fases do desenvolvimento de um novo projeto, foram definidas e pré-estabelecidas tarefas de análise que devem ser realizadas e concluídas antes de se iniciar a próxima etapa dentro de cada fase. É neste momento que se deve iniciar a aplicação das regras e princípios das metodologias *DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing*, visando à busca da automação nos processos produtivos, de modo que se alcance as melhores definições para o produto e também a otimização de seus respectivos métodos e processos.

Essa tratativa vai definir um desenvolvimento robusto para o projeto, assegurando a melhor viabilidade em termos técnicos, econômicos, estratégicos e competitivos junto ao mercado.

Segue abaixo as tarefas definidas para serem realizadas em cada uma das fases do desenvolvimento do projeto:

1. Projeto do Produto:

- Definição dos materiais a serem utilizados;
- Otimização do peso do produto;
- Ferramentais a serem utilizados;
- Determinação dos tipos dos fixadores;
- Pontos de indexação para fabricação.

2. Métodos e Processos:

- Fluxo do produto ao longo da linha;
- Projeto do *layout* para a produção;
- Favorecimento às tarefas de manutenção;
- Flexibilidade da solução escolhida;
- Fatores de ergonomia.

3. Implantação na manufatura

- Testes iniciais e produção piloto;
- Validação e aceitação final.

As tarefas contidas em cada uma das fases mencionadas acima foram definidas com base nos critérios mais relevantes para o projeto em termos de produtividade e qualidade, dificuldades encontradas com maior frequência em todo início de produção com processo automático, além de experiências práticas adquiridas pelo autor em outros projetos.

É importante também frisar a relevância das questões estratégicas e de mercado.

É claro que muitos requisitos do *DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing* são genéricos para qualquer tipo de produto e outros mais específicos, pelo fato de serem metodologias de projeto padrão. Portanto, para aplicação específica dentro da indústria aeronáutica, procurou-se extrair e aplicar as regras voltadas para a fabricação de aviões, de modo que pudesse agregar maior valor e contribuir satisfatoriamente no desenvolvimento do projeto, facilitando a implementação de automação na manufatura.

Baseado nisso, foi possível a elaboração de uma estrutura detalhada com as ligações entre as fases do desenvolvimento do projeto, mencionando as metodologias aplicadas em cada uma das 02 fases (produto e processos) em ambiente de engenharia simultânea e os potenciais ganhos com o uso do modelo de análise proposto para automação na manufatura.

O modelo destaca 10 tópicos (05 de produto + 05 de processos) que se desdobram em vários requisitos específicos para análises, focados em implementar um projeto que permita o maior nível possível de automação na manufatura, em consonância com a incorporação dos princípios de produção enxuta.

As análises devem ser feitas durante o desenvolvimento do sistema produtivo antes da implementação na linha de produção. É importante frisar que as validações são realizadas por meio de sistemas computacionais (*softwares*) que permitem simulações de conceitos, *layout*, movimentações, produtividade, desempenho de máquinas, acessibilidade, carga e capacidade, fluxos e ergonomia do sistema produtivo, etc.

A Figura 5.6 é chamada de estrutura de realimentação (*feedback*) sistêmico do modelo de análise proposto, que representa os elos entre as fases de desenvolvimento, as ferramentas aplicadas, os tópicos e requisitos a serem explorados durante o desenvolvimento do projeto.

FIGURA 5.6 – Estrutura de realimentação (feedback) sistêmico do modelo de análise

Pode-se observar que cada uma das 02 fases de desenvolvimento representadas acima, possuem seus respectivos critérios para realização das tarefas de análise, a serem realizadas durante o desenvolvimento integrado do projeto em ambiente de Engenharia Simultânea. Essas tarefas foram definidas por estarem fortemente relacionados com a natureza das causas mais comuns que geram impacto direto nas atividades da manufatura, tarefas de manutenção e operação dos sistemas automáticos, além dos fatores externos de influência do mercado. Essa definição levou também em consideração todo o histórico dos problemas mais frequentes reportados em projetos anteriores, que ainda estão em operação, mas que sempre requerem ajustes e melhorias em virtude de falhas nas análises ocorridas durante a fase de desenvolvimento do projeto.

Com base na definição dos critérios para realização das análises, dentro de cada uma das fases, foi desenvolvido um modelo que permitisse a aplicação das regras e requisitos das metodologias *DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing* orientado especificamente para esse segmento da indústria. Essa contribuição contou também com uma base sustentável de conceitos técnicos, estudos e experiências práticas adquiridas pelo autor.

Esse modelo aqui denominado *Modelo de Análise para Automação da Manufatura* é compreendido em 03 etapas, duas (2) onde as metodologias *DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing* são aplicadas em ambiente de Engenharia Simultânea e uma (1) em ambiente de produção durante a fase de implantação, para testes iniciais, produção piloto e validação final. A aplicação efetiva do modelo se dá nas fases 01 e 02, quando realmente o projeto é desenvolvido.

O *Modelo de Análise para Automação da Manufatura* desenvolvido nesse trabalho é composto de 02 fluxogramas que permitem a execução das tarefas de análises para cada uma das 02 fases do desenvolvimento, baseado nos requisitos das metodologias aplicadas.

Já na etapa 03 é onde acontece o início da operação do projeto no chão de fábrica e realização da validação e aceitação final do sistema automático.

A estrutura do modelo proposto, com seus conteúdos, regras e exemplos de aplicação nas fases, serão mostrados e explicados detalhadamente no próximo tópico.

É importante salientar que todas as análises e tomadas de decisões realizadas pelos Engenheiros durante o desenvolvimento integrado do projeto, devem estar em consenso com os demais departamentos da empresa, tais como: Projeto do produto, Produção, Logística, Qualidade, PCP, Instalações industriais, Segurança, etc., e serem aprovadas pelos gestores e patrocinadores do projeto, antes do início da fase seguinte. É por esse motivo que se busca o trabalho em equipes multidisciplinares em ambiente integrado de Engenharia Simultânea.

Todos os estudos e análises, bem como as tomadas de decisões, devem ser registradas e estar armazenadas no banco de dados da empresa.

5.5.1. Modelo de Análise para Automação da Manufatura

Para que se alcance uma automação em excelência na produção, é importante frisar que o projeto do sistema automático a ser implantado não deve ocorrer independentemente dos projetos de produto e processos de fabricação relacionados. Uma simples definição e compra dos equipamentos e máquinas em desacordo com as condições de engenharia do produto e fatores de produção, pode não gerar os benefícios esperados pela empresa.

Antes de apresentar o *Modelo de Análise para Automação da Manufatura* no detalhe, serão apresentadas algumas premissas que nortearam a confecção do modelo desenvolvido.

Como mencionado anteriormente, o modelo apresentado foi concebido para empresas fabricantes de aviões e componentes, onde o volume de mão de obra aplicado nas atividades produtivas é empregado em grande escala, ou seja, ambientes típicos desse setor. Frente a esse cenário, buscaram-se aumentos em produtividade, padronização dos processos, melhorias na qualidade do produto e das condições ergonômicas e de saúde, além de outros ganhos.

Além desses fatores, outros elementos importantes impulsionaram esse tipo de análises tais como: atendimento das estratégias de mercado, atratividade perante aos clientes, tendências tecnológicas, inovações e eliminação de desperdícios com a produção enxuta.

Na construção do modelo foi considerado também que o ambiente fabril poderá envolver uma pequena variação nos produtos a serem processados pelo sistema automático, além da variação na demanda. Com isso é importante a provisão de flexibilidade no sistema, de modo que consiga atender oscilações de demanda e para processar produtos similares.

O modelo também possui a premissa de que é possível identificar a aplicação em produtos que trazem maior retorno financeiro à empresa, ou seja, onde possa ocorrer uma maximização dos ganhos possíveis de serem obtidos com a implantação do projeto.

Dentro de cada uma das 02 fases de desenvolvimento, foram estabelecidos os critérios para análise, com as verificações específicas para o produto aeronáutico.

Os critérios são os tópicos para avaliação dos fatores de produto e de processos, fundamentados nas metodologias *DFA_{TM}* e *Lean*, e que afetarão diretamente a manufatura do produto no chão de fábrica. O conteúdo das verificações que compõe cada um dos itens a ser analisado visa determinar e evidenciar se as análises estão sendo feitas amplamente e se as verificações específicas para cada item estão sendo exploradas adequadamente.

As verificações e tomadas de decisões relevantes para cada um dos requisitos das fases mencionadas acima, no tocante ao desenvolvimento da automação para a produção, deverão ficar arquivadas em um banco de dados, de modo a possibilitar consultas futuras, além de contribuir para melhorias e concepção de novos sistemas.

A Figura 5.7 apresenta as etapas da 1ª fase, com o detalhamento das atividades de desenvolvimento do projeto do produto baseado nos princípios e requisitos da metodologia *DFA_{TM}* (*Design for Automation*).

FASE 1 – Projeto do produto (aplicação do *DFA_{TM}*) **FIGURA 5.7 – Fluxograma do modelo de análise – Fase 01**

As etapas dessa fase de análise compreendem:

1. Escolha dos materiais

A primeira análise dentro da fase de projeto do produto é a escolha correta dos materiais a serem utilizados no avião, levando em conta as vantagens e tendências descritas no capítulo 02 (tópico 2.3) desse trabalho.

De acordo com os argumentos já apresentados anteriormente, o uso dos materiais compósitos poliméricos estruturais, também denominados avançados, tem sido ampliado no projeto aeronáutico, pois contribuem significativamente para a competitividade das empresas fabricantes de aviões no mercado globalizado, devido aos aspectos técnicos e estratégicos.

O desenvolvimento de fibras de carbono, boro e quartzo ofereceram ao projetista a oportunidade de flexibilizar os projetos estruturais, atendendo as necessidades de desempenho em voo das aeronaves. Os avanços dos compósitos criaram novas oportunidades para estruturas de alto desempenho e com baixo peso, favorecendo o desenvolvimento de sistemas estratégicos, como na área de aeronaves de geometrias complexas.

Os materiais compósitos pré-impregnados (*prepregs*) dominam o mercado de carbono durante muitos anos, entretanto o uso de componentes compósitos na indústria aeroespacial tornou-se mais importante a partir da década de 80. Especialmente as estruturas feitas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*), também chamados plásticos reforçados com fibra de carbono são adequados para os aviões, aplicações em que são necessários requisitos de construções altamente resistentes à fadiga, porém leves (EHINGER *et al.*, 2010).

Esses materiais possuem diversas vantagens estratégicas e competitivas nos diferentes aspectos de projeto, produção e uso, conforme mostra a Figura 5.8.

FIGURA 5.8 – Porque utilizar o material compósito

(Fonte: *Airbus*)

No entanto, a utilização eficiente desta tecnologia é ainda limitada devido ao processo de produção ser em grande parte manual. A técnica do processo de *prepreg* convencional provoca custos elevados devido à laminação das camadas, injeção da resina e cortes serem realizados de forma manual. Além dos custos de produção elevados, existem taxas de rejeição de peças, falta de repetibilidade dos componentes produzidos e a inteligência dos processos relacionados, devido à falta de automação do processo.

A Figura 5.9 ilustra as etapas do típico processo de fabricação de peças em material compósito, de forma manual.

Material	Laminação	Cura	Ajustes	Acabamento
CNC	Preparação		Inspeção

FIGURA 5.9 – Processo típico de fabricação manual

É importante salientar uma forte e crescente utilização desses materiais, pelo fato de ser uma tendência mundial no setor aeronáutico, conforme vantagens mostradas na figura 5.8.

Nesse contexto, todo projeto para ser competitivo e bem sucedido, deverá considerar o uso desses novos materiais na concepção e desenvolvimento de um novo produto.

Baseado nesses fundamentos, o objetivo desse tópico do modelo de análise é orientar os projetistas no ambiente de engenharia simultânea para a utilização desses materiais sempre que possível, buscando uma maximização na aplicação desses materiais. Quanto maior for o uso e aplicação desses materiais em um determinado projeto, maior será sua competitividade no mercado frente à concorrência.

É importante frisar que além das variáveis até aqui apresentadas, tais como: custo, fabricação, relação peso/resistência e questões estratégicas, quando comparado ao material metálico, esses materiais avançados podem auxiliar a automação na produção, tema principal desse trabalho, pelos motivos a serem explanados no item (2) seguinte dessa fase.

2. Projeto do Produto

Com o objetivo de projetar um produto voltado para a automação dos processos de fabricação, em concordância com as tendências tecnológicas e de mercado pré-estabelecidas, essa etapa apresenta uma abordagem que orienta o desenvolvimento de um produto para essas necessidades. Isso inclui uma análise detalhada do projeto do produto e seu potencial para automação, através da aplicação dos materiais previamente escolhidos, concepção de suas características específicas, provisões de máquinas e ferramentas para a manufatura, bem como atendimento aos requisitos de meio ambiente e de serviço no campo.

a) Usar novos materiais

A utilização de compósitos poliméricos avançados em partes estruturais de aeronaves cresce a cada ano, devido às excelentes propriedades mecânicas que este material confere ao componente que está sendo projetado e por permitir flexibilidade no projeto de peças complexas e com propriedades locais específicas. O crescente uso de polímeros reforçados com fibras de carbono (Figura 5.10) no setor aeronáutico deve-se, principalmente, ao constante desafio que esta indústria possui na obtenção de componentes que exibam os maiores valores de resistência mecânica e de rigidez específicas entre os materiais disponíveis.

FIGURA 5.10 – Estrutura entrelaçada típica do CFRP

(Fonte: HOLDEN, 2010)

Conforme Mills (2001), um trabalho de modelamento de custo realizado pela universidade de *Cranfield* apontou claramente 03 passos importantes na abordagem do projeto estrutural e tecnologia de fabricação, para reduzir o custo dos componentes compósitos de fibra de carbono para um nível inferior às peças de alumínio.

- ✓ Produzir componentes moldados à espessura líquida, de modo a reduzir os custos com gabaritos de montagem e tempo de trabalho;
- ✓ Substituir o *prepreg* com uma configuração de material mais barata;
- ✓ Utilização de abordagens que permitam a automação de deposição de material, a uma taxa muito mais elevada do que o processo convencional.

Frente a essas condições, os projetos dos grandes segmentos estruturais dos aviões, tais como: fuselagens, asas, longarinas e empenagens, deverão sempre considerar em 1ª instância a aplicação desses materiais na concepção dos produtos, buscando sempre a maximização do uso, de forma a auxiliar a automação dos processos de manufatura. Atualmente, processos automáticos para a fabricação desses grandes componentes têm sido desenvolvidos e suas aplicações no ambiente fabril aeronáutico têm crescido consideravelmente.

A Figura 5.11 abaixo ilustra um conceito de máquina que permite a aplicação do material compósito de forma automática, através da alimentação do material por meio de bobinas de tecido, e posterior compactação do material no molde através de pressão e temperatura.

FIGURA 5.11 – Conceito para aplicação automática do material compósito

(Fonte: adaptado *Eletroimpact*)

A utilização desses materiais avançados nos projetos dos segmentos estruturais das aeronaves, vão sempre contribuir para agregação de valor nos negócios da empresa, quando aplicados em conjunto com sistemas automáticos, conforme abordagem do tópico seguinte.

b) Provisionar para automação

A automação eficiente estabelece requisitos elevados em relação ao processo, material e a geometria dos componentes. O processo de colocação de fibra é uma tecnologia chave para a fabricação dos principais componentes da estrutura primária da indústria aeronáutica, como por exemplo, painéis, barris, vigas, etc. A indústria aeronáutica está atenta constantemente para melhorar a sua produção no quesito qualidade, bem como sob os aspectos econômicos. Para atender as novas especificações para um sistema de colocação de fibra a seco, uma solução nova e inovadora foi necessária, tornando-se o foco deste projeto de desenvolvimento tecnológico.

Dentro desse setor, os processos conhecidos como *ATL* (*Automated Tape Layup*) e *AFP* (*Automated Fiber Placement*) tem se tornado muito interessante, conforme explanados no item 4.4.1 desse trabalho.

O processo de colocação automática de fibra é um estabelecido método de fabricação, que utiliza o material *prepreg* comum. Este material pré-impregnado é feito a partir de rolos de fibra de vidro ou de carbono, pré-impregnados com resina (tipicamente termo endurecível ou termoplástico). A resina tipicamente utilizada não é reticulada no *prepreg* e, portanto várias técnicas complexas de arranjos têm de ser considerados no processo produtivo (DIERSSSEN *et al*, 2010).

As vantagens dessa tecnologia tem forçado o desenvolvimento de soluções automáticas para reduzir o esforço de trabalho e atender aos requisitos de qualidade do produto e as metas de custo da produção.

A Figura 5.12 ilustra o processo de *ATL*, onde a aplicação automática da fibra é um processo de fabricação utilizado para a construção de grandes estruturas, geralmente de curvaturas mais suaves, através da laminação automática de fitas de material compósito *prepreg*.

FIGURA 5.12 – Processo de *ATL*

(Fonte: adaptado *Airbus*)

Já o processo *AFP* também permite uma laminação precisa do material compósito, porém oferece aos projetistas a liberdade para criar produtos com geometrias mais complexas. A qualidade do produto e reprodutibilidade pode ser melhorada e os custos do trabalho podem ser reduzidos, dando uma vantagem competitiva sobre os países com menores custos de trabalho (THUIS, 2005).

FIGURA 5.13 – Processo de *AFP*

(Fonte: adaptado Airbus)

Mills (2001) destaca vantagens obtidas com o desenvolvimento e implantação dessas tecnologias na fabricação de componentes aeronáuticos, dentre outros:

- ✓ Eliminação de trabalho manual para aplicação de camadas de material *prepreg* para moldar a curvatura do mandril;
- ✓ Minimização de desperdícios nos cortes, devido o processo automático ser assistido por computador;
- ✓ Deposição de material de reforço sem problemas com enrugamento e ondulação da fibra durante o processo;
- ✓ Pré-forma no formato líquido de fabricação para caber na cavidade do molde, sem necessidade de ajustes de cortes adicionais.
- ✓ Nível baixo de desperdício de material resultante de ferramenta de corte.

- ✓ Utilização de formas de fibras altamente orientadas para permitir a adaptação da rigidez do laminado, em que o nível do friso é suficientemente baixo para realizar laminados rígidos, quando fabricadas a partir de largas estopas (12 a 24 filamentos) de baixo custo.

Baseado nos fatos reportados acima, o projeto do produto deverá permitir e assegurar a possibilidade de utilização de sistemas de laminação automática para os processos de fabricação, baseado nas condições e características do produto, previamente concebido através do uso de materiais compósitos. Sendo assim, o sucesso de um projeto estará sempre condicionado à forma em que a concepção e desenvolvimento do produto serão realizados levando em contas os requisitos para automação (DFA_{TM}).

Além disso, essa abordagem conjunta entre material e automação na fase de projeto, irá contribuir significativamente para uma redução no número de componentes do produto, conforme importante requisito do $DFMA$, que será explorado a seguir.

c) Reduzir o número de componentes

Segundo Boothroyd & Dewhurst (1988), a chave para o sucesso da aplicação de DFM é a simplificação da manufatura do produto, enquanto que as técnicas de DFA objetivam a simplificação da forma do produto, de modo que os custos de montagem possam ser reduzidos. Dentro dos conceitos, técnicas e métodos do $DFMA$ que visam o aperfeiçoamento da fabricação de componentes ou simplificação da montagem de produtos, podemos destacar para esse caso, a concepção de um projeto orientado para um número mínimo de componentes, além da utilização de processos padronizados e mentalidade para as possibilidades de automação (DFA_{TM}).

A utilização dos materiais compósitos em conjunto com os processos de automação aplicados, permite uma redução no número de partes dos componentes estruturais.

O processo de laminação automática da fibra aperfeiçoa a eficiência e qualidade da produção, além de reduzir a quantidade de painéis que formam o segmento. Um exemplo dessa aplicação é um dos segmentos da fuselagem central em formato barril do novo avião *Airbus 350 XWB*, onde a laminação dos tecidos é realizada em um molde de ferramental chamado mandril, através do processo de *AFP*.

Esse conceito reduz drasticamente a quantidade de gabaritos de montagem estrutural, além da grande quantidade de mão de obra qualificada necessária, bem como favorece as questões de ergonomia, repetibilidade, padronização, entre outros.

A Figura 5.14 mostra o processo de laminação automática da fuselagem no molde ferramental (mandril) e posteriormente o barril juntado à fuselagem central.

Nesse conceito, a fabricação do segmento é realizada através de uma única peça.

BARRIL DE FUSELAGEM
(PEÇA ÚNICA)

FIGURA 5.14 – Barril da fuselagem central do A350

De maneira diferente no processo de montagem com materiais metálicos (ex. chapas de alumínio), os painéis do segmento central da fuselagem (dois laterais, um na parte superior, e outro na parte inferior) são montados separadamente, cada um com seu ferramental específico. Em seguida, os conjuntos dos painéis pré-montados são posicionados em um dispositivo para junção, formando parte da fuselagem central do avião. Nesse conceito de montagem, é necessário um grande número de ferramentais, ferramentas, dispositivos e de pessoas treinadas e capacitadas, além de outros fatores intangíveis relacionados, o que muitas vezes em função do tipo de produto e demanda de mercado poderá inviabilizar o projeto a ser desenvolvido, quando comparado a um processo desenvolvido para automação (DFA_{TM}).

A Figura 5.15 ilustra um exemplo de junção estrutural de componentes.

FIGURA 5.15 – Montagem segmento por junção de painéis

Sendo assim, o modelo de análise desenvolvido nessa tese, também orienta os projetistas para o desenvolvimento de produtos que atendam os requisitos do *DFMA* com foco para uma minimização do número de componentes, além da aplicação conjunta de condições que favoreçam o uso de processos automáticos de fabricação.

É importante salientar que a previsão do projeto para a utilização dos processos de fabricação automática no conceito de barril, direciona o produto para uma condição mais competitiva, frente às tendências tecnológicas e inovação, contribuindo também para as questões de produtividade, qualidade e redução de custos.

3. Peso do produto

A concorrência entre os operadores de aeronaves tem obrigado os fabricantes a projetarem aviões com menor custo operacional direto (*DOC*) possível. Olhando para o aumento drástico do preço do combustível de aviação durante a última década, pode-se entender por que uma série de esforços tem sido tomada para reduzir o consumo de combustível, cujo custo é uma parte substancial do *DOC*. Uma possível estratégia para economizar o custo do combustível é a redução do peso estrutural. A aplicação do plástico reforçado com fibra de carbono (*CFRP*) tem oferecido grandes oportunidades para a diminuição do peso estrutural das aeronaves, tipicamente variando entre 10 e 30%, quando comparado com base no alumínio aeronáutico (KAUFMANN *et al.*, 2009).

No entanto, os engenheiros estruturais através da relação custo-benefício, têm de encontrar compensações entre o peso mínimo e o custo mínimo da solução a ser aplicada. Assim, o foco não deve ser apenas em pura redução de peso, mas sim em uma minimização combinada entre peso estrutural e custo de fabricação.

Rezende & Botelho (2000) também destacam uma vantagem financeira em torno de 25% na redução do custo final de obtenção das peças em material compósito.

Consequentemente, esses fatores irão contribuir significativamente para melhoria nas condições de desempenho das aeronaves, o que implica diretamente em melhorias nas condições relacionadas à eficiência e autonomia.

O projeto do produto deve assegurar que todas as exigências impostas pelo departamento da engenharia de peso e balanceamento estejam plenamente atendidas, de modo a assegurar que a aeronave em questão atenderá todos os requisitos de desempenho pré-estabelecidos na fase de anteprojeto. Caso isso não esteja ocorrendo, o projeto do produto deverá ser revisado (reprojeto) para adequação aos requisitos de desempenho requeridos.

Os principais requisitos de desempenho (*performance*) a serem atendidos são:

- ✓ *MTOW (Maximum Take-Off Weight)*: é o peso máximo com o qual um determinado avião pode alçar vôo com segurança. Esse limite é definido já no anteprojeto da aeronave conforme limites estabelecidos pelas regras de certificação. Um avião é capaz de alçar vôo com mais do que o MTOW, porém além de ilegal, essa prática implica operar fora dos limites de segurança e de desempenho mínima de subida.
- ✓ *MLW (Maximum Landing Weight)*: é o peso máximo para pouso, ou seja, o máximo de peso bruto da aeronave devido a limitações de projeto e operacionais em que uma aeronave está autorizada a pousar. Ele pode exceder o peso máximo de decolagem (MTOW).
- ✓ *ZFW (Zero Fuel Weight)*: é o peso total do avião e de todos os seus conteúdos, menos o peso total do combustível a bordo. Por exemplo, se uma aeronave está voando com um peso de £ 5.000 e o peso do combustível a bordo é de 500 libras, o *ZFW* é £ 4.500.

- ✓ *MTR (Maximum Total Range)*: é a distância máxima que uma aeronave pode voar entre decolagem e pouso, limitado pela capacidade de combustível em aeronaves com motor.

A Figura 5.16 ilustra um exemplo de alcance máximo em milhas náuticas (*nm*) de 03 diferentes modelos de aviões, todos partindo do aeroporto internacional de Guarulhos-SP.

FIGURA 5.16 – Exemplos de *MTR (Maximum Total Range)*

É importante frisar que um projeto de produto bem elaborado e otimizado, que atenda e supere todas as exigências de desempenho operacional descritas acima, poderão contribuir também para a utilização de motores menos potentes, ou seja, de menor valor agregado.

Dessa forma, os projetistas devem sempre estar atentos para a busca da simplificação do projeto do projeto, perseguindo sempre a integração entre a utilização de materiais avançados (mais leves e resistentes) e a redução do número de componentes.

Essa integração quando aplicadas em conjunto com sistemas automáticos para fabricação, devem sempre satisfazer os requisitos da engenharia de peso.

Essa concordância irá contribuir para melhores resultados operacionais das aeronaves, além de criar condições para um transporte aéreo mais barato e acessível.

4. Definição dos fixadores dos componentes

O processo de rebiteagem, também conhecido como cravação, é um dos processos de junção mais aplicados no ambiente da indústria aeronáutica. Novos materiais e novos requisitos de projeto constituem desafios que conduzem os usuários dos fixadores (prendedores) para uma melhor compreensão dos processos de instalação de juntas rebitadas. Assim, as propriedades mecânicas da articulação rebitada dependem dos parâmetros de instalação e características dos fixadores (BAHA II & HESEBECK, 2010).

Fixador ou prendedor é toda peça ou conjunto de peças que mantêm dois objetos ou mais unidos. Sendo assim, a determinação e escolha correta dos fixadores a serem utilizados no produto são de extrema importância para o sucesso do projeto a ser desenvolvido, pois irão contribuir significativamente durante toda a vida útil da aeronave em operação.

Devido às crescentes exigências referentes às propriedades mecânicas das juntas rebitadas, é em primeiro lugar necessário compreender a influência do processo de instalação sobre a qualidade da junta rebitada e para identificar os parâmetros que podem afetá-lo.

A Figura 5.17 mostra um exemplo de juntas fixadas com prendedores utilizados em larga escala na aviação.

FIGURA 5.17 – Juntas fixadas com prendedores

(fonte: *Alcoa Fastening Systems*)

a) Qualificar fornecedores

O sistema de qualificação de fornecedores deve ser aplicado a todos os fabricantes e distribuidores de insumos e matérias-primas, nesse caso fixadores aeronáuticos (rebites, pinos, colares, parafusos, etc.), que fornecem para as empresas.

Segundo Martins (2010), os responsáveis pela qualificação de fornecedores são profissionais das áreas de Qualidade, Suprimentos, Engenharia e Produção, que trabalham em ambiente de equipe multidisciplinar. Os fornecedores devem ser classificados em uma das categorias seguintes: não qualificados, condicionais, qualificados e certificados. A curva ABC é a classificação usada pelas empresas para dar o grau de importância aos seus fornecedores. Por exemplo, o fornecedor A é aquele cujo seu material entra em quase todos os produtos, ou seja, em grandes volumes, por isso tem prioridade sobre os outros fornecedores e deve ser tratado de forma diferenciada, pois qualquer desvio de qualidade impactará em toda a cadeia.

A qualificação de um fornecedor deverá assegurar a uniformidade da qualidade, da segurança e eficácia dos produtos adquiridos, com o objetivo da melhora contínua da qualidade.

Para o caso específico de fixadores aeronáuticos, a equipe de desenvolvimento do produto, deve estar focada no atendimento dos seguintes aspectos:

- ✓ Definir o produto conforme necessidade do projeto;
- ✓ Especificar os requisitos da qualidade;
- ✓ Selecionar potenciais fornecedores;
- ✓ Avaliar fornecedores alternativos;
- ✓ Realizar planejamento conjunto da qualidade;
- ✓ Obter prova de conformidade com requisitos;
- ✓ Homologar fornecedores qualificados;
- ✓ Cooperar com o fornecedor durante a execução do contrato;
- ✓ Elaborar e realizar programas de aprimoramento de qualidade;
- ✓ Criar e utilizar classificações da qualidade do fornecedor.

b) Avaliar custo x benefício

Uma vez atendida a especificação técnica do produto, a equipe responsável pelo desenvolvimento dos fixadores deverá realizar uma análise de viabilidade referente às questões de custo x benefício dos materiais potencialmente selecionados.

É importante frisar que essa análise para escolha e utilização, deverá ser realizada com base nos requisitos da indústria aeronáutica, tais como:

- ✓ Peso instalado;
- ✓ Custo instalado;
- ✓ Facilidade de instalação;

- ✓ Condutibilidade elétrica (*lightning*);
- ✓ Facilidade de obtenção;
- ✓ Possibilidade de automação.

Todos os requisitos são de grande importância, pois irão atender as necessidades do projeto em algum quesito. O peso do fixador, por exemplo, auxilia as condições de desempenho e autonomia da aeronave, e por isso deve ser muito bem analisado. As características de condutibilidade elétrica agregadas ao fixador irão favorecer a segurança ao avião em caso descarga elétrica atmosférica (*lightning*), provocada por relâmpagos, raios e trovões. Outro ponto a ser considerado é a disponibilidade para obtenção do material, pois é sempre importante e boa uma garantia extra de material em caso de aumento de demanda interna ou variações de mercado.

No tocante aos requisitos ligados à produção, os fatores facilidade de instalação e possibilidade de automação são de extrema importância, pois contribuem para os ganhos em produtividade, ergonomia e padronização de processos, assunto a ser discutido em detalhes no próximo tópico.

Por fim, o custo é na maioria da vez um fator decisivo, pois em função da enorme quantidade de fixadores utilizados no produto, uma pequena diferença no custo de um em relação ao outro, poderá representar uma significativa economia nos gastos recorrentes de fabricação.

Dessa forma, o projeto do produto deverá buscar sempre um atendimento pleno de todos os requisitos descritos acima, porém é sabido que o atendimento de um requisito poderá comprometer outro. Por exemplo, um rebite que possui uma condutibilidade elétrica melhor que outro, talvez possa ter um custo instalado maior.

Dessa forma é importante a elaboração de uma matriz de decisão técnica onde é estabelecido pesos para cada um deles, em função do grau de importância de cada um deles. Assim a equipe de engenharia simultânea pontua, analisa e define a melhor escolha.

A Figura 5.18 ilustra alguns exemplos de fixadores aeronáuticos:

FIGURA 5.18 – Exemplos de fixadores aeronáuticos

c) Permitir automação

Todo projeto para ser competitivo, deverá considerar a utilização de fixadores que atendem os requisitos de engenharia pré-estabelecidos, bem como o favorecimento da automação de seus processos de montagem.

Conforme Velaz (2011), um aumento significativo na procura de fixadores cegos é esperado na indústria aeroespacial, não somente devido à sua capacidade de ser instalado a partir de apenas um lado da estrutura, ou sua vantagem de acesso, em que é possível juntar os componentes sem a necessidade de acesso a partir do lado

oposto (processo impossível para fixadores em duas partes), mas também devido ao potencial e facilidade com que eles podem ser utilizados em sistemas robóticos, que permitem que seus processos de instalação sejam realizados de modo completamente automático.

A Figura 5.19 mostra alguns exemplos de fixadores cegos utilizados em larga escala nos processo de montagem estrutural aeronáutico.

FIGURA 5.19 – Exemplos de fixadores cegos

(Fonte: adaptado *Allfast fasteners*)

Os fixadores cegos podem ser facilmente integrados em efetuadores (*end-effectors*) inovadores de robôs, que agregam as funções de: furação, instalação e sistemas de inspeção, permitindo a redução dos tempos de ciclo do processo e associadas economias de custos. Estas vantagens, juntamente com a capacidade geral de que os sistemas automáticos oferecem em realizar todas as etapas que compreendem um típico processo de montagem (posicionamento correto dos efetuadores nas regiões de operação, furação/escareação, medição do comprimento da pega (*grip*) do aperto, aplicação de selante no caso de instalações molhadas, seleção e carregamento dos fixadores, instalação, inspeção, etc.).

Esse processo apresenta uma infinidade de oportunidades a partir da utilização destes sistemas, levando para um benefício chave, baseado em redução de tempo / custos do processo. Em resumo, estes fixadores proporcionam a possibilidade de uma implantação completa dos processos denominados “*One Way Assembly*” ou “*One Up Assembly*”, que significa realizar completamente a montagem somente através de um lado.

A Figura 5.20 representa abaixo, a sequencia de instalação de um fixador cego.

FIGURA 5.20 – Processo de instalação de fixador cego

(fonte: adaptado *Allfast fasteners*)

Os fabricantes de aeronaves estão constantemente procurando por soluções de automação flexíveis e rentáveis para melhorar sua produção, de forma que possam incorporar o processo de montagem dos fixadores. Sendo assim, está crescendo o desenvolvimento de soluções com o objetivo de cumprir essa exigência altamente precisa do cliente, com sistema robótico de furação para aplicações variadas dentro da indústria aeroespacial.

A Figura 5.21 mostra uma célula robótica de furacão automática desenvolvida para execução do processo de instalação de fixadores cegos, onde os processos de furação/escareação, inserção do fixador e inspeção são atendidos pelo sistema.

FIGURA 5.21 – Célula de furacão automática

(Fonte: adaptado *BROETJE-Automation GmbH*)

Frente a essa tendência mundial, os projetistas devem sempre considerar a possibilidade de utilização desses tipos de fixadores no projeto do produto, em conjunto com sistemas automáticos para esse fim, pois além de contribuir para a questão de acessibilidade, permite a automação completa do processo, o que irá contribuir para ganhos expressivos em produtividade através da redução dos ciclos, além da padronização do processo de montagem e repetibilidade.

É importante salientar que a concepção de um projeto não orientado para essas tendências tecnológicas, acarretará em perda de competitividade do produto frente a um mercado globalizado e altamente competitivo.

d) Buscar padronização

Também conhecido como estandardização, é o processo de desenvolvimento de engenharia que estabelece a uniformização das especificações técnicas, critérios, métodos, processos, materiais, peças ou práticas a serem utilizadas, trazendo uma série de vantagens para o projeto.

Nesse contexto, a padronização dos fixadores implica na redução da variação dos tipos utilizados na montagem, redução de tempo em desenvolvimento de novos componentes, padronização de ferramentas e máquinas, redução de treinamento de pessoal, aumento da qualidade e redução dos custos associados. Deste modo, sempre que possível, o conceito de padronização deve ser utilizado para os fixadores, a fim de facilitar a montagem, obter ganhos em produtividade e diminuir os custos de fabricação agregados. Em se tratando de fixadores, este conceito deve ser amplamente utilizado, pois, quanto mais padronizado for o projeto, menor será o número de fornecedores, ferramentas, treinamento e variação na linha de montagem, além da redução do custo do produto final.

Com foco em conceber um projeto visando à automação, a padronização também auxilia na simplificação dos sistemas automáticos de produção, pois reduz a quantidade de cassetes de fixadores, das mangueiras de alimentação, dos fusos de inserção dos fixadores para o robô e consequentemente do tamanho do magazine para alojamento dos cassetes, o que implica em redução de tamanho e peso, simplificando o sistema de forma global, consequentemente contribuindo para uma redução do valor da máquina.

A Figura 5.22 mostra um exemplo de sistema automático para alimentação de fixadores, incorporados a uma plataforma robótica de furacão e cravação.

FIGURA 5.22 – Sistema de abastecimento de fixadores

(Fonte: adaptado F2C2 System)

e) Instalar maior nº fixadores / minuto

Outra variável de extrema relevância para o fator produtividade é o desempenho da máquina de instalação dos fixadores, no tocante a relação número de fixadores / minuto. Esse número sempre pode ser melhorado quando se aproxima de um ponto ótimo entre a definição correta do equipamento versus tipo de fixador escolhido. Essa relação irá favorecer o aumento da Eficiência Global do Equipamento, ou seja, do também conhecido *OEE, Overall Equipment Effectiveness*.

O *OEE* é um modo simples de medir e melhorar a produtividade das máquinas da fábrica e geralmente usado nos programas de Manutenção de Produtividade Total, ou *Total Productive Maintenance (TPM)*. O ideal seria uma fábrica produzir em 100% do tempo com 100% da capacidade e com 100% de peças boas. Entretanto, na realidade isso raramente acontece. O *OEE* possibilita um meio de medir a diferença entre o ideal e o que está atualmente acontecendo na fábrica.

Segundo Jonsson e Lesshmmar (1999), o *OEE* permite indicar áreas onde devem ser desenvolvidas melhorias, bem como pode ser utilizado como *benchmarking*, permitindo quantificar as melhorias desenvolvidas nos equipamentos, células ou linhas de produção ao longo do tempo. A análise do *OEE* das máquinas de uma linha de produção ou de uma célula de manufatura permite identificar os recursos com menor eficiência, possibilitando focalizar esforços neles. A importância de se aperfeiçoar os equipamentos e atuar nas maiores perdas (obtidas através do *OEE*) se concretiza quando há aumento de produção, pois a melhoria da eficácia descarta a necessidade de novos investimentos.

Frente a essa necessidade de capacidade produtiva, a equipe de projeto do produto deverá analisar fortemente essa variável, pois uma pequena diferença entre a máquina instalar 04 e 06 fixadores por minuto, poderá representar grandes perdas em termos de produtividade e eficiência do processo.

A Figura 5.23 mostra abaixo uma análise para efeito de comparação entre 02 máquinas (A e B) desenvolvidas para efetuar a mesma função para a furação e cravação de um painel de asa, porém com desempenhos diferentes.

É importante observar que o custo agregado em âmbito anual de produção é altamente expressivo para o fluxo de caixa da empresa.

Máquina A	Máquina B	
4	6	Desempenho (pinos / min)
3000	2000	Tempo execução / painel (min)
50	33	Tempo execução / painel (h)
6.25	4.17	Turnos de 8h necessários
1500	1000	Tempo total de operação mensal (h)
300	800	Ociosidade mensal (h)
21000	56000	Custo ociosidade mensal (USD)
252000	672000	Custo ociosidade anual (USD)
\$420,000.00		DELTA - Ganho anual

CONSIDERAÇÕES

Quantidade de fixadores por painel de asa = 12000
 Custo parada hora máquina = 70 USD
 Capacidade produtiva máquina (mensal) = 1800 horas
 Demanda mensal de painéis = 30

FIGURA 5.23 – Resultado da diferença de desempenho entre 02 máquinas

Dessa forma, esse tipo de análise deverá ser sempre realizado cuidadosamente no momento da definição do projeto do produto, pois uma vez definida as condições do projeto de máquinas em função dos fixadores escolhidos, somente no futuro os resultados produtivos mostrarão os reflexos desse desenvolvimento.

5. Concepção dos ferramentais de apoio

Segundo Muelaner (2011) apud Boyes (1980), os termos gabarito (*jig*) e dispositivo de fixação (*fixture*) são muitas vezes usados como sinônimos, quando se refere ao trabalho de segurar. Entretanto, existe uma distinção entre os termos: os gabaritos seguram e posicionam as peças, além de servir para orientar a operação produtiva, enquanto os dispositivos de fixação apenas seguram e posicionam as peças durante a montagem.

Os dispositivos podem ser pensados como ambos meios para validação e verificação, mas os gabaritos não só colocam os componentes corretamente na posição para realização das operações de montagem, mas também verifica se a montagem está correta. Os dispositivos devem localizar e controlar todos os graus de liberdade relevantes (*DOF*) em ambos os níveis de componente e de montagem (MUELANER, 2011 apud POLLOCK, 1988).

A Figura 5.24 mostra o gabarito de montagem do cone de cauda do *Airbus 380*.

FIGURA 5.24 – Gabarito de montagem do cone de cauda do A380

(Fonte: www.aint.com)

O tamanho e a complexidade desses ferramentais mostram que eles tipicamente possuem longos períodos de construção, geralmente maiores que 06 meses, fazendo com que em caso de necessidades de revisões tardias nos projetos ou o emprego da engenharia simultânea, se torne um desafio. Estima-se que os ferramentais de montagem são responsáveis por cerca de 5% do custo total de construção de um avião, ou 10% do custo da estrutura (ROOKS, 2005).

A seguinte Figura 5.25 mostra as consequências da tradicional filosofia de fabricação.

FIGURA 5.25 – Questões da filosofia de fabricação tradicional

(Fonte: MUELANER et al., 2011)

Nesse trabalho, utilizaremos o termo ferramental de apoio para tanto gabaritos, quanto para os dispositivos de fixação utilizados na montagem aeronáutica.

a) Reduzir o número de ferramentais

A fim de ultrapassar problemas e para alcançar a demanda de produção desejada, as tecnologias de fabricação existentes têm de ser melhoradas. Novas tecnologias e conceitos de montagem têm que serem desenvolvidos para atingir a demanda, possíveis aumentos de produção e redução de custos (BAKKER, 2011).

A fim de atingir taxas de produção mais elevadas e diminuir os custos através da redução dos tempos de produção, durante as fases de fabricação do avião, há uma tendência para diminuir o número de elementos dos dispositivos de montagem de peças (ferramentais).

A configuração exigida para os ferramentais e gabaritos de montagem é alcançada por um número de diferentes conceitos para fixação, desenvolvidos principalmente para atender as questões referentes à simplificação, modularidade, flexibilidade e de ferramentais automaticamente reconfiguráveis. Os tempos de fabricação dos dispositivos / gabaritos e seus custos não recorrentes (*NRC*) associados poderiam ser reduzidos se o conceito para ferramentais de montagem fosse alterado da condição tradicional de grande, pesado e rígido, para ferramentais mais leves, reconfigurável e flexível (BAKKER, 2010).

A busca desse conceito traz inúmeros ganhos ao sistema produtivo, pois além de proporcionar ganhos tangíveis, também favorece o uso de automação.

Seguem abaixo os principais potenciais ganhos obtidos com a redução / minimização de ferramentais na linha de montagem:

- ✓ Redução de custos com ferramentais pesados, que são extremamente caros;
- ✓ Redução no tempo (*lead time*) de implantação do projeto na linha;
- ✓ Favorecimento ao tempo de resposta em caso de revisões de projeto;
- ✓ Necessidade de menor área para locação da linha de montagem;
- ✓ Redução de custos com fundação e infraestrutura, que são altíssimos;
- ✓ Minimização na instalação de monumentos na linha de montagem;
- ✓ Melhoria no layout e fluxo de pessoas no chão de fábrica;
- ✓ Minimização de inspeções periódicas e recertificações dos gabaritos;
- ✓ Minimização de riscos de danos ao produto por motivos de impactos e colisões com ferramentais;
- ✓ Melhoria na acessibilidade ao produto, o que favorece a implantação de sistemas automáticos de produção.
- ✓ Favorece a ergonomia e aspecto visual.

Nesse contexto é importante que durante o projeto dos ferramentais de apoio para a montagem, a equipe de engenharia de desenvolvimento, mais especificamente no papel dos engenheiros de produto, processos e ferramental, busquem sempre a redução do número de gabaritos e dispositivos necessários. É claro que para determinados casos em que o requisito de tolerâncias é altamente exigido, uma redução no número de ferramentais se torna mais difícil. Entretanto, essa visão sempre deverá fazer parte da mentalidade da equipe de projeto, pois essa condição otimizada irá contribuir positivamente para o sucesso do fabricante de aviões.

b) Buscar conceito *jigless*

Tradicionalmente, o papel do projetista de ferramental tem sido identificar a configuração ótima dos ferramentais para um dado projeto de produto e suas montagens. Os fatores cisalhamento e flexibilidade dos maiores componentes estruturais do avião tornam difícil imaginar uma montagem sem o uso extensivo de ferramentais pesados. Isto frequentemente conduz para um complexo e dedicado ferramental, com custos de construção extremamente elevados e longos prazos para entrega. No entanto, o mundo da produção aeroespacial está mudando. Já é possível reduzir consideravelmente a quantidade de ferramentais pesados e rígidos, especialmente gabaritos, através de um projeto inovador e também aplicações de tecnologias avançadas. Os esforços atuais dentro da indústria aeroespacial estão focados em direção a uma filosofia de minimizar ou eliminar ferramentais dedicados, filosofia essa conhecida como "Fabricação *Jigless*" (PICKETT, 1999). Nesse conceito *Jigless*, a montagem é realizada sem o uso de gabaritos (*jigs*), pois isso exige que as partes sejam fabricadas com precisão suficiente para garantir a montagem correta (NAING, 2004).

Segundo Pickett (1999), para facilitar esse tipo de concepção, é vantajoso para os projetistas de produto ter o apoio de um ambiente de modelagem de produto, o que permite que os componentes sejam projetados, tirando todo o proveito dos princípios *Jigless* e suas tecnologias permitidas.

Um exemplo do processo de montagem *Jigless* largamente utilizado na indústria aeroespacial, são máquinas de rebiteagem automática, empregadas para a fabricação de painéis de asas. Nesse tipo de processo, a máquina anexa automaticamente as longarinas aos painéis da asa. Ensaaios envolvendo rebites instalados em corpos de prova por processo automático e à frio, mostraram que esse processo fortalece o metal ao redor dos furos em que os rebites são inseridos, aumentando a vida de fadiga da aeronave. Embora essas máquinas sejam específicas, elas podem ser utilizadas para atender uma família de aviões, que podem servir para fabricar todos os modelos de asa dentro de uma mesma categoria. As máquinas substituem a montagem manual de longarinas nos painéis, onde anteriormente eram utilizados vários dispositivos e gabaritos de montagem, e que exigia muito tempo de *set-up* (preparação) e que agora pode ser realizada numericamente através programação computadorizada CNC (NAING, 2004).

A Figura 5.26 mostra um exemplo de rebitadora automática em que o conceito *Jigless* está incorporado no processo de fabricação de painéis de asa do *Airbus 320*, permitindo assim a obtenção de um nível maior em automação, devido à redução de dispositivos e gabaritos empregados no processo.

Outro fator importante é a questão de inovação tecnológica incorporada nesse tipo de solução, conforme tendências tecnológicas da indústria aeronáutica.

FIGURA 5.26 – Máquina para fabricação de painéis de asa do *Airbus 320*

(Fonte: www.electroimpact.com)

Outro exemplo de montagem *Jigless* é em casos ainda mais críticos, onde se faz necessário garantir as exigências de tolerâncias apertadas dentro dos processos de montagem. Um método alternativo para reduzir a dependência e impacto de dispositivos e ferramentais, é conceber o projeto do produto visando montagens coordenadas (MUELANER, 2011).

A montagem coordenada consiste na utilização de furos guias em ambas as peças a serem montadas, de modo que através de análises de tolerâncias geométricas previamente realizadas, a montagem se torne mais fácil e coordenada.

Esse método de montagem *Jigless* é apresentado para a montagem de peças de chapa simples, isto é, consistindo de planificações e dobra simples, utilizado na indústria aeronáutica.

A maioria das práticas atuais da indústria depende de procedimentos intensamente manuais e dispositivos e gabaritos rígidos para a montagem de peças. O método proposto baseia-se em furos de alinhamento com tolerâncias cuidadosas, que são usinados via CNC (controle numérico computadorizado) nas peças, em seus pontos de fixação, conforme ilustrado na figura seguinte. As peças são temporariamente presas a estes furos de alinhamento para seu adequado alinhamento (coordenação) junto à montagem, e em seguida, permanentemente fixados em todos os pontos de pinos e rebites (NAING, 2004).

A Figura 5.27, envolvendo um conjunto de quatro peças com rebites, demonstra com sucesso o potencial do método de montagem *Jigless*.

FIGURA 5.27 – Método de montagem *Jigless*

(Fonte: Walczyk et al., 2000)

Sendo assim, os projetistas devem sempre ter em mente um projeto de produto visando o conceito *Jigless*, pois conforme apresentado nesse tópico, isso irá contribuir imensamente para uma redução no custo do projeto, em função da redução de ferramentais, contribuindo também para um aumento da produtividade e da qualidade, além das questões de estratégias de competitividade envolvidas no negócio.

c) Conceber ferramentais híbridos

Além dos pontos citados acima, existem outras desvantagens na forma atual de como muitos ferramentais são utilizados atualmente. Os ferramentais de montagem sendo produtos específicos se tornam inflexíveis, e quando o contrato do programa de uma determinada aeronave chega ao fim, provavelmente o ferramental ficará subutilizado, estendendo assim o tempo de retorno do investimento aplicado. Além disso, os ferramentais devem ser recalibrados com frequência para garantir a precisão exigida, mas isto é difícil e caro (LEWIS, 1993).

Segundo Muelaner (2011), esses tradicionais ferramentais usados para montagens estruturais aeronáutica, chamados “monumentos”, consistem de grandes estruturas estáticas em aço, fixadas ao piso da fábrica reforçado com concreto armado, e que geralmente são configurados somente para um tipo ou modelo de aeronave.

Uma configuração melhorada desses ferramentais em termos de flexibilidade beneficiaria vários cenários, pois essa característica e definição clara das interfaces favoreceriam a reconfigurabilidade do sistema em atendimento a outros tipos de aeronaves, que por sua vez auxiliariam na redução dos custos adicionais para os fabricantes de aeronaves, bem como para fabricantes dos dispositivos e gabaritos. Essa condição de reconfigurabilidade permite que o ferramental seja híbrido, e apoia a flexibilidade da empresa em atender diferentes programas de produção. Além disso, com um número crescente de fabricantes de aeronaves e uma tendência crescente para a terceirização de tarefas de montagem de estruturais de aviões, a demanda de aplicações tendem a subir. Esses ferramentais podem ser equipados com módulos de montagem que permitem um elevado grau de flexibilidade a um custo razoável (MULLER, 2011).

A Figura 5.28 mostra as versões do avião *Boeing 787 Dreamliner*.

Essa família de aeronaves é composta por 03 modelos diferentes, onde o tamanho da fuselagem reflete no número de assentos para cada versão.

FIGURA 5.28 – Versões do *Boeing 787*

(Fonte: adaptado de *airliners.net*)

A Tabela 5.2 traz a relação entre o comprimento versus o número de assentos para cada modelo do *B787 Dreamliner*.

TABELA 5.2 – Características das variações do *B787*

Modelo	Comprimento (m)	Assentos
787-8	57	242
787-9	60	280
787-10	68	301-310

Baseado nas informações da tabela, podemos notar que os 03 modelos possuem comprimentos diferentes, ou seja, as dimensões longitudinais da fuselagem são diferentes, o que irá afetar a configuração do ferramental de junção dos segmentos estruturais.

Por esse motivo, foi desenvolvido um ferramental flexível e híbrido ao ponto de atender as 03 configurações de tamanho desse avião. Como podemos verificar na FIGURA 5.29, esse ferramental é reconfigurável e permite a execução do processo de junção independente do modelo a ser montado, sendo ajustado em função da necessidade da produção. Além dessa vantagem, o dispositivo também poderá ser utilizado em outros programas futuros, o que irá evitar custos não recorrentes com novos ferramentais e amortização do investimento em menor tempo.

FIGURA 5.29 – Ferramental flexível de junção da fuselagem do B787

(Fonte: www.aint.com)

Nesse foco, os projetistas devem sempre gerar esforços para o desenvolvimento de ferramentais híbridos e flexíveis, pois além de permitir a utilização para uma gama maior de produtos, reduz custos com infraestrutura, gastos com novos dispositivos e retrabalhos e também encurta o tempo de retorno dos altos investimentos.

FASE 2 – Métodos e Processos (aplicação do *Lean Manufacturing*)

FIGURA 5.30 – Fluxograma do modelo de análise - Fase 02

As etapas dessa fase de análise compreendem:

1. Definição do Fluxo Produtivo

A primeira análise dentro da fase de métodos e processos é definição correta do fluxo produtivo a ser implantado na linha de produção dos aviões, levando em conta as vantagens do *Lean Manufacturing* descritas no capítulo 03 desse trabalho.

Na teoria de fabricação em geral, o fluxo produtivo é uma das melhores soluções para alcançar baixos tempos de ciclo e baixos inventários (HOOP, 2001).

Para se realizar um fluxo contínuo, a correspondência entre tempo e o balanceamento da capacidade dos passos consecutivos do processo é necessário. Assim, um fluxo contínuo só é possível quando as etapas consecutivas do processo tem a mesma vazão em um determinado período de tempo. As vantagens do fluxo produtivo como: baixos tempos de ciclo e estoques vêm em grande parte a partir do aspecto do tempo (KEIL, 2011).

a) Assegurar fluxo contínuo

Conforme *Takt Consultoria Lean* (2010), o processo de fluxo contínuo é um conceito que significa em seu estado ideal, que os itens são processados e movidos diretamente de um processo para o próximo, uma peça de cada vez (*one piece flow*). Cada etapa do processo opera somente na peça que é necessária para o próximo passo, pouco antes que o próximo passo precise dela e o tamanho do lote de transferência é unitário.

O fluxo contínuo é importante porque é a maneira mais eficiente de transformar materiais em produtos, devido:

- ✓ Uso mínimo de recursos. A quantidade de pessoas (direta ou indiretamente), máquinas, materiais, prédios, equipamento de movimentação, etc., requeridos para produzir é mínima, o que significa alta produtividade e baixo custo;
- ✓ *Lead time* curto que permite responder rapidamente as exigências dos clientes;
- ✓ Problemas como defeitos se tornam fáceis de identificar e corrigidos antes de prosseguir;
- ✓ Encoraja a comunicação entre operações, que se tornam ligadas em uma relação “cliente-fornecedor”.

O padrão do fluxo unitário de peças, chamado *one piece flow*, é mostrado em seguida na Figura 5.31. A partir do momento em que deixa o armazenamento de entrada até o momento em que atinge o armazém de saída, cada peça move individualmente a partir do passo a passo sem qualquer acumulação de *WIP* (*work in process*) permitida entre máquinas ou estações de trabalho.

FIGURA 5.31 – Padrão *one piece flow* (fluxo unitário)

(Fonte: <http://www.iienet2.org>)

Essa abordagem visa planejar cada uma das fases do processo produtivo, de modo que todas as etapas do processo de uma determinada montagem estejam sincronizadas, isto significa que cada etapa do processo tem quase o mesmo tempo de processo / saída e trabalha dentro do mesmo ritmo de produção.

Dentro da indústria de fabricação aeronáutica, os conceitos do *Lean Manufacturing* têm sido aplicados de modo crescente, sendo o fluxo contínuo um fator importante na definição do processo de montagem. Essa condição favorece a fluidez do produto ao longo da linha, mostrando a evolução e completamento das montagens em cada fase.

Outra razão importante é o fato de não haver a necessidade de refluxos, evitando assim dificuldades e atrasos durante a montagem.

A Figura 5.32 mostra o conceito de linha móvel de montagem do avião *Boeing 777*.

FIGURA 5.32 – Linha de montagem do B777

(Fonte: www.boeing.com)

Nessa linha situada em *Everett, WA* nos Estados Unidos, o avião se movimenta com uma velocidade de 3m/h durante a montagem final, sendo puxado para frente através de um reboque engatado ao trem de pouso auxiliar (dianteiro) comandado por meio de dispositivos guiados automaticamente (*AVG – Automated Guided Vehicle*).

O dispositivo possui um sensor ótico que segue uma linha ao longo do chão.

A Figura 5.33 ilustra essa aplicação automática com detalhe do dispositivo.

FIGURA 5.33 – Sistema de reboque do B777

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

“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.”

Baseado nas vantagens descritas acima é muito importante que a equipe de processos busque sempre a melhor definição para um fluxo contínuo de montagem, pois isso irá contribuir para ganhos expressivos de extrema relevância no contexto do projeto, além de possibilitar automação, conforme exemplificado acima.

b) Garantir fluxo livre

O fluxo do produto durante o processo de fabricação, além de ser realizado de forma contínua, deverá fluir sozinho e não os recursos. Isso também favorece a segurança, pois evita riscos de danos ao produto, devido ao menor número de interferências.

Nesse conceito, o produto flui ao longo das estações e os recursos permanecem parados, de modo a evitar compartilhamento de recursos e aumento de *setup*.

A movimentação do produto ao longo da linha de produção deve ser de preferência indexada em um dispositivo, com o mínimo possível de interferências com máquinas, equipamentos, plataformas, *kanban*, etc. Quando o produto flui o mais livre possível ao longo da linha, é evitado o aumento de tempo devido à necessidade de indexações.

A Figura 5.34 mostra uma foto da linha de montagem final do *Boeing 737*, situada em *Renton-WA*, nos Estados Unidos, onde podemos ver claramente os conceitos do *Lean* referente ao fluxo livre do produto ao longo da montagem.

FIGURA 5.34 – Linha de montagem final do B737

(Fonte: www.boeing.com)

Podemos notar que o avião é indexado via trem de pouso auxiliar por um dispositivo que o puxa ao longo da linha de montagem em função do *takt time* (ritmo) definido e os recursos de apoio permanecem parados lateralmente em frente seu ponto de uso.

Os recursos permanecem disponíveis para uso conforme necessidade em cada estação, sem interferir o fluxo livre do avião, sendo posicionados somente quando necessário, retornando em seguida para seus locais pré-determinados.

Sendo assim, para que ocorra um desenvolvimento eficiente dos métodos e processos da linha de montagem, os engenheiros precisam levar em conta essas variáveis, pois quanto melhor a fluidez do produto e menor interferência com os recursos de apoio, maior será a produtividade devido menores tempos de *setup*. Além desses ganhos, a condição de fluxo livre favorece a implantação de dispositivos automáticos tanto para movimentação do avião ao longo da linha, quanto para atividades de montagem.

c) Buscar movimentação em linha

Segundo Gerhardt (2005), a disposição em linha, também conhecida por produto ou *flow shop*, possui a melhor configuração para a produção contínua e repetitiva, onde a estratégia da empresa está focada na produção em massa de um único produto. É a comunalidade dos produtos que leva a escolha desse tipo de configuração.

A montagem em linha é caracterizada pela movimentação do produto e mão de obra fixa, durante as etapas do processo produtivo. O produto percorre a linha de montagem e os operadores permanecem em suas posições pré-determinadas. Vide Figura 5.35.

FIGURA 5.35 – Conceito de montagem em linha

Para Youssef e Elmaraghy (2006) estes requisitos são, principalmente, atividades repetitivas e amplamente previsíveis e as poucas variantes do produto não afetam o processo básico de produção, não sendo assim necessário mudanças no fluxo de produção dependendo das características do produto a ser fabricado. O fluxo de produtos, informações ou clientes é muito claro e previsível, o que faz dele um arranjo muito fácil de controlar. Além disso, apresenta baixos estoques intermediários (*WIP*), tempo de produção unitário (tempos de ciclo) curto, e as tarefas realizadas costumam ser relativamente simples, querendo pouco treinamento para a execução.

A Figura 5.36 ilustra o tipo de movimentação usado na montagem do avião *F-22*.

FIGURA 5.36 – Linha de montagem do *F-22 Raptor* em Marietta-GA, US.

(Fonte: *Lockheed Martin*)

É importante salientar a importância da realização de um balanceamento do processo produtivo, através da realização de estudos e análises referente aos ciclos produtivos, *takt time* (ritmo da produção), carga e capacidade do sistema, e também a previsão dos potenciais gargalos e caminhos críticos envolvidos. Deve também ser considerada a provisão futura para processamento de produtos similares e/ou diferentes.

Essas análises irão garantir a minimização dos riscos de atrasos nas entregas, redução dos ciclos e HH, menor quantidade de trabalho em processo e consequentemente um aumento do valor agregado ao produto final. Além dessas vantagens, o conceito em linha também favorece a curva de aprendizado da produção, pelo fato da mão de obra ser fixa nas estações, o aprendizado das atividades ocorre mais rapidamente.

2. Projeto do *Layout*

A produção é influenciada por inúmeros fatores internos e externos à empresa. Um dos fatores internos é o *layout*, ou arranjo físico da área produtiva. Projetar o *layout* de uma área produtiva é mais abrangente do que apenas determinar a disposição das máquinas, dos operadores e das operações nessa área. O projeto do *layout* também deve levar em conta e atender os objetivos estratégicos da empresa, como o aumento da capacidade produtiva ou o lançamento de novos produtos no mercado (SLACK *et al.* 2007).

Essa importância é reforçada pelas consequências em longo prazo das decisões e do custo de ter de reprojeter a planta. Assim, um bom projeto de *layout* inicial é fundamental para a eficiência operacional de uma empresa. Os processos serão eficientes se seus objetivos forem alcançados, e eficazes se propiciarem condições para atender o objetivo da produção com o mínimo de perdas e desperdícios durante o processo produtivo (ST. AUBYN *et al.* 2009).

a) Dimensionar na menor área possível

Este passo envolve a análise do espaço de chão disponível e o espaço necessário para os equipamentos (máquinas e ferramentais) juntamente com seus auxiliares, tais como: painéis de controle, prateleiras, transformadores elétricos, carrinhos, operadores, etc. O espaço necessário para manutenção e remoção de cavacos é também medido. A utilização do espaço é medida pela relação entre a área dos equipamentos por unidade de espaço no piso. Esta abordagem conduz para a medida exata da utilização do espaço (ALEX, 2010).

O desafio é encontrar a melhor distribuição e locação possível dos equipamentos em uma área disponível no piso. É evidente que cada m^2 do piso produtivo possui um alto valor agregado, por esse motivo o projeto do *layout* deve considerar com grande relevância a otimização para um melhor aproveitamento da área disponível. Assim a solução automática a ser integrada no arranjo físico, deve estar dimensionada para ser alocada no menor espaço possível, evitando uma maior ocupação de área e aumento dos custos agregados. A Figura 5.37 mostra um exemplo de *layout* bem otimizado.

FIGURA 5.37 – Linha de montagem dos bordos de fuga da asa do *Boeing 787*

(Fonte: *Electroimpact*)

Podemos observar na Figura 5.37, que essa linha de montagem foi concebida visando à ocupação do menor espaço possível, sem perder os conceitos de fluxo e em integração com ferramentais e sistemas automáticos, nesse caso robôs de furação.

Frente a essa vantagem competitiva, os engenheiros de desenvolvimento de processos precisam sempre efetuar análises e estudos de *layout* simulando várias configurações, de modo a assegurar a ocupação da menor área possível, sem perder os conceitos de fluxo contínuo e a integração com as demais necessidades produtivas. Outro fator importante é sempre pensar com foco no uso de sistemas automáticos de fabricação, de modo a maximizar os ganhos tangíveis e intangíveis para o projeto e a redução do tempo de retorno dos investimentos. Também é importante reforçar que reduções em área de piso produtivo no chão de fábrica irão representar economias significativas em infraestrutura, além de disponibilidade de área para utilização em novos programas.

b) Buscar um *layout* híbrido / flexível

O sistema híbrido de fabricação é uma combinação, ou a mistura de 02 sistemas, que permite a produção de diferentes produtos, e que leva à minimização de custos com manuseio de materiais e tempos de *setup* do sistema. Esse esquema de produção tem a capacidade de ser utilizado quer como híbrido ou como convencional. Além disso, a flexibilidade desse modelo de *layout* permite o processamento de uma variedade de produtos. Estas peças podem ser uma mistura de peças agrupadas ou independentes, permitindo o processamento de mais peças em um mesmo *layout*. Em outras palavras, o modelo híbrido apresenta vantagem em relação ao modelo convencional, pois reduz as movimentações intra e intercelulares, ajudando na minimização do tempo total de trajetos, redução do custo total e atrasos, permitindo uma maior flexibilidade, maior qualidade e máxima utilização do espaço (ZOLFAGHARI & ROA, 2006).

No segmento fabricação aeronáutica o desafio é grande, pois se tratando de aeronaves, o tamanho dos componentes do avião na maioria das vezes dificulta essa abordagem.

Entretanto, esse tipo de análise é de extrema relevância, pois minimiza drasticamente os custos relacionados com equipamentos de apoio ao solo e ferramentais necessários para a montagem das aeronaves, bem como o abastecimento dos materiais e os tempos de preparação envolvidos nas atividades. No conceito de linha híbrida, os ferramentais se tornam comuns, ou seja, passam a atender ambos os produtos a serem fabricados, evitando a duplicação. Outra vantagem é a capacitação das pessoas para montagem de ambos os modelos de aviões, agregando conhecimento e valor das pessoas.

A Figura 5.38 exemplifica um conceito de linha híbrida utilizado na produção de duas aeronaves comerciais, pertencentes à mesma família.

FIGURA 5.38 – Conceito de linha híbrida para montagem de aviões

Nesse conceito, em uma única linha é possível a montagem de 02 modelos de aviões, de maneira híbrida, ou seja, por meio de um *layout* flexível.

Pode-se notar que desde o início das montagens, nas fases de pré-equipagem (asas e fuselagens), os ferramentais já possuem o conceito híbrido, permitindo a equipagem de ambos os modelos de segmentos, em um mesmo dispositivo. Em seguida, após a junção da asa na fuselagem e até a finalização da montagem final da aeronave, ao longo das estações de 01 a 04, o mesmo dispositivo atende ambos os modelos.

É importante comentar que as condições de abastecimento de materiais nas estações não estão representadas na Figura 5.38, porém são integradas com o *layout* híbrido, de modo a possibilitar os suprimentos tanto para um modelo, quanto para o outro.

c) Absorver aumento de demanda

Outro aspecto importante que precisa ser levado em consideração durante o projeto do *layout* é a flexibilidade para possibilitar atendimento às demandas futuras.

Tortorella e Fogliatto (2008) destacam que a expansão da área produtiva depende primeiramente da relação ocupada versus a área total, e em seguida, da relação entre o número total de unidade de planejamento de espaço (UPE), que no caso de um *layout* em linha são os postos de trabalho, em função do número de UPE que necessitam ser deslocados, em caso de reprojeção e/ou ampliação do *layout*. Estes dois fatores indicam de forma bastante simplificada, a flexibilidade de um *layout*.

Nesse tópico, é de extrema importância uma análise de previsão futura dos planos de produção para os atuais programas em andamento da empresa, baseado na carteira de pedidos, encomenda futuras e aumento de cadência (demanda de mercado) para os próximos anos. Além desses fatores, devem também ser consideradas as estratégias industriais para os novos programas conforme as condições e tendências de mercado.

Falhas nas previsões para absorção de aumento de demanda futura poderá representar enormes gastos futuros, bem como problemas de natureza estratégica.

A Figura 5.39 representa uma célula automática concebida para fabricação de peças primárias de aviões e provisionada para atender aumentos de demandas.

FIGURA 5.39 – Concepção de layout com provisão para aumento de demanda

Nota-se na Figura 5.39 que esse projeto prevê uma área planejada para ampliação da operação produtiva em caso de necessidades futuras. Com isso, os equipamentos adquiridos passam a ser integrados com novos dispositivos, acessórios e ferramentais, permitindo assim, o atendimento à demandas maiores.

Assim, é possível concluir que a elaboração de estudos de *layout* prevendo condições para ampliações futuras, facilita a integração com os processos já em operação, reduz custos com readequações de áreas e equipamentos, minimizam impactos de infraestrutura, aumenta a para flexibilidade da linha de produção para atender oscilações de demanda, capacitando a empresa para novos negócios e desafios de mercado.

d) Integrar todos os processos da montagem

A literatura da *Boeing*, denominada *Tactics to Improve Operational Efficiency* (2002), lista 09 táticas utilizadas para melhoria da eficiência operacional e da habilidade para gerenciamento do valor agregado.

As 09 táticas são:

- 1) Mapeamento do fluxo de valor;
- 2) Balanceamento da linha;
- 3) Procedimentos padronizados de trabalho;
- 4) Controles visuais nas posições;
- 5) Colocação de tudo nos pontos de uso;
- 6) Estabelecimento de linhas de abastecimento;
- 7) Reprojetos de produtos e processos de negócios;
- 8) Fluxo contínuo;
- 9) Utilização de linha móvel.

Baseado nessas táticas listadas acima, os itens 1, 2, 4, 5 e 6 podem ser mais bem atendidos quando se busca uma melhor integração entre todos os processos envolvidos na montagem, ou seja, quando existe uma melhor relação e interface entre todas as etapas de produção de um determinado produto.

Como o foco do mapeamento do fluxo de valor inclui a completa agregação de valor no processo produtivo, desde a concepção de exigências nas fontes de matérias primas até o recebimento do produto pelo consumidor final, existe uma clara necessidade em maximizar a eliminação dos desperdícios, tanto em seu ambiente interno de produção, quanto em toda sua cadeia de suprimentos (HINES & RICH, 1997).

Após o mapeamento do fluxo de valor, é importante a realização do balanceamento da linha de montagem, em função do *takt time* da produção, ou seja, do ritmo definido pela demanda de produção. Com base nesse ritmo, todas as fases do processo devem estar niveladas para atender essa demanda, de modo que o produto final seja entregue conforme plano de produção definido pelo PPCP. Assim, é necessário que todos os componentes estejam colocados em seus respectivos pontos de uso, no momento certo e seus clientes internos informados adequadamente via controles visuais, favorecendo assim as linhas de abastecimento dos componentes.

Na busca em satisfazer essas necessidades, visando o aumento do valor agregado do produto e eliminação dos 07 tipos de desperdícios, tais como: superprodução, esperas, transportes, processamentos inapropriados, inventários, movimentações e defeitos, outra forma de contribuição é a concepção de um *layout* com maior proximidade entre todos os processos relacionados com a montagem do produto.

A Figura 5.40 mostra um exemplo de integração dos processos envolvidos.

FIGURA 5.40 – Layout da linha de montagem de asas do A380

Por esses motivos, os projetos de *layout* que perseguirem esse conceito, alcançarão maiores ganhos para a organização, pois além de auxiliar na redução dos desperdícios, favorecendo uma produção mais enxuta, irão também contribuir positivamente para o fluxo de caixa da empresa, gerando uma maior lucratividade em função a redução dos custos recorrentes e não recorrentes envolvidos no negócio.

e) Reduzir o tráfego de materiais e pessoas

Para Liberopoulos *et al.* (2007), o fluxo de materiais e pessoas é determinado pelo *layout* concebido, já que dependendo desse, as distâncias e rotas de transporte dependem diretamente da áreas para movimentação e da localização dos postos de trabalho. Uma empresa com postos mal alocados terá uma movimentação excessiva de materiais gerando perdas que poderiam ser evitadas. Dependendo do fluxo, a empresa apresenta uma maior ou menor flexibilidade na produção, podendo requerer um investimento maior em equipamentos, sejam eles de produção ou de transporte. Dependendo da capacidade e da flexibilidade, pode haver uma necessidade maior ou menor de estoques, sejam eles, iniciais, finais ou intermediários.

O *layout* concebido deve auxiliar na movimentação das pessoas e materiais, evitando assim, dificuldades e deficiência na circulação de pessoas e materiais. Equipamentos com alta intensidade de fluxo devem estar localizados um perto do outro e a restrição do espaço deve ser também considerada. É importante o uso de diagrama de espaguete para medir a distância de movimento do material. O diagrama de espaguete é um método de mapeamento de fluxo que usa uma linha contínua para traçar o caminho percorrido por uma peça ao longo de todas as fases do processo de fabricação.

A Figura 5.41 representa um exemplo de análise de movimentações de peças ao longo do processo produtivo de uma linha de montagem de asas.

FIGURA 5.41 – Exemplo de análise de movimentações

É uma maneira de visualizar os fluxos de material e pessoas em um processo e ilustrar os desperdícios com transportes e movimentações, que devem ser eliminados em um sistema de produção com operação mais enxuta. Essa economia resulta em um menor *lead time*, redução do *WIP* e criação de um ambiente mais saudável para permitir o *FIFO*, o *KANBAN*, e a produção com lotes menores.

Dessa forma, uma definição ineficiente das rotas para materiais e pessoas dentro do *layout*, será um problema envolvendo fatores que influenciam a eficiência estratégica da produção, além de dificultar a comunicação, o que passa a ser prejudicial para a resolução de problemas, devido ao atraso na chegada das informações nas áreas com problemas.

Por esses motivos, os engenheiros de processos e produção, devem sempre procurar conceber o melhor arranjo físico possível com essas características, de forma otimizada, simples e com a melhor fluidez possível.

3. Manutenção

Dunston *et al.* (1999) apud Aris (2006) conceitua manutenibilidade como sendo a característica de projeto a qual incorpora função, acessibilidade, confiabilidade, facilidade de uso e reparo, em todos os componentes dos sistemas, que maximizam os custos e benefícios do ciclo de vida de um determinado equipamento.

Um bom planejamento da etapa de uso, operação e manutenção de um sistema produtivo ainda na fase inicial de concepção do projeto, contribuem para um melhor desempenho e economia dos recursos em longo prazo, ou seja, um maior grau de manutenibilidade, diminuindo a necessidade de operações corretivas e o impacto ambiental, contribuindo também para a sustentabilidade do sistema. O grau de manutenibilidade tem origem na importância dada na fase de projeto aos fatores de operação, uso e manutenção, buscando maior integração das diferentes frentes de projetos simultâneos, considerando o projeto para manutenção, fornecendo subsídios para que possa ser elaborado um projeto que favoreça a manutenção de maneira eficaz.

A manutenção é um fator extremamente importante quando se pensa em automação na produção, pois é durante todo o ciclo de vida dos equipamentos, quando necessariamente ocorrem diversas intervenções de manutenção que podem influenciar significativamente a produtividade, devido aos custos de operação, a qualidade e pelo grau de facilidade de manutenção dos sistemas. Aris (2006) salienta que muitas empresas consideram fatores de manutenção, como facilidade de limpeza, acesso às áreas de limpeza, reparos e reposição de componentes, como sendo fator de menor importância no momento do projeto.

Por isso, é importante a busca de um projeto que auxilie a manutenção, assegurando que o uso e operação sejam simples e economicamente viáveis, na intenção de proporcionar uma arquitetura de boa qualidade, atendimento aos prazos e aumento do ciclo de vida.

a) Facilitar as tarefas de manutenção

Para a obtenção de uma maior racionalização do ciclo de vida dos equipamentos, bem como a facilidade de execução das tarefas de manutenção, é importante a análise da arquitetura do sistema, no intuito de aumentar a simplicidade e eficiência das tarefas.

Dentre as principais tarefas de manutenção podemos destacar:

- ✓ *Corretiva*: consiste em corrigir, restaurar, recuperar a capacidade produtiva de um equipamento, sistema ou instalação, que tenha cessado ou diminuído sua capacidade de exercer as funções para as quais foi projetado.
- ✓ *Preventiva*: planos de ações planejados que visam a prevenção de falhas e quebras. O objetivo principal é evitar a falha do equipamento antes que ela realmente ocorra. É projetada para preservar e melhorar a confiabilidade do equipamento, substituindo os componentes desgastados antes que eles realmente falhem.
- ✓ *Preditiva*: basicamente difere da manutenção preventiva, por se basear nas necessidades de manutenção em função da real condição do equipamento, ao invés de intervalos pré-determinados.
- ✓ *TPM*: a Manutenção Produtiva Total, ou *Total Productive Maintenance*, é uma abordagem com o objetivo de organizar o ambiente de trabalho para prevenir todas as perdas e alcançar zero defeito, zero quebra, zero acidente e poluição zero em todo o ciclo de vida de um sistema produtivo. Isso é feito com o envolvimento de todos os funcionários, abrangendo toda a organização e estabelecendo uma cultura corporativa para maximização da eficiência da produção. Isso evita investimentos desnecessários em novos equipamentos, realizando o uso ao máximo dos existentes, melhorando sua disponibilidade e aumentando os resultados, além de redução de energia.

Melhado & Mesquita (2005) afirmam que as fases anteriores ao uso, condicionam o desempenho das fases posteriores, e que evitar a ocorrência de disfunções, como patologias construtivas ou consumo exagerado de recursos, custa pouco na concepção, mas que se for adiada à solução desses problemas e transferida aos usuários, o custo será muito maior.

Dentre os principais problemas de desempenho relacionados à incipiente consideração dos aspectos referente à manutenção na fase de projeto temos: falhas na concepção funcional do sistema, o que dificulta a desmontagem, reparo e remontagem, a escolha incorreta dos componentes, condições de acesso inadequadas para reposições e trocas, ausência de identificação e avisos para revisão.

A Figura 5.42 exemplifica algumas características de um projeto de automação, onde condições favoráveis para manutenção foram levadas em conta.

FIGURA 5.42 – Concepção das unidades visando manutenção

Portanto, todas as decisões a serem tomadas durante a concepção do projeto que estiverem relacionadas à manutenção, deverão passar pela avaliação e validação dos engenheiros responsáveis, para que todas as necessidades sejam atendidas da melhor maneira possível. Assim, é de grande importância considerar aspectos de manutenção durante o desenvolvimento do sistema automático, sendo que muitas falhas ocorrem somente durante o uso, o que resultará posteriormente em altos custos de manutenção. Conclui-se então que a consideração dos fatores de manutenibilidade é uma imensa fonte de agregação de valor para a organização.

b) Implementar a TPM

Bon & Ping (2011) destacam que atualmente, os clientes esperam que os fabricantes forneçam seus produtos com excelente qualidade, confiabilidade nas entregas e preços competitivos. Isto exige que suas máquinas e processos sejam altamente confiáveis. A fim de possuir máquinas altamente confiáveis para se conseguir um suave processo de fabricação, muitas organizações têm implementado a Manutenção Produtiva Total, ou seja, o *TPM (Total Productive Maintenance)*. Essa ferramenta permite a maximização da eficácia dos equipamentos, definindo e mantendo a relação ótima entre as pessoas e suas máquinas. Os resultados do *TPM* são avaliados através da medida do *OEE (Overall Equipment Effectiveness)*, ou a eficácia global do equipamento.

O objetivo do *TPM* é trazer vantagens competitivas para as organizações, melhorar a qualidade dos produtos, e reduzir o custo de produção da linha (TSAROUHAS, 2007). Segundo Tripathi (2005), a implementação do *TPM* em uma organização pode garantir maior produtividade, melhor qualidade, menos quebras, reduzir os custos, entregas confiáveis, motivando ambientes de trabalho, maior segurança e melhoria moral dos funcionários.

Mc Kone *et al.* (1999) fala que o *TPM* é um programa que aborda a manutenção dos equipamentos através de um sistema de entrega de manutenção produtiva abrangente, cobrindo toda a vida dos equipamentos e envolvendo todos os funcionários, desde o pessoal de produção e manutenção até a alta gestão. É uma metodologia e filosofia estratégica de gestão dos equipamentos, focada no objetivo de aumentar a qualidade do produto, maximizando a eficácia do equipamento.

Em muitas empresas onde a manutenção é vista como uma despesa operacional a ser minimizada e não como um investimento para aumento da confiabilidade do processo, as práticas de manutenção diminuem a sua competitividade, reduzindo os rendimentos, aumentando os estoques e levando a maus desempenhos (PATTERSON, 1996).

Assim, os pilares tradicionais da metodologia *TPM* são:

FIGURA 5.43 – Pilares do *TPM*

(Fonte: *Advanced Consulting and Training*)

Por isso, durante a implantação dos sistemas automáticos na produção, a equipe de desenvolvimento, nas figuras dos engenheiros de manutenção e processos, precisam elaborar os programas contendo as ações e técnicas preventivas e preditivas, antes da entrada em regime de produção. Esse plano deve envolver todos os departamentos da empresa, habilitando-os para buscar metas de defeito zero ou falha zero, estudos de disponibilidade, confiabilidade e lucratividade, que irão propiciar também, vantagens competitivas para a organização, por meio dos pilares de sustentação ou atividades básicas estabelecidas.

Assim, a *TPM* é uma ferramenta útil que ajuda as organizações alcançarem um melhor processo de fabricação e por ser um modelo de gestão que visa aperfeiçoar a utilização dos ativos empresariais, eliminando todas as perdas no processo produtivo.

Por ser capaz de atingir esse nível de manutenção, a empresa será capaz de obter vantagens competitivas trazidas pela *TPM*, produzindo assim, produtos de qualidade que conseguem satisfazer seus clientes e, conseqüentemente, gerando maiores lucros.

c) Prever condições para *setup* externo

Segundo Kunde (2009), ao tratar o problema dos *setups* convencionais demorados, identifica-se quatro grupos de funções tipicamente desenvolvidas durante esses *setups* nas máquinas, distribuídas proporcionalmente em relação ao tempo gasto para cada atividade e de acordo com os seguintes percentuais:

- ✓ 30% para preparação de matéria prima, dispositivos, acessórios, etc.;
- ✓ 5 % para fixação e remoção de matrizes e ferramentas;
- ✓ 50% para centragem e determinação das dimensões das ferramentas;
- ✓ 15% para processos iniciais e ajustes.

Na busca por *setups* rápidos, existe uma teoria para a troca rápida de ferramentas que se resume em identificar e separar o *setup* interno do externo e converter o *setup* interno para externo. Primeiramente é necessário identificar como as atividades de *setup* estão sendo feitas atualmente, buscando detalhar dentro do conceito de tempos e movimentos cada uma dessas atividades. O *setup* interno é aquele executado quando a máquina está parada e o *setup* externo é aquele executado enquanto a máquina está operando. O *setup* externo, como sendo a preparação dos equipamentos realizada fora da linha de produção principal, ou seja, externo ao ambiente da célula de fabricação automática, evita intervenções humanas e atrasos na produção.

Além dessas vantagens, permite a realização das tarefas de manutenção com o sistema em funcionamento, evitando concorrência entre produção e manutenção.

A Figura 5.44 ilustra a concepção de um sistema que permite a realização de *setup* externo em uma célula automática de furação, onde o sistema de troca de ferramentas é posicionado em um local adequado que favorece o abastecimento e substituição das ferramentas de corte, sem a necessidade de parada da máquina. Isso permite a redução do número de paradas intermediárias ao longo do processo produtivo, o que facilita e também auxilia as tarefas de manutenção.

Sistema externo de troca de ferramentas

FIGURA 5.44 – Trocador de ferramentas com *setup* externo

É importante ressaltar que a concepção para incorporação dos *setups* externos nos sistemas automáticos de produção, exige conhecimento técnico dos equipamentos e dos processos de fabricação, além da análise detalhada dos mesmos e da criatividade. Assim, os engenheiros de processos de fabricação deverão sempre realizar uma análise criteriosa das atividades de *setup* necessárias, no sentido de verificar se essa atividade realmente só pode ser executada com a máquina parada, ou se não existe alternativa melhor que permita a concepção total ou parcial, para uma atividade externa. Procure buscar soluções diferentes das tradicionais, pois os resultados serão surpreendentes.

4. Flexibilidade / Modularidade

Automação é uma antiga palavra no jargão econômico, mas seu significado e escopo tem recentemente sido mudados radicalmente com a automação rígida sendo substituída por uma forma nova e flexível de automatizar o processo de produção (CALABRESE, 1995).

O sistema de fabricação flexível é baseado em máquinas de controle numérico, além de outros valores agregados, como facilidades automáticas e de manuseio de material.

Segundo Streeck (1988), a automação integrada flexível, é geralmente, utilizada pelas empresas mais como um importante dispositivo competitivo para criar uma nova forma de competição tecnológica, do que uma simples questão baseado no preço, devido uma mera economia de trabalho ou simples técnica de redução de custos.

É importante salientar que cada aspecto exigido pelos clientes é considerado como uma oportunidade, pois quanto maior for a capacidade em atender as necessidades dos clientes, maior será sua satisfação. Assim, a chave para ajustar a capacidade de produção com sucesso, é reconfigurar o sistema, desenvolvendo e integrando novas funções quando necessário.

a) Ser capaz em absorver oscilações de demanda

Conforme Fulkerson (1997), a concorrência na indústria de transformação durante a próxima década será centrada sobre a capacidade de flexibilidade e resposta rápida às condições de mercado. Com produtos de ciclos de vida significativamente reduzidos, os fabricantes descobriram que eles não podem mais conquistar participação de mercado e obter maiores lucros através da produção de grandes volumes de um produto padrão para um mercado em massa. O sucesso na fabricação requer a adoção de métodos nos processos de aquisição de clientes e de atendimento dos pedidos, que podem gerir a mudança esperada com precisão, proporcionando uma resposta rápida e flexível a mudanças não antecipadas.

Segundo Bock & Rosenberg (2000), um sistema de manufatura competitiva deverá ser suficientemente flexível para atender pequenos lotes de demandas dos clientes, porque a construção de qualquer nova linha de produção é um grande investimento, então os sistemas de produção devem ser capazes de ser reconfigurados para atender aumentos de demanda, em função de novos produtos.

Muitas empresas estão enfrentando o desafio de mudar as suas orientações estratégicas para atender às demandas do mercado atual. Para isso, exige-se uma adaptação rápida na capacidade de produção com base nas demandas dos clientes.

Um exemplo desse conceito de flexibilidade para absorver as oscilações de demandas de produção é mostrado abaixo na Figura 5.45. Nesse caso, o sistema automático de fabricação do painel do estabilizador vertical de uma aeronave da *Airbus*, absorve o processamento de diferentes volumes de produção. Isso é possível através da programação dos robôs, configurações nos ferramentais, equipamentos e acessórios de apoio, ajustes do ritmo de produção e disponibilidade para trabalhar em diferentes turnos, tudo isso ajustado em função das necessidades de demandas de produção.

A Figura 5.45 ilustra esse sistema automático e flexível de produção.

FIGURA 5.45 – Sistema flexível de manufatura para atender demandas

(Fonte: *Broetje automation*)

Para se acomodar a toda exigência de mudanças nas demandas de produção, o sistema automático precisa ser concebido e estar capacitado para atender rapidamente as configurações dos planos de produção e a alocação de recursos.

O objetivo fundamental do desenvolvimento de um sistema flexível de manufatura é a satisfação contínua da demanda do cliente, por isso, sua concepção com excelência é de extrema relevância no contexto empresarial.

Nesse sentido, o desenvolvimento dos sistemas, métodos e processos automáticos de manufatura, precisam sempre prever essas características no projeto de automação, pois esses fatores irão contribuir significativamente para o atendimento às demandas futuras de produção, além de possibilitar a redução de gastos com novos investimentos em máquinas adicionais, em custos recorrentes com hora extra, contratação de pessoal, e por auxiliar no aumento da satisfação e confiabilidade dos clientes.

b) Processar diferentes produtos

Um requisito de todo projeto de automação, é alcançar um equilíbrio entre a variedade dos produtos a serem fabricados e a flexibilidade de seus sistemas de fabricação. O sucesso de um ambiente customizado de produção é alcançado através de operações de reconfiguração rápida, métodos e processos, de modo a atender às necessidades dos clientes individuais e as dinâmicas exigências da produção. Nesse sentido, é crucial desenvolver um sistema de produção que alcance este objetivo.

Segundo Qiao *et al.* (2006), o grau de flexibilidade de um sistema flexível de produção, serve para satisfazer as exigências de uma gama relativamente variada de produtos, com uma produção em lotes de tamanho pequeno e média. Em um ambiente de produção customizado, uma maior variedade de produtos é produzida, e os requisitos de produção são frequentemente dinamicamente alterados. Além disso, os pedidos dos clientes surgem de forma mais aleatória, com diferentes datas de entrega. Para aumentos na diversificação dos produtos, os processos exigem aleatoriamente peças personalizadas em horários flexíveis a serem fornecidos para seus correspondentes processos anteriores em curto prazo, assim, equipamentos e trabalho são necessários para compensar as variações do produto e dos pedidos. Por isso, todo sistema deve possuir flexibilidade suficiente e capacidade de resposta rápida para lidar com diversas situações complexas de manufatura.

Na indústria de fabricação aeronáutica, todo avião é personalizado para um cliente específico. Assim, os processos de fabricação para alguns componentes principais são desejáveis para seguir os conceitos de sistema flexível de manufatura em um ambiente de fabricação personalizada. A maioria dos processos requer um número diferente de centros de trabalho a partir de várias classes de trabalho.

O ritmo global de todo o sistema produtivo, ou seja, o *takt time*, é desejado por ser uma variável que influencia o tempo do processo de todos os processos relacionados na montagem, bem como o número de trabalhadores atribuídos.

Entretanto, é importante a busca de um sistema automático que possua a característica de processar diferentes produtos, com o mesmo padrão de qualidade.

A Figura 5.46 mostra uma plataforma robótica móvel de furacão, que foi projetada para processar diferentes produtos, com diferentes materiais e aplicações. Utilizando a mesma plataforma robótica é possível efetuar os processos de furação, escareação e instalação de fixadores em diferentes produtos e materiais (compósito e metal).

FIGURA 5.46 – Plataforma robótica móvel de furação

(Fonte: adaptado *Alema Automation*)

Portanto, todo projeto de um sistema automático de produção, deverá considerar sua aplicação no maior número de produtos possíveis, evitando a limitação no uso. Assim, a mesma solução poderá ser aplicada para uma gama maior de produtos, contribuindo para uma maior flexibilidade na produção, permitindo ajustes para atender a novos programas com processos de fabricação similares, e ainda favorecendo a redução do tempo de retorno dos investimentos com automação. Ou ainda, se houver situações na produção que gere disponibilidade do equipamento, por exemplo, em casos de redução na demanda de um determinado produto, o equipamento poderá ser utilizado em outro.

c) Permitir a incorporação de módulos adicionais

Os conceitos de módulos e de modularidade são centrais na construção de arquiteturas de produtos (ULRICH, 1995 apud JIAO, 2007).

Um módulo refere-se a um agrupamento físico ou conceitual de componentes que compartilham algumas características. Modularidade é separar um sistema em duas partes ou módulos independentes, que podem ser tratadas como unidades lógicas (NEWCOMB, BRAS & ROSEN, 1996).

O que é importante na caracterização da modularidade é a interação entre os módulos. Os módulos são identificados de tal maneira que a interação entre módulos é mínima, sendo que a decomposição é a principal preocupação de modularidade.

Mikkola e Gassmann (2003) assumem que o grau de modularidade na arquitetura de determinado produto é limitado pela composição de seus componentes.

Os métodos de modularidade em sistemas de manufatura tradicionais são muitas vezes orientados para os produtos, onde os módulos são agrupados em equipes com funções intercruzadas. É difícil para esse tipo de sistema mudar as estruturas, quando os produtos têm de ser mudado e a capacidade de produção tem de ser ajustada.

Em um sistema flexível de manufatura, é mais desejável categorizar os módulos com base em suas funcionalidades, pois, quanto maior for a diversidade de funções dos módulos, melhor será a flexibilidade, a autonomia e o potencial do sistema para satisfazer as diferentes e personalizadas demandas de produção. Assim, a estratégia de um sistema flexível de manufatura é desenvolver a modularidade da linha de produção, com o agrupamento da linha de produção em módulos funcionais. Cada módulo funcional representa uma capacidade de fabricação típica, podendo eles ser combinados ou reconfigurados para atender novas necessidades de fabricação, conforme as diferentes e personalizadas exigências dos clientes (QIAO *et al.*, 2006).

A Figura 5.47 representa uma célula para fabricação de componentes em material compósito através do processo de laminação *FP* (*Fiber Placement*), onde 02 módulos funcionais e independentes compõe a célula automática.

FIGURA 5.47 – Célula de fabricação com máquinas múltiplas

(Fonte: adaptado *Eletroimpact*)

Nesse conceito de modularidade aqui mostrado, a célula de fabricação possui um controlador e uma área de manutenção comum para as ambas às máquinas, nesse caso duas. Assim, por meio da programação CNC e da quantidade de programas, é possível alterar rapidamente o trabalho para apenas uma única máquina, ambas ou de maneira alternada, mudando assim o número de máquinas em operação.

Frente a essas necessidades, os métodos e processos de desenvolvimentos de sistemas automáticos para fabricação, devem perseguir essas características de modularidade.

O uso do conceito de modularidade nos sistemas automáticos de manufatura contribui significativamente para a expansão das linhas de produção e de mudanças de *layout*, em função de aumento da demanda e/ou agregação de novos produtos na produção. Essas características de independência e flexibilidade que os módulos têm em atender o aumento das vendas colaboram para o aumento das receitas das empresas fabricantes de aviões, fornecendo subsídios para estratégias de novos negócios.

d) Absorver necessidades de mudanças no *layout*

As pressões de mercado têm aumentado dinamicamente, exigindo que as atividades de operações e manufatura respondam rapidamente às mudanças de demandas, volumes de produção e variedade de produtos. Respondendo a essas dinâmicas exigências dos clientes, é requerido um cuidadoso desenvolvimento e gerenciamento das estratégias de fabricação e tecnologia, para que possa prosperar neste hostil competitivo ambiente (DRIRA *et al.*, 2007 apud HASAN, 2011).

Como consequência disso, muitas das vezes é necessário à realização de alterações na configuração do *layout* da produção, para que seja otimizado e possível o atendimento às necessidades futuras de mercado.

Para alcançar um alto nível de produtividade e eficiência, ao projetar um sistema de manufatura flexível, uma questão chave é sua flexibilidade nas rotas dentro do *layout*. Normalmente, os *layouts* relativamente estáticos são projetados com base em uma demanda determinada, portanto, as células ou linhas podem ser criadas e suas relações (fluxos), podem ser determinadas na fase de concepção e utilizadas para a otimização de *layout*. A metodologia de projeto de *layout* irá influenciar ambas a flexibilidade e a adaptabilidade dinâmica de um sistema de produção, por isso é importante criar um *layout* adaptável (QIAO *et al.*, 2006).

Com base nisso, o sistema automático de manufatura deve ser flexível ao ponto de se adaptar a novas configurações de *layout*, não limitando assim o seu uso.

A Figura 5.48 representa a flexibilidade de um sistema que atende diferentes *layouts*.

FIGURA 5.48 – Alteração nas configurações do *layout*

Na Figura 5.48 acima, podemos verificar que a célula robótica móvel de furação atende ambos os layouts (A e B), em utilização para o processo de fabricação de asas de um avião comercial de médio porte. Independente da disposição dos gabaritos e ferramentais dentro do hangar, o sistema flexível de manufatura pode se locomover ao longo da linha de montagem e efetuar as operações produtivas necessárias, permitindo sua utilização em qualquer posição estabelecida. É importante frisar, que as condições de infraestrutura (ar comprimido, elétrica, informática, etc.), devem estar previstas.

Nesse sentido, a perseguição por um sistema móvel de fabricação, sempre contribui para uma maior flexibilidade dentro do hangar de produção, permitindo assim ajustes nas configurações do *layout* do hangar, sem que a limitação para utilização do sistema automático seja afetada.

5. Ergonomia e Segurança

Os exigentes requisitos de fabricação tais como ciclos curtos de produção e variedade de projetos, têm pedido soluções alternativas de produção capazes de dirigir a flexibilidade e eficiência, ao mesmo tempo. A fabricação celular, também conhecida como a produção em células, é um sistema de produção centrada no ser humano, que consiste de um único ou de uma pequena equipe de operadores humanos que executam várias tarefas para produzir um produto acabado a partir de componentes inacabadas (ISA & TSURU, 2002).

Segundo Oborski (2004) & Kosuge *et al.* (1994), este sistema pode ser uma promissora solução para as exigências acima, no entanto, a produtividade em termos de eficiência do trabalho e da qualidade do produto, pode se tornar um problema se tudo é feito manualmente pelo operador humano.

Existem muitas propostas que usam a tecnologia do robô para dar suporte ao operador humano, a fim de aumentar a eficiência de trabalho. A colaboração entre robô e ser humano pode soar como uma boa ideia, mas antes que essa proposta seja implementada, a primeira e mais crítica questão é a preocupação de segurança que permite que os operadores humanos e robôs trabalhem em uma distância próxima.

Esta forma de assistência pode melhorar a eficiência por automatizar parte do trabalho e permitir que o operador humano concentre-se somente na outra porção de trabalho que exige habilidade humana e flexibilidade. Entretanto, essa forma de colaboração também pode ser extremamente perigosa, porque o robô ativo está envolvido e qualquer erro pode ser fatal (BEAUCHAMP & STOBBE, 1995).

Nesse cenário, um sistema flexível de manufatura é promissor, porém a segurança é a consideração mais elevada e importante a ser tomada antes de sua implantação na produção. As avaliações de risco devem ser conduzidas para avaliar o projeto de segurança do sistema automático, e um estudo de segurança realizado para investigar os potenciais riscos, de forma a prever todas as condições de segurança necessárias, favorecendo a operação do sistema, não gerando esforços ao corpo humano e garantindo a integridade e segurança física das pessoas e também do produto.

a) Garantir todas as condições de segurança para as pessoas

A maioria dos trabalhadores assume que suas organizações tomarão todas as medidas necessárias para assegurar que eles retornarão para casa com segurança no final do dia de trabalho, ainda que lesões e mortes relacionadas com trabalho continuem a ocorrer a um ritmo alarmante (ZACHARATOS, 2005).

Os usuários finais dos sistemas automáticos são geralmente vistos como o elo mais fraco em informações de segurança.

Devido a essa percepção, um crescente corpo de pesquisa e de atividade comercial está focado em abordagens automatizadas para a segurança. Com estas abordagens, as decisões de segurança são removidas das mãos dos usuários, e são colocados no lugar em sistemas próprios, ou em serviços remotos ou organizações que estabelecem as políticas que são automaticamente aplicadas. Apesar da automação ser potencialmente benéfica em teoria, na prática não é uma panaceia para a segurança do usuário final (EDWARDS, 2007).

Tan *et al.* (2009) destaca que uma célula automática de produção é dividida em área humana e área do robô, onde os dispositivos para segurança são incorporados junto à célula, conforme mostrado na Figura 5.49.

FIGURA 5.49 – Área humana e área do robô na célula de produção

(Fonte: Tan *et al.*, 2009)

A área do robô é delimitada por uma baixa cerca de segurança, monitorada por sensores fotoelétricos. A finalidade desse recurso é limitar o movimento do sistema de manipuladores móveis do robô dentro da área de operação do robô. A cerca de segurança fornece a barreira física, enquanto que os sensores fotoelétricos estão conectados sistema de controle de operação para atuar como a segunda defesa. As cortinas de luz dos dois lados agem como portas invisíveis para informar o sistema quando o operador humano entra para coletar peças em ambos os lados. A cortina de luz frontal tem a função de impedir a invasão de pessoas na área de atuação do robô durante a operação da célula.

Outra característica de segurança de uma célula flexível de produção é o sistema de monitoramento de segurança do operador (vide Figura 5.50). Duas câmeras IP são usadas para monitorar a segurança do operador, através do acompanhando de marcas coloridas (exemplo: cabeça e ombros do operador) para garantir que o operador está em posição normal de operação (DUAN *et al.*, 2008). Esse sistema mede a postura e movimento do corpo do operador, para determinar a condição do operador (posição normal, anormal ou não presente).

FIGURA 5.50 – Sistema de monitoramento de segurança do operador

(Fonte: Duan *et al.*, 2008)

Frente a esse fator de extrema importância para o projeto de um sistema automático, o propósito da realização dos estudos de segurança e avaliação dos riscos envolvidos, devem ser realizados antes e depois da implementação do projeto na produção, para avaliar a eficiência do sistema de segurança desenvolvido. A avaliação dos riscos é conduzida baseada em normas de segurança e regulamentações industriais, através de três passos fundamentais que são: identificação, medição e análise do risco.

Segundo Tan *et al.* (2009), o projeto de segurança deve abranger ambas as partes físicas (hardware) e de controle em cinco principais aspectos:

- ✓ *Área humana e área do robô*: cercas de segurança, sensores fotoelétricos e cortinas são utilizados para distinguir a área humana e área robô, a fim de ter áreas de trabalho seguras e monitor a segurança em caso de cruzamento nas áreas.
- ✓ *Zonas de trabalho de segurança do robô*: na fronteira da região de interface entre homem e robô, três zonas de segurança são definidas por cortinas de luz para controlar o comportamento do robô;
- ✓ *Projeto de segurança do robô*: no próprio projeto do robô, a velocidade do robô e as restrições de área são configuradas para minimizar os riscos;
- ✓ *Sistema de monitoramento de segurança do operador*: sistema de visão por câmeras IP é desenvolvido para monitorar as condições de segurança do operador humano, medindo a postura corporal e posição;
- ✓ *Controle de segurança da sequência de operação*: o sistema de controle global coordena o fluxo de colaboração entre o operador humano e sistema de manipuladores do robô e monitora o status do sistema de segurança para assegurar a segurança da operação de montagem.

Assim, uma efetiva participação do pessoal de engenharia de segurança ocupacional é muito importante durante as definições dos processos, de modo que todos os requisitos ocupacionais e de segurança sejam atendidos na totalidade.

No entanto, os riscos não são totalmente eliminados e o esforço contínuo é necessário para promover melhorias no desempenho dos sistemas de segurança, como o objetivo de minimizar acidentes, garantindo a segurança e integridade física das pessoas.

b) Reduzir ao máximo a exposição do ser humano a ambientes hostis

Dentro do ambiente da indústria aeronáutica, como também em qualquer outro setor da indústria, existem processos em que as condições de exposição do ser humano em relação a agentes químicos, produtos e resíduos são mais acentuadas. Nesse contexto, podemos citar os processos de lixamento, polimento, aplicação de verniz e pintura de componentes, o qual será explanado aqui como exemplo.

Bai (2007) fala que quando uma determinada empresa assina um projeto de pintura, ela deve estabelecer programas médicos e educacionais para os trabalhadores que irão trabalhar no projeto. Todos os trabalhadores devem participar de um *workshop* de segurança, onde eles irão aprender sobre os perigos de tintas a base de chumbo, técnicas de limpeza, e outros procedimentos para garantir sua total aderência a todos os regulamentos de Saúde e Segurança Ocupacional (*OSHA*). Os trabalhadores também estão sujeitos a exames médicos antes, durante e após o projeto. Os médicos irão realizar testes de produtos químicos no sangue e garantir que eles respiram bem o suficiente para usar os equipamentos de respiração. Além dos programas educacionais e médicos, a área de pintura deve estar encapsulada. A razão para isso é manter que os resíduos de tintas e o pó não contaminem o ambiente.

A estrutura de encapsulação, geralmente constituído por uma estrutura em aço e cobertas com painéis de alumínio ou fibra de vidro devem atender os padrões da *OSHA*. Os padrões requerem um sistema de ventilação para mover e limpar o ar dentro da área de trabalho. Outra determinação é uma área de descontaminação, para que os trabalhadores possam tomar banho e vestir roupas limpas antes de sair da área de trabalho.

Com o objetivo de minimizar essas condições insalubres na produção, aplicações com sistemas robóticos automatizados têm avançado dramaticamente ao longo dos últimos anos (NAVON & SHPATNITSKY, 2005).

As volumosas tarefas de pintura e um ambiente de trabalho hostil impuseram os robôs como a melhor alternativa. A aplicação de robôs em tarefas de pintura proporciona baixos custos de produção, qualidade persistente e protege os seres humanos de um ambiente hostil de trabalho. O processo de pintura spray é uma parte inevitável do acabamento de alta qualidade de carros, móveis, eletrodomésticos, construção naval, engenharia civil, aviões, etc. (POTKONJAK *et al.*, 2000).

Estes sistemas foram desenvolvidos para reduzir as exigências de trabalho e custos, aumentar a produtividade e melhorar a qualidade e segurança. Na área específica da pintura robótica de superfícies, pesquisas vêm sendo realizadas por universidades e indústrias em todo o mundo. O processo de pintura de superfície é muito adequado para robótica, devido ao seu trabalho intensivo e por consistir de movimentos simples e repetitivos (SKIBNIEWSKI & HENDRICKSON, 1988).

A Figura 5.51 mostra um exemplo de aplicação de robôs utilizados no processo de pintura das aeronaves de ataque *F-35*, desenvolvido pela empresa *Lockheed Martin*, chamado *RCFS* (*Robotic Component Finishing System*).

FIGURA 5.51 – Sistema robótico de pintura da aeronave *F-35*

(Fonte: *Lockheed Martin Aeronautics Company*)

O sistema de acabamento com componente robótico aqui mostrado é compreendido de 03 robôs de 06 eixos, montados sobre trilhos de eixos auxiliares. Todos os robôs têm trilhos nos eixos x e y, sendo que o robô traseiro tem um eixo z adicional de elevação, que permite manobras em torno das caudas verticais e sobre a superfície superior da aeronave (SEEGMILLER *et al.*, 2009).

Além dos benefícios ocupacionais acima mencionados, o uso de sistemas robóticos de pintura proporciona as seguintes vantagens para o processo produtivo:

- ✓ Repetibilidade e precisão da trajetória de movimento do aplicador;
- ✓ Distâncias constantes de orientação do ponto do centro da ferramenta de pintura melhoram a eficiência de transferência da tinta;
- ✓ Flexibilidade e agilidade para rápidas mudanças de modelos;
- ✓ Ajustes de parâmetros de processo via programação do robô.
- ✓ Equipamentos dinâmicos, leve, pequenos e precisos.

Com esta tendência de pintura com robôs, a indústria deve buscar incessantemente novas maneiras de maximizar as vantagens com essa poderosa tecnologia, reduzindo a complexidade nas operações, aumentando a produtividade, melhorando a qualidade e inovando, além de contribuir significativamente para a minimização da exposição do ser humano a ambientes hostis e insalubres, favorecendo assim a saúde das pessoas.

Assim, o propósito desse modelo de análise, mediante os fluxogramas aqui detalhados, é uma forma de contribuição a ser aplicado no ambiente de desenvolvimento de projetos da indústria aeronáutica, para orientar o desenvolvimento dos produtos e processos com foco em automação da manufatura, baseado nas tendências tecnológicas, e também como subsídio ao aprimoramento do desenvolvimento de novos programas de aeronaves futuras.

Os resultados obtidos e possíveis melhorias serão analisados com ênfase nos requisitos de análise estabelecidos no modelo, de modo que todos estejam cumpridos integralmente.

É importante frisar que o cumprimento total dos requisitos estabelecidos nas fases 02 e 03 do desenvolvimento do projeto, irão garantir um processo extremamente eficiente, robusto e viável técnico e financeiro. O sucesso do projeto está baseado no grau de cumprimento das análises previamente estabelecidas no modelo de análise explanado aqui nesse trabalho, o que irá contribuir para a colocação da empresa em um alto nível de competitividade perante aos seus concorrentes de mercado.

A pesquisa envolverá dois (2) estudos de casos. O primeiro considerando o projeto de uma linha de montagem de segmentos de fuselagens, e segundo, para a fabricação de peças primárias de asa de um avião comercial.

O capítulo seguinte irá apresentar esses estudos de casos, onde o modelo de análise proposto nesse trabalho foi aplicado, para comprovação dos ganhos com o uso da ferramenta.

6. ESTUDOS DE CASOS

Como método para comprovação da eficiência do modelo de análise desenvolvido nesse trabalho, 02 estudos de casos foram elaborados e serão apresentados nesse capítulo.

Os estudos aqui mostrados contemplam as fases de desenvolvimento de produto e processos, tendo como base a aplicação dos requisitos das metodologias *DFX/DFA_{TM}* e *Lean Manufacturing*, no tocante a implantação de automação na produção.

O primeiro estudo destaca a aplicação do modelo de análise dentro das Fases 01 e 02 do desenvolvimento, para o produto e processos, enquanto o segundo estudo mostra apenas a aplicação do modelo na Fase 02, referente ao desenvolvimento dos processos produtivos.

6.1. Estudo 01 – Linha de montagem de segmentos de fuselagem

Esse reporta o desenvolvimento do projeto de uma linha de montagem de fuselagens centrais de um avião comercial da categoria *NB (narrow-body)*.

Tendo como base o objetivo de conceber uma linha de produção na condição mais automática possível, foram desenvolvidos 02 conceitos que atendessem esse requisito, porém diferentes sob os pontos de vista de metodologias e estratégias aplicadas.

Quando é feita uma comparação entre os dois projetos desenvolvidos para automação, nota-se uma grande diferença nas concepções, no que diz respeito aos materiais utilizados na construção do produto, ferramentais, *layout* e quantidade de MO envolvida nos processos.

A Figura 6.1 ilustra a concepção de uma linha de montagem de fuselagens centrais, aqui denominada *Linha A*, onde não houve a aplicação do modelo de análise desenvolvido nesse trabalho, porém com o uso de sistemas automáticos de fabricação.

FIGURA 6.1 – Linha de montagem de fuselagens centrais – *Linha A*

Nesse conceito, é possível verificar a utilização de sistemas automáticos como: robôs de furação, máquinas de rebitagem do tipo *C-frame* e *MTGRS*, além de muitos monumentos de ferramentais e quantidade de MO agregada ao processo.

Para esse projeto, foi utilizado o alumínio aeronáutico liga 2024 como material predominante de construção mecânica do produto, mantendo assim, o processo convencional usado na indústria fabricante de aviões.

O processo de fabricação inicia-se pela montagem dos painéis dos segmentos por meio de robôs, que trabalham em sétimo eixo para abrangência das 03 posições de cada lado. Após a montagem dos painéis, os mesmos vão para os gabaritos de preparação, onde será realizada a junção provisória dos painéis com fixadores temporários para montagem das conchas. Em seguida, os conjuntos pré-montados seguem para a etapa de indexação ao ferramental que será utilizado nas máquinas de rebiteagem automática tipo *C-frame*, para junção definitiva dos painéis. Após o término do processo de montagem das conchas, os conjuntos retornam para a fase anterior para desindexação dos ferramentais. Na sequência, as duas conchas montadas (inferior e superior) são encaminhadas para a máquina tipo *MTGRS*, onde serão unidas e o segmento central da fuselagem formado, através de cravação dos fixadores.

É importante frisar que todas as movimentações dos componentes dentro do hangar realizam-se por meio de ponte rolante e dispositivos de içamento, além do elevado número de mão de obra agregada nas atividades manuais. A mão de obra é necessária para as tarefas de preparação (*setup*), ajustes e montagem dos reforços estruturais (nervuras e longarinas) nos painéis, além da operação das máquinas, robôs e ponte rolante.

Frente às características desse projeto, é perceptível que as regras do *DFA_{TM}* e *Lean* incorporadas especificamente ao modelo de análise desenvolvido, não foram aplicadas de forma efetiva para esse projeto. Podem-se verificar as deficiências, dificuldades e perdas que poderiam ter sido evitadas no processo produtivo, pelos seguintes motivos:

- a) O material de construção utilizado não está na direção das tendências tecnológicas, o que consequentemente implica no aumento do número de componentes, do peso do produto e contribui para uma possível redução na autonomia de voo;
- b) Em função do número de componentes necessários para a montagem do segmento, a quantidade de fixadores requerida para a junção das partes também aumenta, o que afeta significativamente o custo com materiais agregados ao produto;

- c) Como resultados dos motivos (a) e (b) acima citados, faz-se necessário o uso de uma quantidade maior de ferramentais para a montagem dos componentes, devido à necessidade de montagens separadas, além de uma grande quantidade de mão de obra agregada ao processo produtivo;
- d) As condições de processos definidas principalmente para o *layout* da produção merecem destaque, pois as condições de fluxo, dimensionamento do arranjo físico e características de flexibilidade geram influências significativas nos resultados e desperdícios no chão de fábrica.

A Figura 6.2 mostra o *layout* em planta da *Linha A*, com a disposição dos gabaritos, ferramentais e máquinas, os fluxos de materiais e também a área em uso no hangar.

FIGURA 6.2 – Vista em planta da *Linha A*

Com base nos fatos e evidências mencionadas acima, foi elaborado o mapeamento do fluxo de valor da *Linha A* no ambiente fabril, de modo a representar o fluxo (movimento) dos materiais dentro da fábrica de segmentos de fuselagem. Embora o fluxo dos materiais seja o principal objeto na eliminação das perdas, o fluxo de informações também precisa ser tratado com importância, pois ambos devem trabalhar sincronizados.

O principal objetivo do mapeamento de fluxo de valor é auxiliar na identificação das atividades que agregam valor e que não agregam valor (desperdícios) no processo produtivo, facilitando assim a identificação de fontes de desperdício ao longo do fluxo de valor.

Além dos motivos acima mencionados, o mapa permite a mensuração de indicadores de desempenho como: tempos de ciclo, *setup* e valor agregado das atividades, *takt-time* ou a frequência em que se produz e também a quantidade de mão de obra necessária para execução das atividades no ambiente de produção.

Para essa concepção de projeto denominada *Linha A*, pode-se citar alguns fatores que contribuem para desperdícios nesse projeto de automação:

- Grande quantidade de gabaritos fixos de montagem;
- Número elevado de mão de obra agregada às atividades;
- Tempos de *setup* relativamente alto;
- Refluxos no processo produtivo;
- *Layout* de produção pouco flexível;
- Uso de recurso dedicado (ponte rolante);
- Riscos envolvidos com elevação e movimentos de peças;
- Logística mais cara (aérea) para suprimentos dos componentes.

A Figura 6.3 representa o *VSM* desse projeto, onde as particularidades descritas acima podem ser visualizadas de maneira mais eficiente.

FIGURA 6.3 – VSM da Linha A

A partir desse momento, será apresentado um conceito diferente para desenvolvimento do mesmo projeto de uma linha para montagem de fuselagens centrais de um avião comercial da categoria *NB*, denominado *Linha B*, todavia agora concebido com a aplicação do modelo de análise desenvolvido nesse trabalho.

O primeiro fator importante no desenvolvimento desse projeto é a escolha do material de construção mecânica da fuselagem, fundamentado nas tendências tecnológicas. Conforme explanado no capítulo 5 (tópicos 1 e 2) do modelo de análise, o *CFRP* traz muitos benefícios significativos ao projeto. Essa característica contribui significativamente no desenvolvimento dos processos de fabricação, tornando-o mais viável técnico e financeiramente, pois além de contribuir para uma redução no número de componentes na montagem, gera uma automação mais simples e flexível, em um espaço de hangar com menor tamanho.

A Figura 6.4 mostra a linha de montagem de fuselagens centrais no conceito da *Linha B*, onde se perseguiu a aplicação ao máximo dos requisitos do modelo de análise.

FIGURA 6.4 – Linha de montagem de fuselagens centrais – *Linha B*

A fabricação inicia-se pelo processo de laminação do barril da fuselagem por meio da tecnologia *AFP* (*Automated Fiber Placement*) no mandril (molde) do segmento de fuselagem, onde é utilizada uma máquina automática específica para essa finalidade. Depois de concluído o processo de laminação do barril, o conjunto mandril + barril é encaminhado através de um *AGV* (*Automated Guided Vehicle*) para uma autoclave apropriada, onde acontecerá a cura do barril, de modo que todas as propriedades mecânicas pré-estabelecidas para o material sejam atingidas. Após a cura, o barril é removido do ferramental (carro) flexível de movimentação por intermédio de um sistema de indexação do tipo telescópio, que irá assegurar a fixação e rotação do barril ao longo da linha, para realização dos processos subsequentes. Em seguida, um robô de furação operando em 7° eixo efetua a usinagem para abertura das janelas do barril e por meio de um sistema automático de troca de ferramentas, realiza o *NDI* (*Non Destructive Inspection*) pelo método de ultrassom, para inspeção de falhas de laminação. Finalmente, o barril segue para uma máquina do tipo *MTGRS*, onde será realizada a montagem dos reforços estruturais (nervuras e longarinas) do barril, através da instalação dos fixadores definitivos.

É importante reforçar que para esse conceito, todas as movimentações que ocorrem no ambiente de produção são realizadas com auxílio de um dispositivo flexível de manufatura denominado *AVG*, que efetua todos os deslocamentos necessários. Essa característica permite a execução das movimentações em solo, o que descarta a necessidade do uso de ponte rolante, além de minimizar riscos de acidentes.

Outro fator importante que merece destaque é a quantidade mínima de monumentos de ferramentais instalados no piso do hangar, o que além de contribuírem significativamente para a minimização dos custos agregados ao projeto do sistema produtivo, também irá favorecer as características de flexibilidade e modularidade da linha de montagem.

A Figura 6.5 representa o *layout* em planta da *Linha B*, mostrando a disposição dos gabaritos, ferramentais e máquinas, os fluxos de materiais e também a área em uso no hangar.

FIGURA 6.5 – Vista em planta da *Linha B*

Com base na representação gráfica mostrada acima, podemos evidenciar o conceito de fluxo contínuo e livre do produto ao longo da linha de produção, o que auxilia na redução do número de interferências e favorece o detalhamento do projeto do *layout*.

Além das vantagens pertinentes a fluxo, foi possível também a obtenção de benefícios relacionados com tamanho de área útil de hangar, simplificação da linha, flexibilidade, maior integração dos processos relacionados e número reduzido de mão de obra no processo.

A Figura 6.6 retrata o *VSM* desse conceito de fabricação, mostrando o mapeamento do fluxo de valor agregado ao processo em questão.

FIGURA 6.6 – VSM da Linha B

Frente às características de cada um dos 02 conceitos aqui apresentados e concebidos para a mesma finalidade, é importante primeiramente mostrar a relação dos investimentos em automação para cada projeto, para efeito de comparação financeira.

A Tabela 6.1 reporta os valores aproximados para cada um dos sistemas que compõem cada projeto, de modo a evidenciar o montante dos custos agregados em cada solução.

TABELA 6.1 – Investimentos em automação + periféricos

Linha A	Qtd	Sistema	Unidade	Total	\$16,400,000.00
	02	Robôs furacão + 7° eixo	1,500,000.00	3,000,000.00	
	02	C-frame	3,500,000.00	7,000,000.00	
	01	MTGRS	4,500,000.00	4,500,000.00	
	01	Ponte rolante	1,000,000.00	1,000,000.00	
	06	Gabarito painel	50,000.00	300,000.00	
	02	Gabarito meia-concha	90,000.00	180,000.00	
	02	Ferramental C-frame	45,000.00	90,000.00	
	02	Plataforma MTGRS	100,000.00	200,000.00	
	02	Carro de apoio segmento	65,000.00	130,000.00	
Linha B	Qtd	Sistema	Unidade	Total	\$12,860,000.00
	01	Robô usinagem + 7° eixo	1,100,000.00	1,100,000.00	
	01	AFP	4,000,000.00	4,000,000.00	
	01	MTGRS	4,500,000.00	4,500,000.00	
	01	Mandril	1,000,000.00	1,000,000.00	
	01	Autoclave	1,500,000.00	1,500,000.00	
	01	AVG	200,000.00	200,000.00	
	02	Carro suporte mandril	75,000.00	150,000.00	
	01	Sistema telescópio MTGRS	300,000.00	300,000.00	
	02	Carro de apoio barril	55,000.00	110,000.00	

Com base nos dados da Tabela 6.1 apresentada acima, nota-se que os gastos em sistemas automáticos de manufatura foram menores para a *Linha B*, contribuindo assim para uma redução no tempo de retorno do investimento aplicado ao projeto, ou seja, no *payback*.

Ainda no contexto financeiro, pode-se também analisar o custo para área construída de piso de hangar, considerado aqui nesse trabalho um valor médio de US\$ 1.500 por m². Sendo assim, percebe-se que o uso de uma área menor para o projeto da *Linha B*, contribui também para uma redução significativa nos custos em infraestrutura.

A seguir, a Tabela 6.2 traz esses valores comparativos para os 02 projetos.

TABELA 6.2 – Custos de infraestrutura em piso de hangar

	Largura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Valor m ² (US\$)	Custo piso de hangar (US\$)
Linha A	70	40	2800	1500	4,200,000.00
Linha B	62	25	1550	1500	2,325,000.00

É importante reforçar que adicionado aos dispêndios com sistemas de automação e obras de infraestrutura, a redução do número de componentes na montagem dos segmentos de fuselagem contribui também para uma minimização nos gastos recorrentes com elementos para fixação das partes (fixadores), necessários para junção dos componentes do produto.

Além dos ganhos tangíveis comprovados até aqui, as Tabelas 6.3 e 6.4 mostram os outros tipos de ganhos chamados intangíveis e estratégicos, obtidos mediante a aplicação do modelo de análise durante o desenvolvimento do projeto da *Linha B*.

Portanto, é possível visualizar quais requisitos relacionados ao DF_{ATM} e *Lean*, foram atendidos em função da aplicação do modelo de análise nas fases de produto e processos.

TABELA 6.3 – Atendimento aos requisitos Fase 01

Projeto do produto	<ul style="list-style-type: none"> ★ Usar novos materiais ★ Provisionar para automação ★ Reduzir o número de componentes
Peso do produto	<ul style="list-style-type: none"> ★ Atender requisitos ★ Favorecer autonomia
Definição dos fixadores dos componentes	<ul style="list-style-type: none"> Qualificar fornecedores Avaliar custo x benefício ★ Permitir automação ★ Buscar padronização Instalar > n° / minuto
Concepção dos ferramentais de apoio	<ul style="list-style-type: none"> ★ Reduzir número de gabaritos ★ Buscar conceito <i>jigless</i> ★ Conceber gabaritos híbridos

TABELA 6.4 – Atendimento aos requisitos Fase 02

Definição do Fluxo Produtivo	<ul style="list-style-type: none"> ★ Assegurar fluxo contínuo ★ Garantir fluxo livre ★ Buscar a movimentação em linha
Projeto do <i>Layout</i>	<ul style="list-style-type: none"> ★ Dimensionar na menor área possível ★ Buscar um <i>layout</i> híbrido / flexível ★ Absorver aumento de demanda ★ Integrar todos os processos Reduzir tráfego de materiais e pessoas
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> Facilitar as tarefas de manutenção Implementar a <i>TPM</i> ★ Prever condições para <i>setup</i> externo
Flexibilidade / Modularidade	<ul style="list-style-type: none"> ★ Ser capaz em absorver oscilações de demanda ★ Assegurar processamento de diferentes produtos ★ Permitir a incorporação de módulos adicionais ★ Absorvar necessidades de mudança no <i>layout</i>
Ergonomia e Segurança	<ul style="list-style-type: none"> ★ Garantir todas as condições de segurança para as pessoas Reduzir ao máximo a exposição do ser humano a ambientes hostis

Deste modo, as evidências demonstradas nesse estudo de caso comprovam que a aplicação do modelo de análise durante as fases de desenvolvimento do projeto, contribui significativamente para a agregação de valor de ordens financeira e estratégicas para as empresas do setor aeronáutico, favorecendo assim o aumento no nível de competitividade junto ao mercado.

Para validação dos ganhos tangíveis obtidos com o uso do modelo, utilizou-se também ferramentas de manufatura digital e CIM, para análises de geometrias, movimentações, fluxos e cargas e capacidades dos sistemas produtivos, por meio de pacotes de simulações virtuais como *CATIA*, *DELMIA* e *QUEST* da *Dassault Systems*.

É importante frisar que as validações do modelo de análise proposto foram realizadas somente no contexto de desenvolvimento, em ambiente de engenharia simultânea.

6.2. Estudo 02 – Fabricação de peças primárias

Esse segundo estudo de caso aqui apresentado, demonstra as vantagens e benefícios alcançados com o uso do modelo de análise desenvolvido, no tocante ao processo produtivo somente, sem considerar o projeto do produto.

Serão tratados aspectos referentes à fabricação de peças primárias de aviões, através dos processos de usinagem e pintura.

Quando são comparados os 02 (dois) projetos de automação com a mesma finalidade de aplicação, sendo o primeiro concebido sem a aplicação do modelo de análise proposto, e outro, em que a ferramenta foi aplicada para agregação dos conceitos de *Lean Manufacturing* no projeto dos processos de fabricação, pode-se visualizar facilmente carências e falhas que poderiam ter sido evitadas no processo produtivo.

A aplicação em questão refere-se ao desenvolvimento de uma solução automática para fabricação de peças metálicas em alumínio utilizadas em aeronaves de pequeno porte, onde os processos relacionados são usinagem, pintura, movimentação e identificação das peças.

Os principais objetivos dessa aplicação são: aumento de produtividade, flexibilidade, melhoria da qualidade do produto, redução nos custos com manutenção, minimização de desperdícios e sobras, além de fatores ocupacionais como exposição do homem a agentes nocivos e ergonomia.

Nesse estudo de caso foram considerados 02 projetos, denominados *células (A e B)*, onde a *célula A* foi concebida sem a aplicação do modelo de análise, e já a *célula B* com aplicação do fluxograma da Fase 02 do modelo, referente aos métodos e processos.

A Figura 6.7 mostra o *layout* do projeto da *célula A*, concebida sem a utilização do modelo de análise.

FIGURA 6.7 – Fabricação de peças primárias – *Célula A*

Essa solução é uma célula automática enclausurada com sistema de segurança, composta por 03 robôs (01 convencional, 01 convencional + 7° eixo e 01 robô de pintura), 03 mesas de trabalhos independentes, 01 unidade dosadora para tintas bi-componente, 01 IHM, 01 sistema porta-ferramenta e 01 prateleira para depósito de peças acabadas.

O processo automático consiste na alimentação manual dos *blanks* de alumínio na mesa de usinagem, de modo que o robô convencional possa iniciar o processo de fabricação. O robô com 7° eixo montado sobre o trilho é responsável pela manipulação das peças entre as estações de trabalho e identificação final das peças acabadas. Após o processo de usinagem, as peças são posicionadas pelo robô de manipulação (com 7° eixo) na estação de pintura para a aplicação de tinta e posterior secagem. Em seguida o robô manipulador retira as peças pintadas e as coloca na mesa frontal para posterior identificação. Após a identificação, esse mesmo robô posiciona as peças acabadas na prateleira de estocagem.

Em seguida, a Figura 6.8 mostra um conceito diferente, desenvolvido também para o mesmo processo de fabricação, denominada *célula B*, agora concebido através da aplicação da Fase 02 do modelo de análise desenvolvido nesse trabalho.

FIGURA 6.8 – Fabricação de peças primárias – *Célula B*

O projeto contempla uma célula automática enclausurada com sistema de segurança, composta por 02 robôs (01 convencional + 7º eixo e 01 robô de pintura), 01 sistema de movimentação sincronizado com mesas giratórias integradas, 01 unidade dosadora para tintas bi-componente, 01 IHM e 01 sistema porta-ferramenta.

O processo automático inicia-se com a alimentação manual dos *blanks* de alumínio na primeira mesa do sistema de movimentação, que é responsável por transportar as peças ao longo do fluxo produtivo, passando por todos os processos de fabricação necessários, sem que ocorra a desindexação das peças durante o processo.

O robô com 7º eixo montado sobre o trilho é responsável pelo processo de usinagem e posterior identificação final das peças, após a aplicação do processo de pintura realizado por um robô dedicado para essa finalidade. A transferência das peças entre as estações de trabalho é realizada pelo sistema de movimentação de mesas integradas através do sincronismo do processo, através de CLP e pneumática.

Analisando tecnicamente os projetos das 02 células com foco no desenvolvimento de um processo voltado para a automação e baseado nos conceitos do *Lean*, podemos evidenciar o progresso e os resultados positivos alcançados com a aplicação do modelo de análise.

Durante a concepção da *célula B*, as verificações contidas no modelo de análise foram seguidas e alguns dos requisitos pertencentes ao fluxograma do modelo (somente Fase 02) aplicados ao projeto, conforme descrito na tabela abaixo:

TABELA 6.5 – Aplicação dos requisitos do modelo

Definição do Fluxo Produtivo	<ul style="list-style-type: none"> ★ Assegurar fluxo contínuo Garantir fluxo livre ★ Buscar a movimentação em linha
Projeto do <i>Layout</i>	<ul style="list-style-type: none"> ★ Dimensionar na menor área possível Buscar um <i>layout</i> híbrido / flexível Absorver aumento de demanda ★ Integrar todos os processos ★ Reduzir tráfego de materiais e pessoas
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> Facilitar as tarefas de manutenção Implementar a <i>TPM</i> ★ Prever condições para <i>setup</i> externo
Flexibilidade / Modularidade	<ul style="list-style-type: none"> ★ Ser capaz em absorver oscilações de demanda Assegurar processamento de diferentes produtos Permitir a incorporação de módulos adicionais Absorver necessidades de mudança no <i>layout</i>
Ergonomia e Segurança	<ul style="list-style-type: none"> ★ Garantir todas as condições de segurança para as pessoas ★ Reduzir ao máximo a exposição do ser humano a ambientes hostis

Mediante a aplicação dos requisitos do modelo, conforme mostrado na Tabela 6.5, o projeto da célula de fabricação de peças primárias foi obtido de modo que contemplasse a maior quantidade das características esperadas possíveis.

A Figura 6.9 traz a comparação entre as *células A e B*, onde é possível evidenciar as vantagens para o processo quando se utiliza o modelo de análise no projeto dos processos.

Requisitos	<p><i>Célula A</i></p> <p>(sem o uso do modelo)</p>	<p><i>Célula B</i></p> <p>(<u>com</u> o uso do modelo)</p>
<p>Fluxo contínuo e setup externo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo não contínuo com mais de um processo em uma mesma estação; - Necessidade de paradas no processo para trocas de ferramentas e reabastecimento dos reservatórios de tintas. <p><u>Perdas</u>: aumento do ciclo em virtudes da necessidade de paradas da célula.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fabricação em fluxo contínuo com posições dedicadas para cada processo e sem refluxos; - Sistemas auxiliares como porta-ferramenta e reservatórios de tintas localizados em regiões externas à célula. <p><u>Benefícios</u>: aumento de produtividade e ausência de intervenções e paradas.</p>
<p>Movimentação do produto em linha</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Produto se movimenta em círculo ao longo do processo com necessidade de giro das peças nas estações de trabalho por meio do robô de manipulação. <p><u>Perdas</u>: atrasos no processo e perdas de precisão.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de movimentação contínuo com giro automático independente em cada mesa, sem a necessidade de remoção da peça e posterior indexação na próxima estação. <p><u>Benefícios</u>: rapidez no processo e melhora na precisão final.</p>

<p>Ergonomia e Segurança</p>	<p>- IHM e prateleira de peças acabadas dentro da área de segurança da célula.</p> <p><u>Perdas</u>: probabilidade de acidentes quando o operador entra na célula para operação do IHM e retirada de peças.</p>	<p>- IHM posicionado externamente à célula e ausência de local para armazenamento de peças.</p> <p><u>Benefícios</u>: separação do homem da máquina para evitar acidentes e ausência de <i>WIP</i>.</p>
<p>Uso do espaço físico e layout</p>	<p>- Arranjo físico não otimizado e utilização de maior área (15m x 15m) para disposição dos equipamentos dentro da célula.</p> <p><u>Perdas</u>: utilização de área física maior que o necessário.</p>	<p>- Utilização de menor área (20m x 7m) para os equipamentos e execução do mesmo processo de fabricação.</p> <p><u>Benefícios</u>: redução de espaço físico, redução de custos e um <i>layout</i> mais enxuto.</p>
<p>Tráfego de pessoas e materiais</p>	<p>- Utilização de um maior número de robôs e prateleira para estocagem de peças.</p> <p>- Estações de trabalho com mesas independentes sem sistema de giro automático.</p> <p><u>Perdas</u>: aumento do custo da solução automática e menor integração dos processos relacionados.</p>	<p>- Redução no número de robôs e eliminação de prateleira para peças acabadas.</p> <p>- Sistema dedicado para movimentação, transferência e giro automático das peças.</p> <p><u>Benefícios</u>: redução de custos com equipamentos, facilidade na locomoção de pessoas e de movimentação de materiais.</p>
<p>Integração de processos e capacidade em absorver oscilações de demanda</p>	<p>- Menor sincronismo entre os processos envolvidos;</p> <p>- Necessidade de giro das peças e reindexação das peças nas mesas pelo robô de manipulação.</p> <p><u>Perdas</u>: perda de precisão ao longo do processo e probabilidade de defeitos no produto final acabado.</p>	<p>- Processo totalmente integrado ao ritmo de produção contínuo;</p> <p>- Peças indexadas ao longo de todo o processo sem a necessidade de novos reposicionamentos.</p> <p><u>Benefícios</u>: menor variabilidade do processo, gerando melhoria na precisão e possibilidade de processamento de um volume maior de produção.</p>

FIGURA 6.9 – Comparação entre as Células A e B

Frente aos resultados demonstrados, evidenciam-se os ganhos, vantagens e benefícios alcançados com a utilização do modelo de análise aqui desenvolvido, quando os requisitos do fluxograma são aplicados durante o desenvolvimento dos métodos e processos de um projeto que visa a automação da manufatura.

Por fim, os gráficos abaixo mostram a comparação dos ganhos tangíveis dos projetos das 02 células, frente aos requisitos de análise aplicados, onde é possível visualizar os ganhos obtidos com a aplicação do modelo de análise para o projeto da *célula B*.

FIGURA 6.10 – Tempo de ciclo para processamento de uma peça

FIGURA 6.11 – Tempo de paradas necessárias para movimentação de peças

FIGURA 6.12 – Custos de área para instalação da célula

FIGURA 6.13 – Investimento para compra de robôs

Além das vantagens e ganhos tangíveis (mensuráveis) evidenciados acima mediante o uso de softwares de manufatura digital, também foram alcançados ganhos intangíveis de extrema importância para os aspectos pertinentes à saúde e segurança ocupacional. Nesse caso, a separação do homem da máquina, possibilita a ausência da exposição humana perante o processo de fabricação, eliminando potencialmente os riscos de acidentes.

7. CONCLUSÕES

7.1. Conclusões sobre a ferramenta desenvolvida

Tomando como base os resultados apresentados nesse trabalho de pesquisa, certifica-se que a aplicação do modelo de análise aqui desenvolvido, e fundamentado nas metodologias de projeto *DFX (Design for Excellence)* e *Lean Manufacturing*, contribui para a concepção de um projeto de automação mais competitivo, baseado nos direcionadores tecnológicos.

A validação do modelo proposto mostrado nos estudos de caso foi realizada através de simulações virtuais somente no ambiente de desenvolvimento, por meio do uso de softwares de manufatura digital específicos para estas aplicações, tais como: *CAD/CATIA*, *DELMIA* e *QUEST*.

O modelo de análise apresentado coopera significativamente na redução dos ciclos de produção, melhora a qualidade final dos aviões perante a satisfação dos clientes, diminui os custos com ferramentais rígidos, reduz gastos com manutenção de máquinas manuais, evita desperdícios com movimentações, além dos ganhos intangíveis relacionados com ergonomia, saúde e segurança e de ordens estratégicas, conforme apresentado nos capítulos anteriores.

As evidências, dados, informações e registros obtidos através de experiências práticas no desenvolvimento de outros projetos no ambiente da indústria aeronáutica, porém sem o uso do modelo de análise, mostraram problemas e dificuldades que poderiam ter sido evitados e sanados durante as fases de desenvolvimento do projeto, ou seja, durante as fases 01 e 02, momento adequado para aplicação dos conceitos do *DF_{ATM}* e *Lean*. Isso pode ser observado nos projetos mostrados nos estudos de caso, quando do uso e não uso do modelo.

Além disso, trocas de experiências com outros profissionais da área de desenvolvimento de projetos dessa natureza, permitiram identificar quais os principais e mais importantes pontos a serem considerados na concepção de um projeto com foco em automação. Foi com base nisso, que se desenvolveu o aqui chamado *Modelo de Análise para Automação da Produção*, para que pudesse ser adotado como um instrumento facilitador para o desenvolvimento de projetos no ambiente da indústria aeronáutica.

Percebe-se ainda que o *Modelo de Análise para Automação* desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado com maior ênfase nas seguintes situações:

- Como instrumento de treinamento e meio de disseminação das metodologias *DFMA/DFX* e *Lean Manufacturing*, no intuito de auxiliar na capacitação de novos engenheiros que atuam no desenvolvimento de projetos de automação, dentro do ambiente de manufatura aeronáutico;
- Como ferramenta e roteiro dos requisitos mais importantes a serem analisados e assegurados durante o desenvolvimento dos projetos;
- Como entrada de dados para armazenamento do histórico de soluções aplicadas na concepção de projetos nos diferentes segmentos da aviação;
- Como base de dados para consultas pelas diferentes áreas de engenharia (Produto, Manufatura, Ferramental, PPCP, Segurança, Produção, Manutenção, Infraestrutura, etc.), em caso de necessidades de análises futuras e eventuais modificações no projeto, além de estudos para definição de novos processos;
- Como metodologia complementar à literatura disponível, visando maximizar os benefícios auferíveis. Por se tratar de uma ferramenta específica, o modelo permite a identificação antecipada de problemas de produto e processos no projeto da aeronave, dificilmente identificados através de análises exclusivas com ferramentas padrão e atuação de pessoas inexperientes no assunto.

É importante salientar que esta ferramenta foi elaborada para atender principalmente as necessidades de projeto do produto e das áreas de fabricação e montagem de componentes de aviões, fases estas em que se demanda maior quantidade de mão de obra direta envolvida, altos ciclos de produção e probabilidades da ocorrência de defeitos, falhas e desperdícios.

Entretanto, pelo fato de ter sido fundamentado nos conceitos básicos das metodologias *DFMA/DFX* e *Lean Manufacturing*, o modelo de análise desenvolvido pode ser utilizado para integração com outros processos industriais relacionados, gerando contribuição no sentido de preparar os processos para a produção automatizada.

Foi verificado através de análises, trocas de experiências com profissionais da área e envolvimento em ambientes de engenharia simultânea, que os benefícios buscados através da aplicação das metodologias da literatura (*DFX* e *Lean*), podem também ser alcançados com maior eficiência com a aplicação do *Modelo de Análise para Automação*, desenvolvido aqui neste trabalho de pesquisa.

Finalmente, conclui-se que a ferramenta de análise apresentada, atende grande parte dos requisitos exigidos pelo mercado competitivo, orientando para um projeto com foco em automação da manufatura, podendo ainda ser utilizado como instrumento para difusão dos conceitos das metodologias de base, além de complemento para casos e estudos complexos de desenvolvimentos de novos negócios.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

A contribuição dessa tese poderá servir de base para trabalhos futuros relacionados com as metodologias de Projeto para Excelência (*DFX*) e Produção Enxuta (*Lean*), além de possibilitar a expansão para outras frentes de estudos relacionados com os temas abordados.

Como propostas para trabalhos futuros pode-se citar:

- Expansão da aplicação da metodologia Projeto para Excelência (*DFX*) para outros atributos dentro da indústria aeroespacial;
- Disseminação e incorporação desse modelo de análise no ambiente de Engenharia Simultânea;
- Apresentação desse modelo de análise em forma de programa computacional, que auxilie os engenheiros de desenvolvimento através de um software;
- Uso mais intenso da manufatura digital (CAD /CAM /CIM) junto a processos automáticos e flexíveis de manufatura;
- Gestão estratégica e ganhos em competitividade obtidos com implantação de sistemas automáticos na fabricação e montagem de produtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEX, S. et al. **Space utilization improvement in CNC machining unit through lean layout**. SAS TECH Journal, v.9, Issue 2, September 2010.

APMANM, H. **Automated Handling of CFRP – Material for frame and stringer production**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Charleston, US, September 2008.

ARIS, R B. **Maintenance Factors in Building Design**. Tese (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil – Universidade de Tecnologia da Malásia, Maio 2006.

BAI, Y. **Intelligent painting process planner for robotic bridge painting**. Journal of Construction Engineering and Management, v.133, n°4, p.335-342, 2007.

BAKKER O. J. et al. **Fixturing and Tooling for Wing Assembly with Reconfigurable Datum System Pickup**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Toulouse, France, October 2011.

BAKKER, O. J. **Control Methodology and Modelling of Active Fixtures**. Ph.D. thesis, University of Nottingham, School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, Nottingham, 2010.

BAHA II, S.; HESEBECK, O. **Simulation of the Solid Rivet Installation Process**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Wichita, KS, US, September 2010.

BARBOSA, G. F. **Aplicação da metodologia DFMA – Design for Manufacturing and Assembly no projeto e fabricação de aeronaves**. EESC USP, São Carlos, 2007.

BEAUCHAMP, Y.; STOBBE, T. J. **A review of experimental studies on human-robot system situations and their design implications**. International Journal of Human Factors in Manufacturing, v.5, n°3, p.283-302, 1995.

BECROFT, S. A. **Automated Painting for Aerospace, Challenges, Newer Technologies and Lessons Learned**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Dallas, US, September 2012.

BOEING Literature. **Tactics to Improve Operational Efficiency**. 2002.

BON, A. T.; PING, L. P. **Implementation of Total Productive Maintenance (TPM) in Automotive Industry**. IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), Langkawi, Malaysia, 2011.

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

BOSSI, R.; IDDINGS F.; WHEELER G. **Nondestructive Testing Handbook**. Radiographic Testing, v.4, 3rd ed, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, 2002.

BOUZON, M. Produção Enxuta: Um **Modelo Toyota de Sucesso e seus Impactos na Logística**. Disponível em: <<http://www.gelog.ufsc.br/Publicacoes/20062/tps.pps>>. Acesso em 12/02/2008.

BOYES, W. E., Jigs e fixtures. Michigan: Society of manufacturing Engineers, 1980.

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.

BRIAN, D. **Cutting costs and lead times**. Professional Engineering, ABI/INFORM Complete, p.39, September, 2005.

BRIDGEWATER, C. **Principles of Design for Automation applied to construction tasks**. Automation in Construction 2 p.57-64, 1993, London UK, 1993.

BROWN, C. **Offset Fastening Flex Track**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Dallas, US, September 2012.

CALABRESE, G. **The employment effects of flexible integrated automation in small and medium firms: evidence from the Italian case**. Integrated Manufacturing Systems, v.6, p.35-41, Torino, Italy, 1995.

CAMPBELL Jr, F. **Manufacturing Processes for Advanced Composites**. Elsevier, Amsterdam, 2004.

CARNEIRO, F. L. **O Sistema de Produção Enxuta e sua Implantação na Volkswagen do Brasil**. São Carlos, 2003.

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

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

CORLISS, B. **"What's new, different about the 787"**. The Daily Herald, United States, June 21st, 2009.

CROW, K. **Design for manufacturability / assembly guidelines**, 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.

DEMING, W. E. **Qualidade: A Revolução da Administração**. Rio de Janeiro: Marques Saraiva, 1990.

DIERSSEN, T.; BLOEDORN, C.; MEHLENHOFF T. **Solution for Dry-Fiber-Placement with a Standard Articulating Robot System**. SAE International, Wichita, KS, US, September 2011.

DINIZ, R. E. S. **Parceria industrial sem envolvimento acionário, com foco nas fases de projeto e fabricação (setor aeronáutico)**. Dissertação de mestrado, POLI USP, SP, 1998.

DRIRA, A.; PIERREVAL, H., HAJRI-GABOUJ, S. **Facility layout problems: A survey**. Annual Reviews in Control, v.31, p. 255–267, 2007.

DUAN, F.; TAN, J. T. C.; ARAI, T. **Using motion capture data to regenerate operator's motions in a simulator in real time**. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, p.102-107, 2008.

EDWARDS, K. L. **Internet applications in product design and manufacturing**. Materials and Design, Surrey - England GB, 25 (6), p.541-542, September 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, October 2002.

EDWARDS, W. K.; POOLE, E. S.; STOLL, J. **Security Automation Considered Harmful?** School of Interactive Computing and GVU Center - Georgia Institute of Technology, p.33-42, Atlanta, GA, September 2007.

EHINGER, C.; HOFFMANN, A.; REIF, W.; REINHART, G. **Design of an automation system for preforming processes in aerospace industries**. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, p.557-562, Trieste, Italy, August 2011.

EHINGER, C; HOFFMANN, A; REIF, W; REINHART, G; STRASSER, G. **Automated cutting and handling of carbon fiber fabrics in aerospace industries**. 6th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2010, p.861-866, Toronto, Canada, August 2010.

ETTLIE, J. E. **Integrated design and new product success**. Journal of Operations Management 15 p.33-55, 1997.

FEIKERT, E.; DEVLIEG, R. **One-up assembly with robots**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Charleston, US, September 2008.

FERREIRA, M. J. B. et al. **Indústria Aeronáutica**. Relatório de Acompanhamento Setorial ABDI/NEIT-IE-UNICAMP, Vol.1, Brasília, Março 2008.

FERREIRA, M. J. B. et al. **Indústria Aeronáutica**. Relatório de Acompanhamento Setorial ABDI/NEIT-IE-UNICAMP, Vol.3, Brasília, Junho 2009.

FERREIRA, M. J. B. et. Al. **Indústria Aeronáutica**. Relatório de Acompanhamento Setorial ABDI/NEIT-IE-UNICAMP, Vol.4, Brasília, Dezembro 2009.

FERRO, J. R. **A Essência da Ferramenta “Mapeamento do Fluxo de Valor”**, 2007.

FOGLIATTO, F. S.; FAGUNDES, P. R. M. **Troca Rápida de Ferramentas Proposta Metodológica e Estudo de Caso**. In Revista Gestão & Produção. São Carlos: Cubo, v. 10, n.2, 2003.

FRANCISCHINI, P. G. **Troca Rápida de Ferramentas – SMED**, 2008.

FULKERSON, B. **A Response to Dynamic Change in the Market Place**. Journal of Decision Support Systems, v.21, p.199-214, 1997.

GERHARDT, M. P. **Sistemática para Aplicação de Procedimentos de Balanceamento em Linhas de Montagem Multi-Modelos**. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GHINATO, P. **Elementos Fundamentais do Sistema Toyota de Produção**. In: ALMEIDA, A.T. & SOUZA, F. M. C. **Produção e Competitividade: Aplicações e Inovações**. Recife: Editora da UFPE, 2000.

GHINATO, P. **Sistema Toyota de Produção: Mais do que um simplesmente Just-in-Time**. Caxias do Sul: Editora da Universidade de Caxias do Sul, 1996.

GRIMAS, W. **Método para Análise e Melhoria do Processo**, 2008.

GROVER, M. P. *et al.* **Robótica: tecnologia e programação**. São Paulo. McGraw-Hill, 1988.

HASAN, M. A.; SARKIS, J.; SHANKAR, R. **Agility and production flow layouts: An analytical decision analysis**. Computers & Industrial Engineering, December 2011.

HERKT, M. *et al.* **Automatic Handling of Carbon Fiber Preforms for CFRP Parts in Aerospace**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Dallas, US, September 2012.

HINES, P.; RICH, N. **The seven value stream mapping tools**. International Journal of Operations & Production Management, v.17, nº1, p. 46-64. MCB University Press, 1997.

HOGAN, B, J. **Aerospace Materials: What Will Builders Use?** Manufacturing Engineering, V.146 (3), p. 89-90, 92-94, 96-98, United States, March 2011.

HOLDEN, R. **Methods for Metrology Assisted Composite Part Production Part 1**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Wichita, KS, US, September 2010.

HORTA, C. L.; ROZENFELD, H. **DFMA (Design for manufacturing and assembly)**, 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.

HUMMEL, P. M. **New Cutting Tools for Repairs of Composites**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Dallas, US, September 2012.

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, February 2007.

ISA, K.; TSURU, T. **Cell production and workplace innovation in Japan: towards a new model for Japanese Manufacturing?** Industrial Relations, v.41, n°4, p. 548-578, 2002.

JAYAWEERA, N. et al. **Flexible Tooling for Wing Box Rib Clamping and Drilling.** SAE International Journal of Aerospace, v.4, n° 2, p. 1048-1056, November 2011.

JIAO, J. R.; SIMPSON, T. W.; Siddique, Z. **Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review.** Springer Science Business Media, LLC July 2007.

JOHNSON, C.; YE, C.; JAYAWEERA, N.; WEBB, P. **Robotic assembly of aero-engine components.** Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Charleston, US, September 2008.

JONSSON, P.; LESSHAMMAR, M. **Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems – The role of OEE.** International Journal of Operation & Production Management, 1999.

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

KAUFMANN M.; ZENKERT D.; WENNHAGE P. **Integrated cost/weight optimization of aircraft structures.** Springer-Verlag, Industrial application, p.325-334, 2009.

KEIL, S. *et al.* **Establishing continuous flow manufacturing in a Wafertest-environment via value stream design.** 22nd Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, NY, US, May 2011.

KINGSLEY, J. M. **Airbus focuses on family commonality as it begins A350-800 detailed design.** Flight international, London, 28 Apr 2010.

KISCH, R. A. **Automated Fiber Placement Historical Perspective.** Boeing, Seattle 2006.

KLIPPEL CONSULTORES ASSOCIADOS. **O Sistema Toyota de Produção,** 2007.

KLOC, A. E.; KOSCIANSKI, A.; PILATTI, L. A. **Robótica: uma ferramenta pedagógica no campo da computação**. I Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia (PPGECT), 2009.

KOSAKA, G. I. **Jidoka**. In: Lean Summit – 2006. São Paulo – SP, 2006.

KOSUGE, K. et al. **Robot-human collaboration for new robotic applications**. Proc. of the 20th International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation, v.2, p.713-718, 1994.

KUNDE, W. G. **Setup rápido: uma atividade que alia o conhecimento técnico e a criatividade**. Gestão da Produção e Qualidade, Novembro, 2009.

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.

LEWIS, A. **Wing assembly jigs – the strategy for the future**. Cranfield University, BAE Fellowship in Manufacturing Management, October 1993.

LIBEROPOULOS, G.; KOZANIDIS, G.; TSAROUHAS, P. **Performance Evaluation of an Automatic Transfer Line with WIP Scrapping During Long Failures**. Manufacturing & Service Operations Management, n^o9, p.62-83, 2007.

LOPES, K. L. G. V. **Introdução a Automação Industrial**. Branqs Automação, 2007.

LUIS, S.; ROZENFELD, H. **Análise de Valores**, 2008.

LUZ, A. R. C., BUIAR, D. R. **Mapeamento do Fluxo de Valor – Uma Ferramenta do Sistema de Produção Enxuta**. In: XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Florianópolis, SC, 2004.

MARTINS, W. C. **Estratégias para Qualificação de Fornecedores - Como Proceder?** www.racine.com.br / Setor Industrial, Setembro, 2010.

MC KONE, K. E.; SCHROEDER, R. G., CUA, K. O. **Total productive maintenance: a contextual view**. Journal of Operations Management, v.17, p.123-44, 1999.

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

MELHADO, S. B.; MESQUITA, M. J. M. **Gestão do Ciclo de Vida do Empreendimento: Estratégias para eficiência e eficácia com base na interface Operação – Concepção**. IV SIBRAGEC – Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção. Porto Alegre, 2005.

MENEZES, R. L. **Aplicação de Conceitos e Técnicas de Produção Enxuta em um Sistema de Manufatura**. São Carlos – SP, 2003. Monografia (Graduação). Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MEHLENHOFF, T.; BLOEDORN, C. **Solution for Automated Drilling in Composite Structures with a Standard Articulating Robot System**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Wichita, KS, US, September 2010.

MEYER, J. D. **Applications of robots**. International Encyclopedia of Robotics: Applications and Automation, New York 1988.

MIDDLETON, D. H., **Composite Materials in Aircraft Structures**. Longman Scientific & Technical, 1990.

MIKKOLA, J. H.; GASSMANN, O. **Managing modularity of product architectures: Towards an integrated theory**. IEEE Transactions on Engineering Management, v.50(2), p.204–218, 2003.

MILLS, A. **Automation of carbon fibre preform manufacture for affordable aerospace applications**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, V.32 (7), p. 955-962, UK, July 2001.

MOREIRA, E. A.; MIGUEL, P. A. C. **Relato de um caso dos primeiros passos sobre a aplicação da produção enxuta em processos administrativos**. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Porto Alegre-RS, 2005.

MUELANER, J. E.; WANG, Z.; MAROPOULOS, P. G. **Concepts for and analysis of a high accuracy and high capacity (HAHC) aerospace robot**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, p.1393-1399, UK, July 2011.

MUELANER, J. E.; MARTIN, O.; MAROPOULOS, P. **Metrology Enhanced Tooling for Aerospace (META): Strategies for Improved Accuracy of Jig Built Structures**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Toulouse, France, October 2011.

MULAZIMOGLU, H. **The Effects of Surface Texture on Fretting Fatigue between Fastener and Aluminum Structure**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Wichita, KS, US, September 2010.

MULLER, R. et al. **Development of Modular Low Cost Automation Systems for Aircraft Assembly**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Toulouse, France, October 2011.

NAING, S. **Feature Based Design for Jigless Assembly**. School of Industrial and Manufacturing Science, PhD Thesis, Cranfield University, June 2004.

NAVON, R.; SHPATNITSKY, Y. **Field experiments in automated monitoring of road construction**. J. Constr. Eng. Manage., v.131(4), p.487–493, 2005.

NEWCOMB, P. J.; BRAS, B.; ROSEN, D. W. **Implications of modularity on product design for the life cycle**. ASME design engineering technical conferences, DETC96/DTM-1516, Irvine, CA, 1996.

OBORSKI, P. **Man-machine interactions in advanced manufacturing systems**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.23, n°3-4, P. 227-232, 2004.

OLIVEIRA, J. H. I. **Desenvolvimento do processo de fabricação de laminados de material composto polimérico de fibra de vidro para aplicação na indústria aeronáutica.** Trabalho de pós-graduação, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

O'ROURKE, B. **Automation for Unprecedented Production Rates.** SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Dallas, US, September 2012.

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

PATTERSON, J. W. et al. **Adapting Total Productive Maintenance to Asten, Inc.** Production and Inventory Management Journal, v.37 n°.4, p.32-37, 1996.

PRASAD, B. **Concurrent engineering fundamentals, integrated product and process organisation.** Prentice Hall, London, 1996.

PICKETT, N. et al. **A Framework to Support Component Design in Jigless Manufacturing.** SAE Aerospace Manufacturing Technology Conference & Exposition, Bellevue, WA, US, June, 1999.

POLLOCK, H. W. **Tool design.** 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1988.

POTKONJAK, V. et al. **Dynamics of anthropomorphic painting robot: Quality analysis and cost reduction.** Robotics and Autonomous Systems v.32, p.17–38, 2000.

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, June 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.

QIAO, G.; LU, R.; MC LEAN, C. **Flexible Manufacturing System for Mass Customization Manufacturing**. Inderscience Enterprises Ltda, 2006.

RENTES, A. F.; QUEIROZ, J. A.; ARAUJO, C. A. C. **Transformação Enxuta: Aplicação do Mapeamento do Fluxo de Valor em uma Situação Real**. In: XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Florianópolis-SC, 2004.

RENTES, A. F.; NAZARENO, R. R.; SILVA, A. L. **Mapeamento do Fluxo de Valor para Produtos com Ampla Gama de Peças**. In: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto-MG, 2003.

REID, E. M.; MERKLEY A. **Optimization Methods for Portable Automation Equipment Utilizing Motion Tracking Technology**. SAE International Journal of Aerospace, v.4, nº 2, p.1184-1190, November 2011.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. **O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, nº 2, p. E4-E10, Centro Técnico Aeroespacial, 2000.

RIBEIRO, M. A. **Automação Industrial 4ª ed.** Tek Treinamento & Consultoria. Salvador BA, 2001.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Capítulo 1 - Conceitos Fundamentais**. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica - Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign, São Paulo, 2010.

ROOKS, B. **Assembly in aerospace features**. IEE Seminar, Assembly Automation, p.108-111, 2005.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. Editora Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.

RUDBERG, T. et al. **One Piece AFP Spar Manufacture**. SAE International Journal of Aerospace, v.4, nº 2, p. 965-972, November 2011.

RUDBERG, T.; FLYNN, R.; NIELSON, J. **Production Implementation of Multiple Machine, High Speed Fiber Placement for Large Structures**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Wichita, KS, US, September 2010.

SARH, B. *et al.* **Aircraft Manufacturing and Assembly**. Springer Handbook of Automation, Nof (Ed.), Springer, 2009.

SCHEY, J. A. **Introduction to Manufacturing Processes**. McGraw Hill, New York 1987.

SCHWARZE K.; MEHLENHOFF T. **Solution for Automated Drilling and Lockbolt Installation in Carbon Fiber Structures**. SAE International Journal of Aerospace, v.2, nº 1, p.188-192, March 2010.

SEEGMILLER, N. A. *et al.* **Precision Robotic Coating Application and Thickness Control Optimization for F-35 Final Finishes**. SAE Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, 2009.

SEITZ, F.; STEELE, L. W. **The competitive status of the U.S. civil aviation manufacturing industry**. Washington DC, National Academy Press, 1985.

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção: Do Ponto de Vista da Engenharia de Produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SHINGO, S. **Sistema de Troca Rápida de Ferramentas: Uma Revolução nos Sistemas Produtivos**. Porto Alegre: Bookman, 2000.

SILVA, M. E. Da. **Apostila de automação industrial**. EEP – Escola de Engenharia de Piracicaba. Piracicaba, Setembro 2007.

SILVEIRA, P. R. Da.; SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. Editora Érica, São Paulo, 1998.

SKIBNIEWSKI, M.; HENDRICKSON, C. **Analysis of robotic surface finishing work on construction site**. J. Constr. Eng. Manage. ASCE, v.114(1), p.53–68, 1988.

SLACK, N. *et al.* **Administração da Produção**. Editora Atlas, São Paulo, 2007.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SNEE, R. D. **Why should statisticians pay attention to Six Sigma?** Quality progress, p.100-3, September 1999.

SOUDER, W. E. and PADMANABHAN, V. **Transferring new technologies from R&D to manufacturing**. Research and Technology Management, v.32, n.5, p.38-43, 1989.

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.

SOEHNER, C; MAYLANDER, H. **Traveling Column Machines for Automated Drilling and Fastening Operations on Different Aircraft Structural Components**. Sae Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Charleston, US, September 2008.

ST. AUBYN, M. *et al.* **Study on the efficiency and effectiveness of public spending on tertiary education**. Economic Papers 390, 2009.

STREECK, W. **The firm as a place of training and learning**. The Transformation of Firm and Work, Il Mulino, Bologna, 1988.

TAN, J. T. C. *et al.* **Safety strategy for human-robot collaboration: Design and development in cellular manufacturing**. Advanced Robotics, v.24, n° 5-6, p.839-860, April 14th, 2010.

TAN, J. T. C. *et al.* **Safety Design and Development of Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing**. 5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering Bangalore, India, August 22-25th, 2009.