

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA
EM SISTEMAS PRODUTIVOS

CARLOS EDUARDO CASSIANO PINTO

*O Model-Based-Design e Model-Based-Testing no desenvolvimento de testes automáticos na
fabricação de aeronaves: Uma especificidade da Manufatura Virtual*

São Paulo
Dezembro/2014

CARLOS EDUARDO CASSIANO PINTO

O Model-Based-Design e Model-Based-Testing no desenvolvimento de testes automáticos na fabricação de aeronaves: Uma especificidade da Manufatura Virtual

Dissertação apresentada como exigência para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Antônio César Galhardi.

São Paulo
Dezembro/2014

Pinto, Carlos Eduardo Cassiano

P659m O Model-Based-Design e Model-Based-Testing no desenvolvimento de testes automáticos na fabricação de aeronaves: uma especificidade da manufatura virtual. / Carlos Eduardo Cassiano Pinto. – São Paulo : CEETPS, 2014.

105 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antônio César Galhardi

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2014.

1. Teste. 2. Modelagem. 3. Simulação. 4. Validação. 5. Verificação. I. Galhardi, Antônio César. II Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

CARLOS EDUARDO CASSIANO PINTO

O *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* no desenvolvimento de testes automáticos na fabricação de aeronaves: Uma especificidade da Manufatura Virtual

Orientador Prof. Dr. Antônio César Galhardi

Membro Externo Prof.(a) Dr.(a) Carlos Cesar Aparecido Eguti

Membro Interno Prof.(a) Dr.(a) Marilia Macorin de Azevedo

São Paulo, 16 de Dezembro de 2014

Dedico este trabalho especialmente a minha família pelo suporte e incentivo durante a sua elaboração, e aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo na conclusão desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me apoiar nos momentos mais difíceis, me mostrando o caminho certo e me dando forças nesta jornada.

À Juliana, minha esposa, por ser minha companheira nos momentos difíceis e por toda paciência durante este trabalho.

Agradeço também aos meus pais, figuras presentes em todas as etapas da minha vida me ajudando a superar os desafios encontrados na vida.

Ao meu orientador pelo suporte e orientação para o desenvolvimento deste trabalho, por meio do conhecimento transmitido ao longo desta jornada.

“Uma mente que se abre ao conhecimento
jamais retornará ao seu tamanho natural”
(Albert Einstein)

PINTO, C. E. C. **O Model-Based-Design e Model-Based-Testing no desenvolvimento de testes automáticos na fabricação de aeronaves: Uma especificidade da Manufatura Virtual**. 105 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2014.

RESUMO

O desenvolvimento dos procedimentos de teste eletroeletrônicos da produção numa fabricante de aeronaves regionais de médio porte é normalmente baseado em metodologias tradicionais, caracterizadas pela utilização de documentações formais e estáticas, impossibilitando sua validação e verificação antecipada, resultando assim em baixa maturidade para aplicação nas aeronaves protótipo. Este trabalho propõe a utilização das técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* como forma de diminuir o ciclo de desenvolvimento dos testes e aumentar a maturidade dos procedimentos de teste para aplicação nos protótipos. O uso de modelos de simulação possibilita a capacidade de representar o comportamento real de um sistema dinâmico, permitindo a sua análise e verificação. As técnicas de modelagem e simulação têm sido largamente utilizadas no desenvolvimento de sistemas complexos, a fim de minimizar os testes realizados em protótipos reais que usualmente possuem custo elevado. A utilização destas técnicas inovadoras visa antecipar a detecção de possíveis defeitos nos procedimentos de testes, reduzindo custo, pois serão identificados ainda nas etapas iniciais de desenvolvimento. A metodologia utilizada por este trabalho foi uma pesquisa-ação, realizada por meio de um workshop. Neste workshop, foram coletadas diversas informações referentes ao processo atual de desenvolvimento dos testes de produção existente na empresa. Em posse destes dados, foi proposto um novo processo de desenvolvimento dos testes. Este novo processo, foi avaliado e validado por meio de dois testes, utilizando-se modelagem e simulação. A transição destes processos e a viabilidade de utilização das técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based Testing*, foram também validadas por meio de uma pesquisa qualitativa, utilizando-se o método Delphi. Como resultado deste trabalho, foi possível identificar o processo existente na empresa; desenvolver e avaliar o desempenho de um novo processo proposto para desenvolvimento dos testes. Com a significativa redução de 33% do tempo de teste nos protótipos; a diminuição do ciclo de desenvolvimento dos testes em 25%; os ganhos de qualidade e o aumento do número de testes automatizados, pode-se comprovar a eficiência e a eficácia do novo processo proposto.

Palavras-chave: Testes. Modelagem. Simulação. Validação. Verificação

ABSTRACT

PINTO, C. E. C. **Aplicação de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* no desenvolvimento de testes automáticos no setor aeronáutico.** 105 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2014.

The development process of the electrical production tests at an Aircraft Manufacturer of Regional Jets have used traditional methodologies document-centered, this feature not allow the anticipation of the validation e verification process, reducing the maturity level of the test procedure to be applied at the prototype aircrafts. This work proposes the use of Model-Based-Design and Model-Based-Testing as a way of to reduce the cycle of test development process and to improve the test maturity during the aircraft prototype phase. The use of Modeling and Simulation enable the ability of to represent the dynamic system behavior, allowing system analyses and check. The modeling and simulation technical have been widely used on the complex system, with the goal to minimize the tests on the real prototypes that apply high costs. In this sense, the use of this innovative technics to develop the production test procedures aims to anticipate the defect detecting, reducing cost, due to be found in the initial phases of the development. The methodological approach used by this work was based on an action-research done by a workshop. In this workshop, a lot of information, regarding to the current process to develop the production test procedures existent in the company, was collected. With this information, was proposal a new process to develop the production test procedures. This process was validated and measured by modeling and simulation via two use cases. The transition of the process and the viability of the Model Based Design and Testing technics were also validated by survey with specialist in the company with the Delphi methodology. As result of this work, was possible to identify the current model to develop the production test procedures and also to develop the new model and measure its performance. The expressive 33% of the saving time on prototype usage, the reduction of the 25% of the development cycle; the quality improvement and the increase of the number of automatic tests procedures, validate the efficiency of this new methodology.

Keywords: Test. Modeling. Simulation. Validation. Verification

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Ganho de qualidade e produtividade com uso de MBD e MBT	18
Quadro 2 - Processos envolvidos na Manufatura Virtual.....	49
Quadro 3 - Oportunidades para implementação da automação	57
Quadro 4 - Quadro comparativo dos possíveis ganhos entre o processo tradicional e o processo baseado em modelos	87
Quadro 5 - – Requisitos da biblioteca desenvolvida	88
Quadro 6 - Classificação dos especialistas por área de atuação e tempo de experiência	93
Quadro 7- Respostas das perguntas de 1 a 13 da pesquisa do Delphi	94
Quadro 8 - Respostas das perguntas de 14 a 23 da pesquisa do Delphi	95
Quadro 9 - – Formulário com as primeiras 10 perguntas do Delphi	112
Quadro 10 - – Formulário com as perguntas de 11 a 23 da pesquisa Delphi	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custo da detecção de defeitos ao longo do desenvolvimento	64
Tabela 2 - Proporção das áreas afetadas pela pesquisa Delphi.....	79
Tabela 3 - Distribuição dos especialistas por tempo de experiência	80
Tabela 4 - Escala de avaliação das perguntas 2 e 3 da pesquisa Delphi.....	114
Tabela 5 - Escala de avaliação das perguntas Delphi, exceto para as perguntas 2 e 3	114
Tabela 6 - Agrupamento das respostas das perguntas do Delphi	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de antecipação da detecção de defeitos em projetos	19
Figura 2 – Visão geral do processo atual de elaboração de testes	20
Figura 3- Visão geral da nova proposta de elaboração dos testes	20
Figura 4- Layout da estrutura desta Dissertação	24
Figura 5- Grau de Incerteza no Ciclo de Desenvolvimento do Produto.....	29
Figura 6 - Curva de comprometimento do custo do produto.....	30
Figura 7 - Focos da Gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos.....	31
Figura 8 - Processos relacionados com o desenvolvimento de produtos	32
Figura 9 - Ciclo de Vida do Projeto Sequencial e com Engenharia Simultânea	33
Figura 10 - Redução de tempo quando aplicado DFMA no início do projeto	35
Figura 11 - Modelo em Cascata (<i>Waterfall</i>).....	39
Figura 12- Processo de desenvolvimento MBD utilizado pela Rockwell Collins	45
Figura 13 - Ambiente da Manufatura Virtual.....	46
Figura 14- Principais atividades a serem cobertas no ambiente de Manufatura Virtual.	47
Figura 15- Avaliação de uma célula de manufatura com robôs	51
Figura 16 – Simulação de um Processo de Montagem de uma porta na BMW	52
Figura 17 - Aplicação da BOEING utilizando o software Robcad	52
Figura 18 - Aplicação da FORD utilizando o software Visfactory	53
Figura 19 –Evolução das ferramentas computadorizadas de desenvolvimento do produto.....	54
Figura 20 - Preenchimento dos gaps na automação industrial pela Prototipação Virtual	55
Figura 21 - Etapas do processo de montagem estrutural de aeronaves	58
Figura 22 - Soluções de Automação da montagem estrutural de aeronaves	59
Figura 23 - Robô de furação e rebiteagem na empresa Stork-Fokker.....	59
Figura 24 - ATE testador de cabos	61
Figura 25- Custo de detecção de defeitos ao longo do desenvolvimento.....	65
Figura 26 - Estratégia de teste de forma espiral	66
Figura 27– Processo tradicional de desenvolvimento em V.....	71
Figura 28 – Explosão do método tradicional de desenvolvimento em V	73
Figura 29- Ciclo de execução do teste no modelo de simulação.....	75
Figura 30 - Interação com os modelos durante a execução da simulação.....	77
Figura 31 – Exemplo de evolução do sinóptico VAPS do sistema elétrico durante a simulação	78
Figura 32 - Estrutura do capítulo Resultados	81
Figura 33 - – Mapa mental do processo atual de desenvolvimento dos testes	83
Figura 34 - – Mapa mental da nova proposta de desenvolvimento e validação dos testes da produção	85
Figura 35- – Diagrama de classe da biblioteca desenvolvida.....	89
Figura 36 - – Comparativo do teste do Sistema Elétrico (protótipo vs. simulação).....	90
Figura 37 - – Comparativo do teste do Sistema de Combustível (protótipo vs. simulação)	90
Figura 38 – Redução de Hh nos protótipos	91
Figura 39– Evolução dos testes automatizados na produção	92
Figura 40 - Avaliação da pergunta sete do Delphi distribuída por área de atuação	96
Figura 41 - Avaliação da pergunta sete do Delphi distribuída por tempo de experiência.....	97
Figura 42 - Avaliação da pergunta dez do Delphi distribuída por área de atuação	98
Figura 43- Avaliação da pergunta dez do Delphi distribuída por tempo de experiência	98
Figura 44 - Avaliação da questão quinze do Delphi distribuída por área de atuação.....	99
Figura 45 - Avaliação da questão quinze do Delphi distribuída por tempo de experiência ...	100
Figura 46 - Comparativo das respostas dos especialistas com as expectativas da pesquisa ..	101

LISTA DE SIGLAS

AP	Ante Projeto
DDP	Detailed Definition Phase
JDP	Join Definition Phase
MBD	Model Based Design
MBT	Model Based Testing
V&V	Validação e Verificação.
HIL	Hardware in the Loop
MIL	Model in the Loop
PDP	Processo de Desenvolvimento do Produto
DIP	Desenvolvimento Integrado do Produto
SBCE	Set Based Concurrent Engineering
DFX	Design <i>for X</i>
DFM	Design for Manufacturing
DFA	Design for Assembly
DFQ	Design for Quality
DFC	Design for Cost
DFCl	Design for Cycle of Life
DFE	Design for Environment
DFD	Design for Disassembly
DFMt	Design for Maintainability
SUT	System Under Test
DFMd	Design for Modularity
DFS	Design for Safety
DFSt	Design for Standards
ECU	Unidades de Controle Eletrônicas

MV Manufatura Virtual

PV Prototipação Virtual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Definição do Problema	21
1.2. Objetivo Geral	22
1.3. Objetivos específicos	22
1.4. Estrutura do Trabalho	22
1.5. Limitações do estudo	26
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1. Desenvolvimento do Produto	27
2.1.1. Processo de Desenvolvimento do Produto	27
2.1.2. Processo Tradicional	37
2.1.3. Model Based Design - MBD.....	41
2.1.4. Model Based Testing- MBT	43
2.2. Simulação	45
2.2.1. Manufatura Virtual.....	45
2.2.2. Simulação de Sistemas.....	49
2.2.3. Automação Aeronáutica.....	55
2.3. Validação e Verificação.....	61
2.3.1. Definições	62
2.3.2. Melhores Práticas.....	64
2.3.3. Padrões Existentes	66
3. METODOLOGIA.....	69
3.1. Coleta dos Dados	69
3.2. Identificação do Processo Existente	71
3.3. Desenvolvimento de um novo processo de desenvolvimento	72
3.4. Validação por Simulação.....	74
3.5. Validação por especialistas.....	79
4. RESULTADOS	81
4.1. Caracterização do processo atual de desenvolvimento dos Testes.....	82
4.2. Nova Proposta para desenvolvimento e validação dos testes da produção	84
4.2.1. Projeto do novo processo	84
4.2.2. Desempenho do novo processo.....	86
4.3. Validação do novo processo por simulação	87
4.3.1. Requisitos para a simulação	88
4.3.2. Requisitos da biblioteca de software desenvolvida	88
4.3.3. Arquitetura da biblioteca de software desenvolvida	88
4.3.4. Análise de desempenho do novo processo	89
4.4. Estratégia obtida pela pesquisa Delphi	92
4.5. Considerações finais	102
5. Conclusão	104

REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A	112

1.INTRODUÇÃO

A manufatura de aeronaves, especificamente a da aviação regional, possui alto valor agregado como característica em seus produtos e elevados níveis de certificação, principalmente por apresentarem riscos às vidas humanas. Em face deste cenário, a confiabilidade do processo produtivo deve ser levada à excelência; assim, os testes de produção devem garantir comprovada qualidade e robustez na fabricação das aeronaves regionais. A fabricação de aeronaves, em particular no Brasil, possui como principal representante a Embraer®.

A Embraer® é hoje uma das maiores empresas aeroespaciais do mundo, com mais de 40 anos de existência, atua nas etapas de projeto, desenvolvimento, fabricação, venda e suporte pós-venda de aeronaves para os segmentos de aviação comercial, aviação executiva, além de oferecer soluções integradas para defesa e segurança e ainda sistemas.

Com escritórios e fábricas em várias partes do mundo e mais de cinco mil aeronaves vendidas em todos os continentes, a Embraer é líder no mercado de jatos comerciais com até 130 assentos, a quinta maior fabricante de jatos executivos no mundo e a maior Empresa de soluções de defesa e segurança no Brasil. Possui atualmente dezenove mil funcionários espalhados pelo mundo, de mais de vinte nacionalidades, que mantêm a Embraer sempre na vanguarda tecnológica, sendo também reconhecida como sinônimo de inovação mundial.

A busca por técnicas de testes de sistemas que permitam melhorar a eficiência no processo de fabricação de um produto é fundamental para a sobrevivência das empresas. Nos dias atuais muito tem se falado sobre testes; os conceitos são bem difundidos e é relativamente fácil encontrar na literatura diversas técnicas e metodologias sobre o tema. Porém, pouco se fala sobre as aplicações práticas na elaboração de testes automáticos de sistemas; qual a real importância no desenvolvimento do produto e como realizá-los de forma organizada e eficiente durante o processo produtivo.

O custo de fabricação de uma aeronave regional é extremamente alto quando comparado ao custo de um veículo terrestre para transporte regional como por exemplo um ônibus; erros podem causar elevadas perdas financeiras e até mesmo prejudicar a imagem da empresa.

Tendo em vista este cenário, este trabalho visa garantir que a qualidade dos sistemas da aeronave seja atingida pelo uso de técnicas de *Model-Based-Design* – MBD e *Model-Based-Testing* - MBT, a fim de obter um elevado grau de automação dos testes eletroeletrônicos no ambiente produtivo; mantendo as boas práticas no processo de validação e verificação de sistemas em uma aeronave regional, eliminando desperdício e reduzindo custo.

A eficiência e eficácia das técnicas de MBD e MBT podem ser observadas no Quadro 1, por meio do registro dos ganhos obtidos por empresas de desenvolvimento de sistemas complexos de diferentes ramos de atuação.

Quadro 1- Ganho de qualidade e produtividade com uso de MBD e MBT

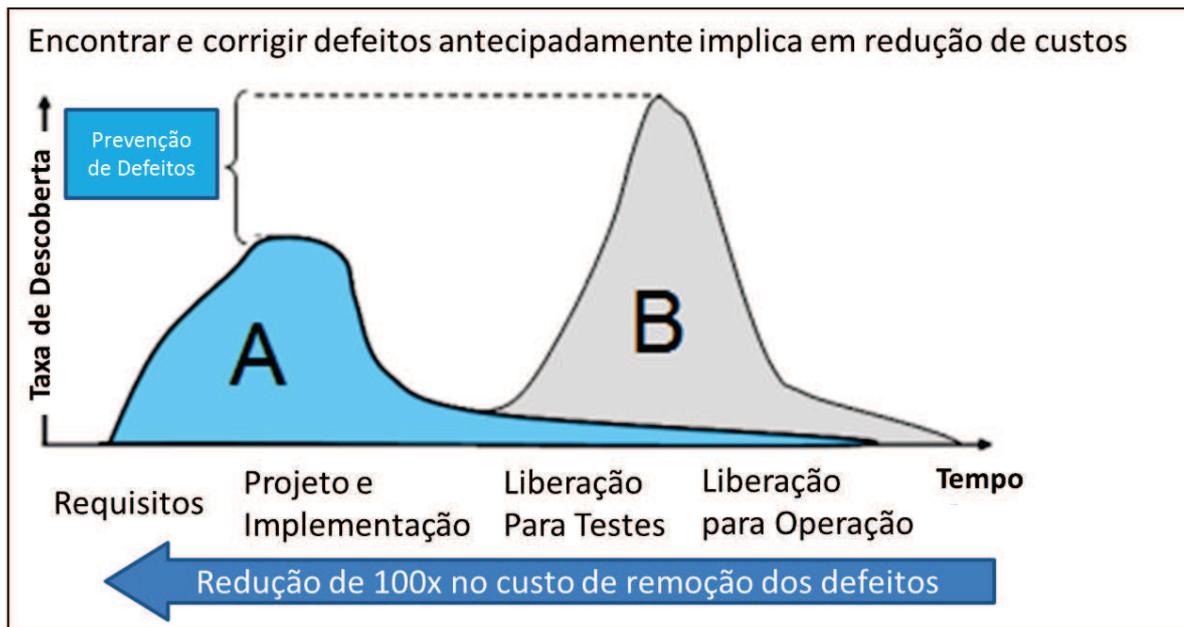
Empresa	Produto	Ferramentas	Especificações e Geração automática de código	Benefícios atingidos
Airbus	A340	SCADE com gerador automático de código	70% controle Fly-by-wire 70% Piloto Automático 50% Computadores Pilotos 40% Alerta aos pilotos 40% Computador de Manutenção	20 X Redução de Erros
Eurocopter	EC-155/135 Piloto Automático	SCADE com gerador automático de código	90% do Piloto Automático	50% de redução do ciclo de desenvolvimento
GE & Lockheed Martin	FADEC - Controlador de Motores	ADI Beacon	Em processo de implantação	20% Redução de Erros 50% Redução do ciclo de desenvolvimento Redução de custos
Schneider Electric	Sistema de controle de turbina nuclear	SCADE com gerador automático de código	200.000 linhas de código	8X Redução de Erros mesmo com aumento de 4X na complexidade do sistema
US Spaceware	Foguete DCX	Matrix X	Em processo de implantação	50-75% Redução de custo Redução do "time-to-market" e Riscos.
PSA	Sistema de gerenciamento elétrico	SCADE com gerador automático de código	50% linhas de código gerado automaticamente	60% Redução ciclo de desenvolvimento
CSEE Transport	Sistema de controle de Submarino	SCADE com gerador automático de código	80.000 linhas de código geradas automaticamente	Aumento da produtividade de desenvolvimento de SW , de 20 para 300 linhas de código por dia.
Honeywell Commal Aviations Systems	Sistema de comandos de Vôo	MATLAB Simulink	60% Controle de vôo automático	5X Aumento de produtividade Códigos livres de erro Recebimento de certificação FAA

Fonte: Adaptado de (UNIVERSIDADE DE MINNESOTA, 2010)

Os dados apresentados no Quadro 1 corroboram com os conceitos apresentados na Figura 1, onde a utilização de modelos e testes nas fases iniciais do desenvolvimento do

produto permite antecipar a detecção de defeitos. No entanto, alguns problemas continuaram existindo, principalmente os decorrentes da manufatura. Em outras palavras, a aplicação de testes no período de desenvolvimento prevê detecção e correção de problemas sistêmicos, enquanto na fase de produção, ataca os problemas oriundos de variações aleatórias do processo.

Figura 1 – Curva de antecipação da detecção de defeitos em projetos



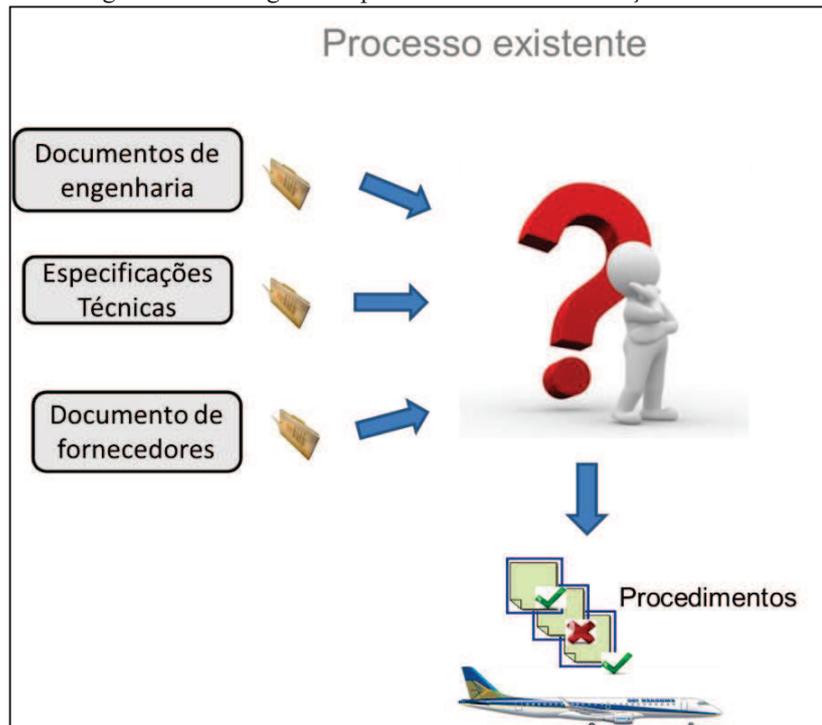
Fonte: Adaptado de (SAFFORD, 2000).

Observa-se ainda na Figura 1 dois movimentos dependentes: um de antecipação e outro de redução da área abaixo da curva. Para que isto seja possível, alguns facilitadores destes movimentos devem ser considerados tais como: a competência dos funcionários; o uso de modelagem e simulação; o reuso e automação nos processos de validação e verificação.

Outro ponto importante deste trabalho, é que as técnicas de Modelagem e Simulação de Sistemas como *Hardware-in-the-loop* - HIL e *Model-in-the-Loop* - MIL foram utilizadas para a antecipação da detecção de defeitos de projeto e aumentar a robustez dos procedimentos de teste.

Como forma de melhor exemplificar o foco de estudo desta pesquisa, demonstra-se na Figura 2 e na Figura 3 a visão geral dos processos observados e desenvolvidos por este trabalho.

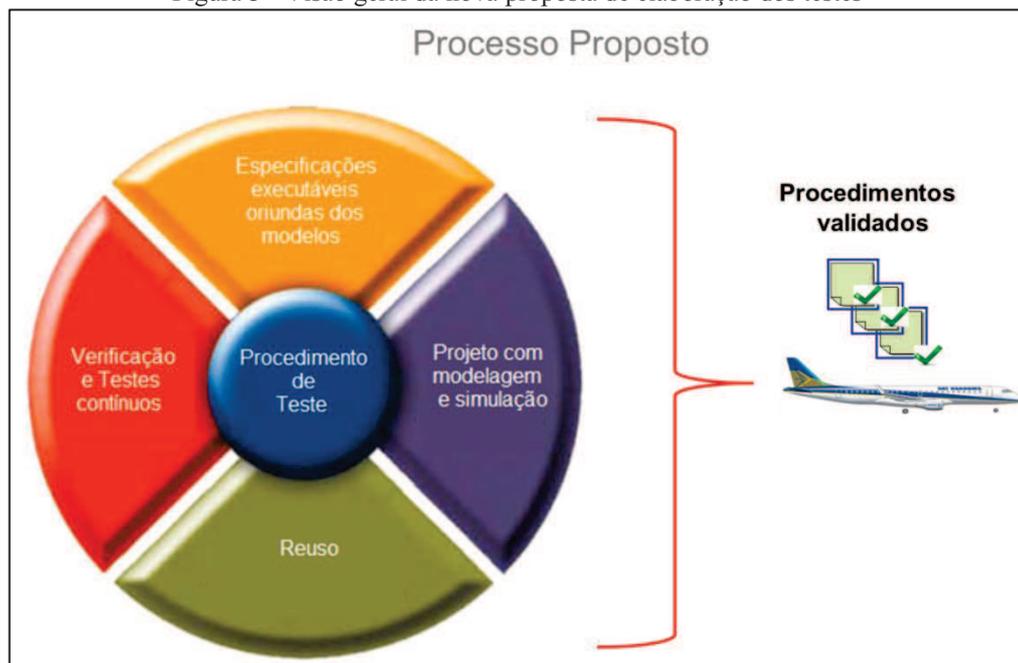
Figura 2 – Visão geral do processo atual de elaboração de testes



Fonte: Do autor

A Figura 2 apresenta uma representação do processo antes das contribuições desta pesquisa. Neste processo, observa-se documentos formais e estáticos e informações descentralizadas, onde o responsável pelo desenvolvimento dos testes interpreta a documentação para desenvolver os testes.

Figura 3 - Visão geral da nova proposta de elaboração dos testes



Fonte: Do autor

A Figura 3 ilustra a proposta a ser implantada após a conclusão desta pesquisa, nesta proposta, têm-se processos bem definidos, estruturados e planejados que podem ser implementados a fim de proporcionar um ciclo mais robusto e eficiente para o desenvolvimento dos testes de produção. Tais características ressaltam o caráter tecnológico e prático desta pesquisa.

Destaca-se ainda, que serão descritos todos os processos identificados, desenvolvidos e validados pela metodologia utilizada durante a pesquisa.

1.1. Definição do Problema

O desenvolvimento de aeronaves é considerado como um sistema complexo, pois requer métodos sistemáticos para o seu desenvolvimento e projeto. Tipicamente, o desenvolvimento se inicia com a captura de requisitos de alto nível que são registrados em formato textual. Estes requisitos geralmente formam a base para a especificação dos sistemas, que gradualmente são refinados e implementados por meio do projeto detalhado. Esta característica se difere do desenvolvimento de produtos simples, onde muitas vezes tais etapas não requerem um processo sistemático de testes e validação.

Tendo em vista o conceito anterior, este trabalho visa responder as seguintes perguntas:

- Dado à complexidade das aeronaves regionais, é possível a aplicação dos conceitos de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* na automação dos testes eletroeletrônicos durante as fases iniciais de desenvolvimento do produto e prototipação? Que tipos de ganhos podem trazer ?
- Quais as fases consideradas importantes na implantação do *Model-Based-Design* (MBD) e *Model-Based-Testing* (MBT) ?
- Como as técnicas de MBD e MBT podem contribuir para a transição do processo tradicional de validação dos testes de produção para um processo de validação e verificação contínua ?

1.2.Objetivo Geral

Explorar a viabilidade da utilização das técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* no desenvolvimento e validação de testes eletroeletrônicos automatizados, realizados na produção de uma aeronave regional de médio porte.

1.3.Objetivos específicos

- 1) Modelar um novo processo de desenvolvimento e validação dos testes eletroeletrônicos da produção por meio dos modelos de simulação.
- 2) Desenvolver e validar pelo menos um teste de sistema em uma aeronave regional de médio porte a partir dos conceitos de modelagem e simulação.
- 3) Explorar os ganhos de eficiência e eficácia da aplicação de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing*.
- 4) Descrever como migrar do processo tradicional de validação dos testes da produção ao final do projeto, para o processo de teste e validação contínua durante o ciclo de desenvolvimento.

1.4.Estrutura do Trabalho

Esta pesquisa está dividida em seis partes principais conforme se observa na Figura 4 sendo elas listadas abaixo:

- Introdução
- Referencial Teórico
- Metodologia
- Resultados
- Conclusões e Recomendações
- Referencias

Na seção Introdução foi contextualizado todo o tema e a justificativa desta pesquisa, descrevendo os principais desafios encontrados atualmente pelas empresas; foram identificadas e apresentadas as perguntas básicas de pesquisa, definido o objetivo geral e os objetivos específicos. Por fim foi apresentada a estrutura geral da dissertação e as limitações de estudo desta pesquisa, identificando o que está fora do escopo desta dissertação.

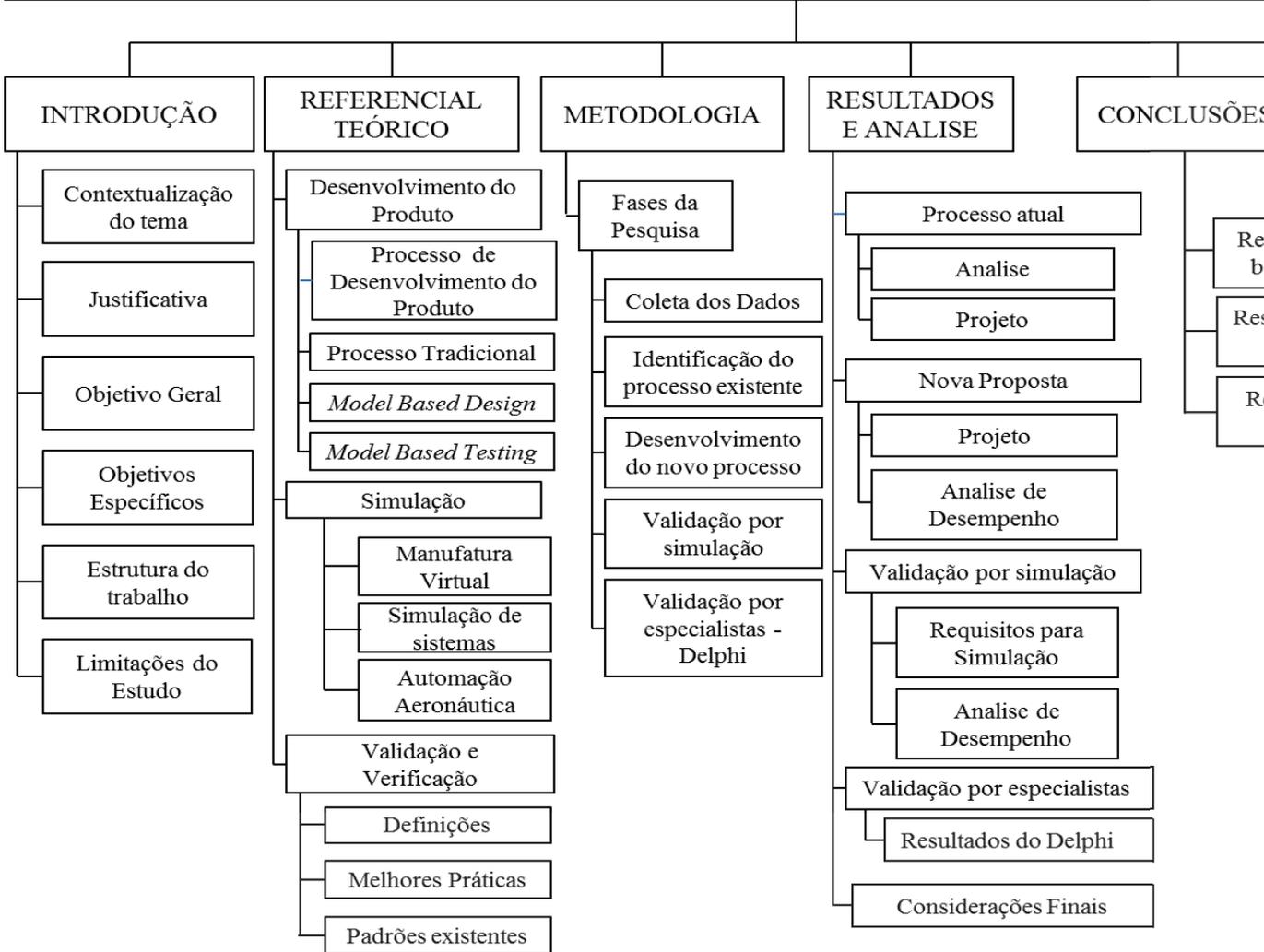
No capítulo do Referencial Teórico, apresenta-se os temas relevantes relacionados a esta pesquisa; as suas aplicações existentes em outros trabalhos acadêmicos e a sua utilização nas empresas, tendo como vertentes três principais áreas de estudo:

- Desenvolvimento do Produto
- Simulação
- Validação e Verificação

Observa-se na Figura 4 a estrutura seguida nesta de pesquisa

Figura 4- Layout da estrutura desta Dissertação

O *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* no desenvolvimento de testes automáticos na fabricação: Uma especificidade da Manufatura Virtual



Os métodos de pesquisa descritos na seção Metodologia se baseiam nas definições de Gil (1999) que define o método científico como um conjunto de processos, operações mentais e técnicas que devem ser usadas em uma pesquisa.

Destaca-se como principal método, a pesquisa-ação, que teve como intuito solucionar um problema real e da necessidade de aumentar o conhecimento baseado na relação entre o pesquisador e os especialistas, tal iteração se deu por meio de um workshop, que teve como objetivo principal coletar os dados existentes na empresa. Estes dados foram baseados em projetos anteriores e na experiência dos especialistas; posteriormente para descrever o processo atual e o proposto da empresa, serviu-se de uma pesquisa descritiva e exploratória.

Posteriormente, quando da validação do novo processo proposto, foram realizadas simulações a fim de exercitar as técnicas de modelagem propostas. Para isso, realizou-se dois testes em sistemas simulados, sendo eles o Sistema Elétrico e o Sistema de Combustível de uma aeronave regional de médio porte.

Por fim a validação final do resultado da pesquisa foi efetuada com uma abordagem qualitativa por meio de uma pesquisa entre os especialistas em desenvolvimento do produto e testes, com o método Delphi.

No capítulo Resultados, apresenta-se os artefatos obtidos pela pesquisa subdivididos em quatro categorias :

- Identificação do processo existente na empresa e a sua análise
- Proposta de um novo processo de desenvolvimento dos testes e avaliação de seus ganhos
- Resultado da validação do novo processo de desenvolvimento, por simulação
- Resultado e análise da pesquisa Delphi com os especialistas.

No capítulo de Conclusões, apresenta-se uma análise dos resultados obtidos, respostas às perguntas básicas de pesquisa e aos objetivos gerais e específicos. Algumas propostas para trabalhos futuros também são apresentadas nesta pesquisa.

1.5. Limitações do estudo

Esta fora do escopo desta pesquisa desenvolver e testar os modelos de simulação que representam o comportamento físico dos sistemas a serem testados, bem como o desenvolvimento das ferramentas necessárias para utilização dos modelos de simulação.

Sua elaboração depende de que os modelos de simulação estejam previamente desenvolvidos e validados, prontos para sua utilização no processo de validação dos testes automáticos de produção.

O objeto de estudo é uma aeronave regional de médio porte.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado os temas mais relevantes relacionados à pesquisa, com ênfase em suas aplicações em outros trabalhos acadêmicos e sua utilização nas empresas. Primeiramente aborda-se os principais tópicos em desenvolvimento do produto, seguido dos conceitos e aplicações da Manufatura Virtual. Por fim, o tema validação e verificação de teste foram explorados para ressaltar os conceitos básicos e as melhores práticas utilizadas neste processo.

2.1.Desenvolvimento do Produto

Neste item, pretende-se conceituar os itens mais relevantes relacionados ao tema Desenvolvimento do Produto, bem como citar a utilização de tais técnicas em trabalhos de pesquisas, da literatura recente.

2.1.1. Processo de Desenvolvimento do Produto

O ser humano está sempre inovando, desde os primórdios da humanidade, desenvolve uma grande quantidade de ferramentas e outros artefatos para sua sobrevivência e comodidade. Ao longo do tempo algumas destas ferramentas mudaram, novas foram desenvolvidas e outras aprimoradas. O mundo atualmente é repleto de ferramentas, utensílios e vários outros artefatos que os seres-humanos simplesmente necessitam ou desejam para tornar as suas vidas melhores, e em sua grande maioria foram projetados por alguém. Na sociedade industrial moderna, as atividades de concepção e de manufatura são bem distintas. O processo de fazer algo novo não pode começar antes do processo de projetar, isso é um fato. Em alguns casos como na indústria eletrônica, o período de concepção pode levar muitos meses; por outro lado o ciclo de produção, tende a ser cada vez mais curto, e pode ser medido apenas em horas ou minutos (CROSS, 2005).

Desenvolver produtos pode ser considerado como um conjunto de atividades no qual procura-se buscar, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, sem deixar de considerar as estratégias competitivas e de produto da empresa,

chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo (ROZENFELD *et al.*, 2010).

A acirrada concorrência e as demandas dos consumidores no mercado fez com que o Desenvolvimento de Novos Produtos - DNP tenha adquirido crescente importância nas empresas, e forçado à elevação dos padrões de excelência nos níveis de qualidade, preço e prazo de desenvolvimento, compatíveis às melhores práticas, que são internacionalizadas. Porém, o desenvolvimento de produtos é um processo complexo e de natureza multidisciplinar, exigindo uma estreita relação entre a alta administração, a equipe de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e os setores de marketing, produção, compras, controle de qualidade e vendas, consumidores e fornecedores, para se obter o sucesso desejado. (SENHORAS; TAKEUCHI; TAKEUCHI, 2013)

De acordo com Jugend (2006) nos projetos de Desenvolvimento de Novos Produtos existe um processo ou uma série de etapas ou atividades que transformam um conjunto de entradas (inputs) em um conjunto de saídas (outputs). Nesse processo existe uma sequência de atividades de uma empresa com a finalidade de conceber, desenvolver e comercializar um novo produto. Muitas dessas atividades são intelectuais e organizacionais, em vez de físicas.

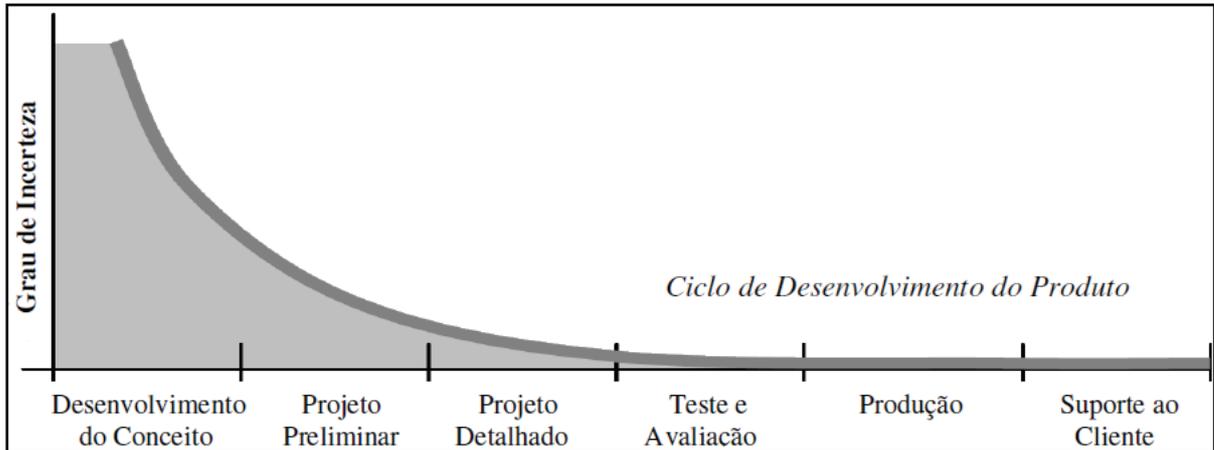
A afirmação de Carvalho; Back e Ogliare (2005, p. 5) sobre o processo de desenvolvimento do produto:

O processo de desenvolvimento do produto é um processo de solução de problemas. O próprio produto é uma solução para um problema do cliente e, no processo de desenvolvê-lo a equipe de desenvolvimento de produto formula e soluciona uma variedade de problemas. Alguns destes problemas podem requerer a análise da causa raiz. Embora a análise da causa raiz possa ser muito rápida e eficaz, por vezes, ela demonstra um infundável apetite por dados, o que pode fazer com que ela custe muito caro e demore muito tempo

O amadorismo no processo de desenvolvimento de novos produtos tem produzido uma imagem negativa do processo em muitas empresas, isto se deve ao elevado grau de incerteza inicial registrado diante dos altos riscos de insucesso e de perda, frente ao elevado montante de recursos que são imobilizados. Estas incertezas são criadas nos estágios iniciais pelas empresas, que consideram como parte integrante do processo de desenvolvimento do produto, rodadas com re-projetos do produto e os processos de ajustes e correções de conceitos, que poderiam ter sido avaliados e tratados em fases mais iniciais do projeto e não durante o início de produção (CROSS, 2005).

A Figura 5 ilustra a evolução do grau de incerteza ao longo do desenvolvimento do produto.

Figura 5- Grau de Incerteza no Ciclo de Desenvolvimento do Produto

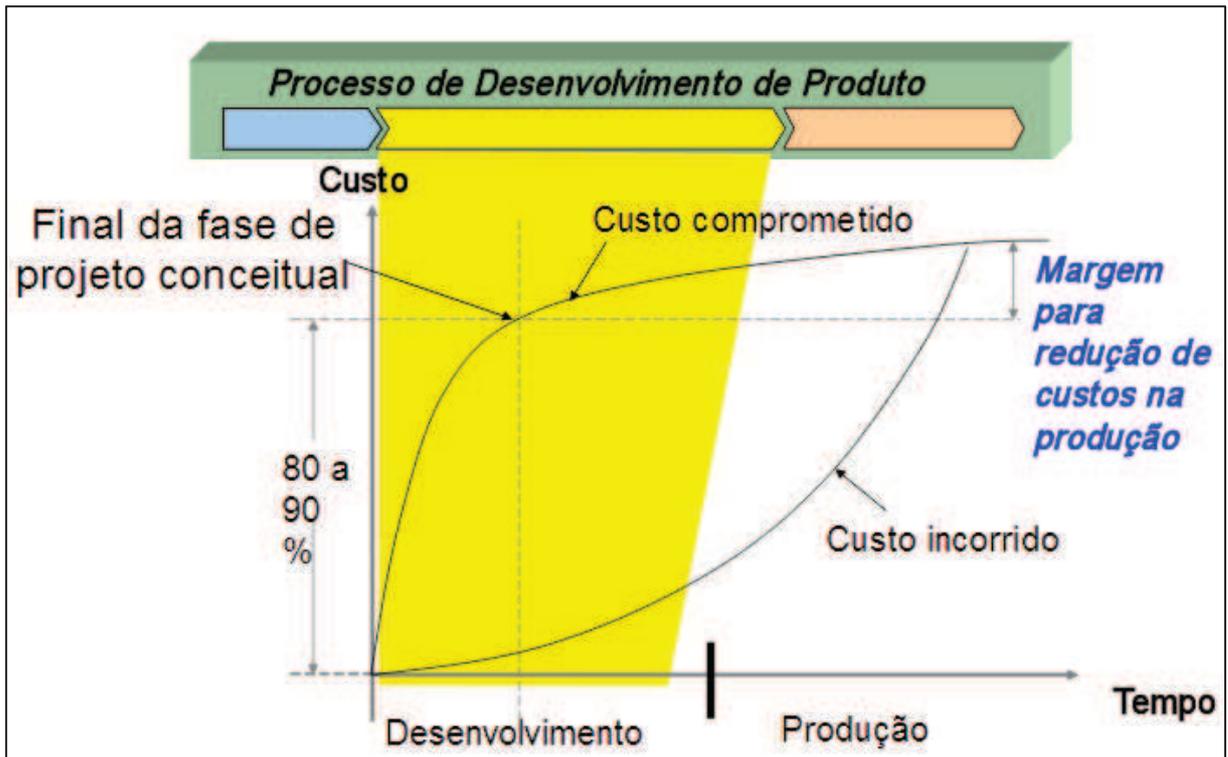


Fonte: (SENHORAS; TAKEUCHI; TAKEUCHI, 2013, p. 3)

Em decorrência da incerteza presenciada na Figura 5, ROZENFELD *et al.* (2010) argumentam que nas fases iniciais do Processo de Desenvolvimento do Produto - PDP é que são definidas as principais soluções construtivas e as especificações do produto. Os materiais e as tecnologias a serem utilizados também são definidos neste momento, assim como os processos de fabricação, dentre outros. Mesmo com a possibilidade de avançar ao longo das etapas seguintes com soluções alternativas, as definições centrais e essenciais são determinadas neste período.

Ainda segundo ROZENFELD *et al.* (2010) as escolhas de alternativas ocorridas no início do desenvolvimento são responsáveis por 85% do custo do produto final. Todas as outras etapas como definição dos materiais, tecnologia, processos de fabricação, construir e testar os protótipos, definir fornecedores e campanha de marketing; representam apenas os 15% restantes dos custos do desenvolvimento e portanto exercem menor influência no custo do produto. A Figura 6 ilustra a evolução dos custos durante as fases de desenvolvimento do produto, os custos incorridos (que já aconteceram) são relativamente baixos quando comparados ao custo final. Por outro lado, essas fases são bastante críticas quanto ao comprometimento do custo final do produto. Na fase de produção poucas são as possibilidades de redução deste custo, principalmente porque eles estão atrelados as especificações técnicas já definidas.

Figura 6 - Curva de comprometimento do custo do produto



Fonte: Adaptado de (ROZENFELD *et al.*, 2010)

O grande desafio portanto é amenizar o impacto das decisões tomadas nas etapas iniciais do desenvolvimento, e que serão significativas para a determinação do custo final do produto, pois é justamente neste momento em que se tem o maior grau de incertezas sobre o produto e suas especificações, seu processo de fabricação e até mesmo se ele será um sucesso no mercado. Somente com a evolução do desenvolvimento, onde várias alternativas construtivas são analisadas, e as soluções são definidas, é que o grau de incerteza vai diminuindo (ROZENFELD *et al.*, 2010).

A observação de Carvalho; Back; Ogliare (2005, p. 2) afirma:

Observa-se, ainda, que, não somente a área de desenvolvimento de produtos recebe atenção crescente, como o foco das pesquisas na área desloca-se das etapas finais do ciclo de desenvolvimento (construção de protótipos, testes, simulação e otimização) para as etapas iniciais (definição do produto, planejamento de produto, projeto conceitual), nas quais o trabalho se dá em níveis de abstração mais altos. Esse deslocamento é motivado por diversos estudos e experiências, segundo as quais decisões tomadas nas etapas iniciais do desenvolvimento de produto são as que produzem os maiores impactos no custo total e na qualidade do produto.

Jugend (2006) demonstra em seu trabalho que a gestão bem estruturada do processo de desenvolvimento de novos produtos apresenta as seguintes vantagens:

- Maior capacidade de diversificação dos produtos;
- Maior potencial para a transformação de novas tecnologias em novos produtos, melhores parcerias;
- Menores custos dos produtos desenvolvidos;
- Menor tempo para o desenvolvimento de novos produtos;

Os fatores citados anteriormente, com certeza promovem uma relevante vantagem competitiva para as empresas que possuem uma gestão eficaz deste processo. A Figura 7 apresenta uma visão da gestão do processo de desenvolvimento do produto.

Figura 7 - Focos da Gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos

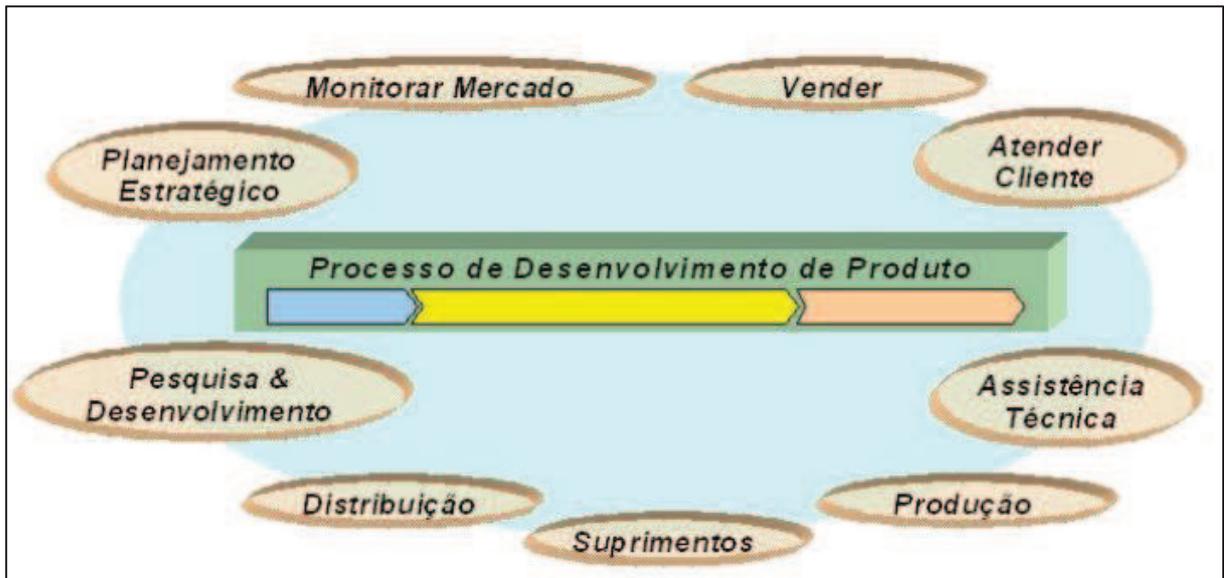


Fonte: (JUGEND, 2006, p. 7)

Para que o processo de desenvolvimento do produto - PDP seja bem-sucedido, a integração deste com outras áreas, funções e outros processos empresariais envolvidos na realização das atividades de interface ou suprimento de informação são fundamentais. Além disso, a coordenação entre o tempo, a comunicação e a disponibilidade de informação é essencial para a tomada de decisão, fim de atingir as metas do projeto (ROZENFELD *et al.*, 2010).

A Figura 8 demonstra as áreas, funções e processos empresariais com interface com o PDP.

Figura 8 - Processos relacionados com o desenvolvimento de produtos



Fonte: (ROZENFELD *et al.*, 2010, p. 12)

A necessidade de integração e de coordenação das atividades de desenvolvimento criou uma visão de um processo de negocio, o Processo de Desenvolvimento de Produtos, com ênfase na estruturação e gestão. Essa tendência consolida assim, a forma em que hoje se vê o assunto, e sua importância para o desempenho empresarial. No final dos anos 1990, varias destas necessidades foram rotuladas como a era do Desenvolvimento Integrado do Produto e classificada como uma evolução da era anterior conhecida como Desenvolvimento Sequencial (CROSS, 2005).

Segundo Rozenfeld *et al.* (2010) as grandes características desta nova era do DIP, são:

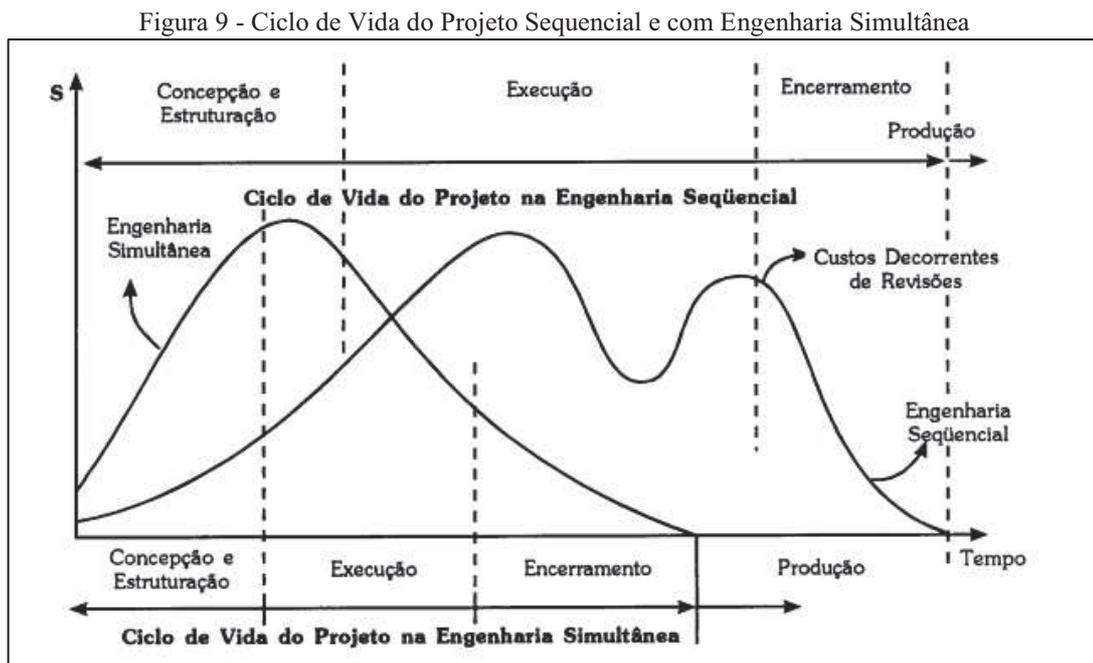
- Simultaneidade e superposição de informações e atividades;
- Projetos plataforma e modularização;
- Aumento da comunicação entre os setores e departamentos no processo;
- Times de desenvolvimento multifuncionais;

No processo de desenvolvimento como do DIP, o modelamento funcional do projeto é de forma modular, ou seja, analisando os sistemas, subsistemas e componentes que auxiliam na identificação de aspectos críticos do produto, como por exemplo; questões específicas de funcionamento, fabricação e montagem, desempenho, qualidade ou custos e outros. Outro fator importante desta modelagem é prever o impacto no ciclo de desenvolvimento do

produto. Destaca-se neste sentido a Engenharia Simultânea com os métodos *Design for X - DFX*, onde X é uma característica do projeto (BOLGENHAGEM, 2003).

A Engenharia Simultânea também conhecida na literatura como *Set Based Concurrent Engineering* pode ser considerada um processo de desenvolvimento através da convergência de soluções e eliminação das piores. A Toyota, por exemplo, tradicionalmente gasta mais tempo no início do projeto para definir as suas soluções, com a utilização de *Set Based Concurrent Engineering - SBCE*, pode então mover-se mais rapidamente em direção à convergência do produto final e, finalmente, a produção do que foi projetado (SOBEK; WARD; LIKER, 1999).

A Figura 9 apresenta o ciclo de vida de um projeto de desenvolvimento do produto utilizando-se a abordagem da Engenharia Sequencial tradicional e o ciclo de vida correspondente com a adoção Engenharia Simultânea (KLUGLIANSKAS, 1993).



Fonte: (KLUGLIANSKAS, 1993, p. 214)

Observa-se ainda na Figura 9 um pico de acúmulo de esforços na fase de implantação do ciclo de vida com Engenharia Sequencial, devido à transferência de documentação e informações para a manufatura, e como consequência das revisões nos projetos e dos custos decorrentes de reformulações e retrabalhos em equipamentos e ferramental. Em contra partida, o ciclo de vida do projeto com Engenharia Simultânea apresenta claramente um pico menor (KLUGLIANSKAS, 1993).

Os métodos DFX, são exemplos claros da utilização da Engenharia Simultânea. Estes métodos podem se apresentar de diversas formas; como um procedimento ou como um conjunto de regras ou diretrizes. Os métodos DFX compõem uma das mais efetivas abordagens para a implantação da Engenharia Simultânea, e pode ser considerada como uma base de conhecimento, com o objetivo de projetar produtos que potencializem características como alta qualidade, confiabilidade, serviços, segurança, meio-ambiente, tempo de mercado dentre outros (ROZENFELD *et al.*, 2010).

2.1.1.1. Design for Manufacturing - DFM

O DFM ou projeto para manufatura, é a integração do planejamento do processo de produção ao projeto do produto. Em outras palavras significa projetar um produto ou sistema que seja fácil e de mais baixo custo de fabricação, evitando-se características que sejam desnecessárias ou indesejáveis (HUANG, 1996).

O DFM concentra-se em como o projeto do produto interage com os processos de manufatura, e alternativas de projeto; visa redução de custos e melhoria da qualidade e produtividade. A experiência do projeto somada à experiência de fabricação é a principal diretriz do DFM, que visa obter a um produto com mais baixo custo sem sacrificar a sua qualidade, Ele é considerado um dos processos mais integrativos do desenvolvimento do produto (ROZENFELD *et al.*, 2010).

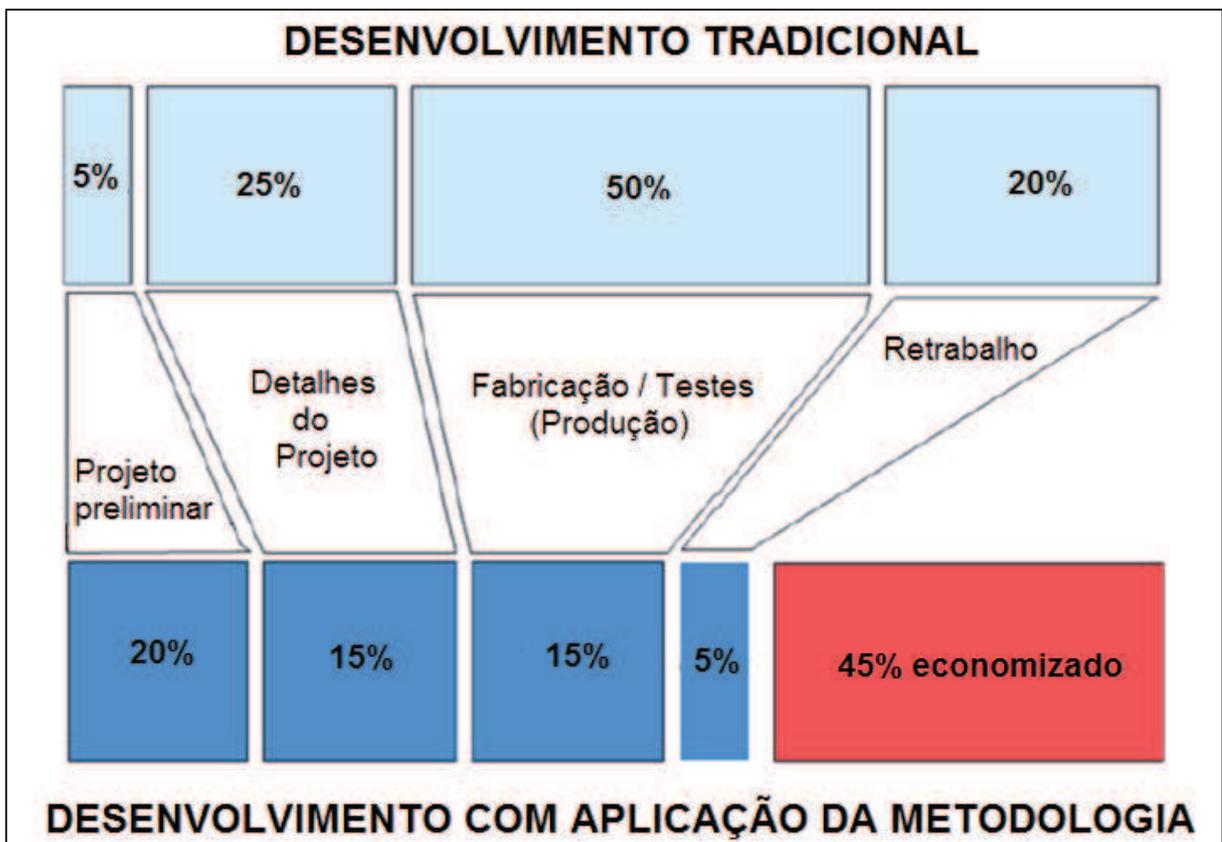
Ainda segundo Rozenfeld *et al.* (2010) o DFM aprimora as interfaces do projeto e da manufatura, a fim de que os componentes do produto sejam mais fáceis de serem fabricados. Assim, as necessidades e capacidades da manufaturam devem ser consideradas desde as fases iniciais do projeto, ou seja, quando se define a arquitetura.

2.1.1.2. Design for Assembly - DFA

O Projeto para Montagem ou DFA, envolve a etapa de projeto do produto, verificando funções, formas, materiais e processo de montagem. Permite reduzir os custos em razão da redução de montagem; redução de componentes; e muitas vezes, a simplificação da manufatura (HUANG, 1996).

O Projeto para Manufatura e Montagem (*Design Manufacturing and Assembly - DFMA*) compreende a união dos princípios do DFM com DFA. Segundo Barbosa (2012) o DFMA quando aplicado desde o início do desenvolvimento do produto reduz o tempo total de desenvolvimento conforme observado na Figura 10.

Figura 10 - Redução de tempo quando aplicado DFMA no início do projeto



Fonte: (BARBOSA, 2012, p. 12).

2.1.1.3. Design for Quality - DFQ

O Projeto de Qualidade ou DFQ é um método que visa a garantia do atendimento dos requisitos do produto. Implica no gerenciamento de todo o processo, definindo e controlando fatores, que influenciam e garantem a qualidade.

2.1.1.4. Design for Cost - DFC

O Projeto para Custos ou DFC implica, de maneira geral, em se trabalhar com os custos diretos (materiais, desenvolvimento, etc.) e indiretos (transporte, estoque, etc.) da companhia, relacionados ao processo de projeto. Objetiva estimar e trabalhar para redução desses custos, e controlar o processo (ROZENFELD *et al.*, 2010).

2.1.1.5. Design for Cycle of Life - DFCL

O Projeto para Ciclo de Vida ou DFCL trata de fatores que envolvem o ciclo da vida do produto, baseado nos custos e nas incertezas, de maneira a fornecer um modelo otimizado para especificação do produto e parâmetros do processo (BARBOSA, 2012).

2.1.1.6. Design for Environment - DFE

O Projeto para o Meio Ambiente ou DFE tem o propósito de minimizar o impacto ambiental do produto e de sua produção. Apresenta aspectos relacionados com o domínio de estratégias de marketing e políticas de decisões (gestão), e em um nível operacional relacionado ao domínio do projeto de produtos (projetista). Assemelha-se aos conceitos de projeto para sustentabilidade e toda gama de eco ferramentas e Green Design (ROZENFELD *et al.*, 2010).

2.1.1.7. Design for Reliability - DFR

O Projeto para Confiabilidade ou DFR visa a identificação de fatores que influenciam na confiabilidade do produto. Dessa forma, projetistas podem modelar seus projetos de maneira a identificar, potenciais falhas e tornar o produto confiável.

2.1.1.8. Design for Disassembly - DFD

O Projeto para Desmontagem ou DFD engloba as técnicas de projetar visando a desmontagem do produto, preocupando-se também com o descarte dessas peças. Nessa aplicação relacionam-se os conceitos de projeto para reciclagem (ROZENFELD *et al.*, 2010).

2.1.1.9. Design for Maintainability - DFMt

O Projeto para Manutenibilidade (*Design for Maintainability*) concentra-se no projeto para manter o produto em funcionamento durante seu ciclo de vida, levando em conta a

manutenção, inspeção, reparo, padronização, etc. Tem forte relacionamento com os métodos que tratam da ergonomia, estética, confiabilidade e montagem.

2.1.1.10. Design for Modularity - DFMD

O Projeto para Modularidade (*Design for Modularity*), é tido como um método sistemático de geração e seleção de conceitos modulares para produtos, conhecido como o método DFMD (BARBOSA, 2012).

2.1.1.11. Design for Standards - DFSt

O Projeto para Padronização (*Design for Standards*) tem por objetivo a unificação e a determinação de soluções por meio da limitação das possibilidades dessas, sem causar conflitos. Utiliza, para isso, normas nacionais e internacionais para a padronização de elementos, componentes, materiais, procedimentos de testes, etc. (ROZENFELD *et al.*, 2010).

2.1.1.12. Design for Safety - DFS

O Projeto para Segurança (*Design for Safety*) trata da segurança do usuário do produto, ou seja, todas as questões voltadas à segurança (também atendendo a normas), que o produto deve atender para quem estiver envolvido com ele em seu ciclo de vida.

2.1.2. Processo Tradicional

Os estudos de Boehm (1981), Rti (2002) e Galin (2004), demonstram que processos tradicionais de desenvolvimento de sistemas permitiram que 70% das falhas fossem originadas no início do ciclo de vida do desenvolvimento de um sistema; e destas, 80% não foram detectadas antes dos testes de integração ou mais tarde, incorrendo em um custo da ordem de dezesseis vezes maior quando comparado ao custo de correção na fase inicial de desenvolvimento.

Segundo Hernandez (2013), o ciclo de vida do desenvolvimento pode ser definido como as fases do desenvolvimento de um sistema, descrevendo as atividades que devem ser realizadas em cada etapa, os critérios de transição entre as fases e os artefatos gerados em cada fase.

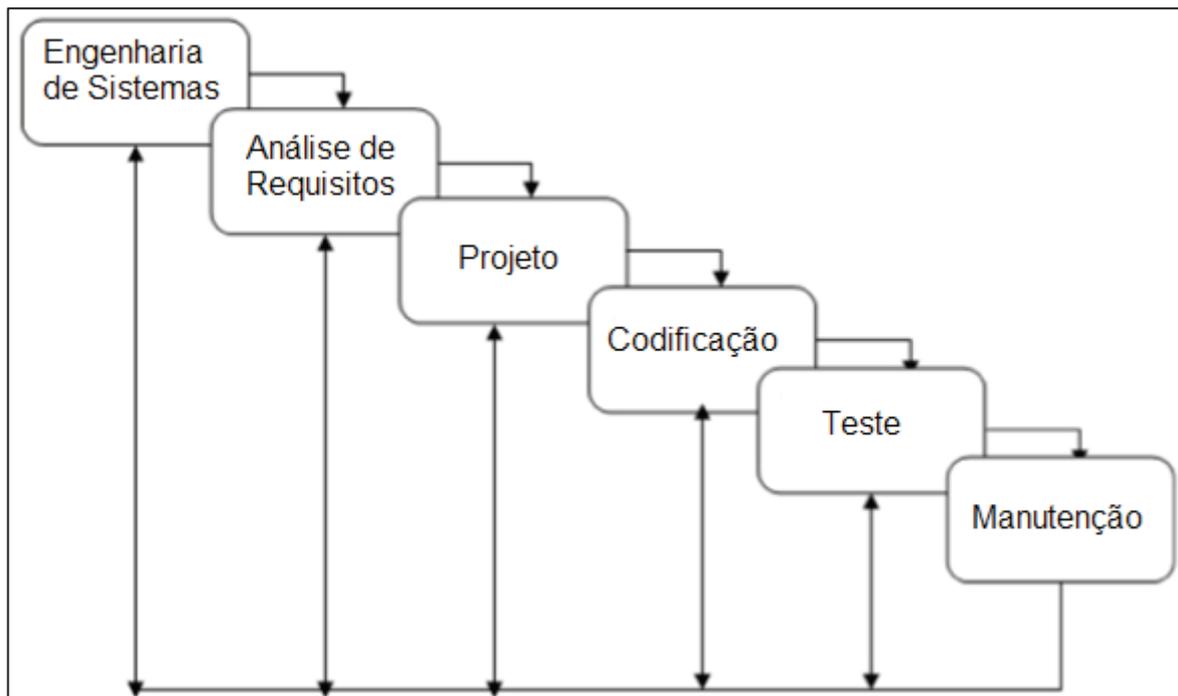
Ao longo dos anos, diversos ciclos de vida do desenvolvimento foram criados e aplicados em projetos de grande porte em desenvolvimento de sistemas e software; entretanto a maioria deles se baseia em uma das três mais importantes referências (INCOSE, 2008).

São eles:

- O modelo em Cascata (*Waterfall Model*) de Royce (1970)
- O modelo Espiral (*Spiral Model*) de Boehm (1981)
- O modelo em V (*VeeModel*) de Forsberg e Moss (1995)

O ciclo de vida de desenvolvimento em cascata descreve as atividades do desenvolvimento de forma sequencial com as fases: definição de requisitos do sistema; análise dos requisitos; especificações de projeto; construção; testes e operação. A característica fundamental deste modelo é que uma atividade só inicia quando a anterior foi completamente executada. Apesar de muito utilizada no desenvolvimento de sistemas e software, Royce (1970) considera o conceito válido para certos desenvolvimentos, mas alerta que a sua implementação é arriscada e sujeita a falhas, e então propõe alterações que incluem aspectos iterativos.

O modelo de desenvolvimento em cascata baseia-se na sequência de atividades padronizadas cujos resultados individuais são utilizados como pré-requisito para a atividade subsequente; é esquematicamente descrito como uma cascata que começa com os requisitos do sistema e termina com a operação (execução) do mesmo. A Figura 11 representa um modelo de desenvolvimento tipo em cascata. Esta metodologia possui uma sequência de estágios de produção independentes, que têm por objetivo entregar ao final desta, o produto definido na fase inicial (CASTILLO; SOUZA, 2013).

Figura 11 - Modelo em Cascata (*Waterfall*)

Fonte : Adaptado de (CASTILLO; SOUZA, 2013)

O maior risco deste modelo é o fato de que as iterações podem transcender as fases consecutivas, gerando uma revisão total do projeto; e que as mudanças requeridas sejam tão grandes que os requisitos do produto, sob os quais o desenho se baseia e que fornecem um racional para todos os demais, são violados (ROYCE, 1970).

A proposta de Royce (1970) para mitigar os riscos decorrentes do modelo em cascata é composta pelos seguintes passos:

- 1) Criar uma fase de desenho preliminar do software antes da fase de análise;
- 2) Gerar documentação abrangente do desenho;
- 3) A partir de o desenho preliminar fazer uma simulação completa do processo flexibilizando os requisitos

Uma razão para as deficiências e obscuridades em metodologias tradicionais de desenvolvimento de sistemas são as dificuldades em se conseguir antecipar os problemas que apenas o uso no ambiente organizacional consegue detectar (PEKKOLA; KAARILAHTI; POHJOLA, 2006)

Como consequência disto, a engenharia de desenvolvimento não consegue especificar completamente as funcionalidades; ou ainda tomar decisões apropriadas sobre o projeto do

sistema. Ao contrário, os desenvolvedores confiam nos *stakeholders* externos e os considera como essencial fonte de informação, aceitando que a participação destes seja o fator mais importante para o sucesso no desenvolvimento do sistema (LYNCH; GREGOR, 2004). As críticas às metodologias tradicionais concentram-se no aspecto que a especificação do problema seja gerada nas primeiras etapas do processo.

Para Furnival (1995) deve ser questionado se os requisitos do produto podem ser especificados de forma clara e precisa nas etapas iniciais do projeto. Esta hipótese está relacionada com os principais produtos de saída do processo, compreendendo os documentos e o conhecimento explícito que podem ser usados na tomada de decisão sobre o futuro sistema.

Apesar da filosofia embutida no modelo em cascata, para Lustosa (2009, p. 33) deve-se considerar:

Os objetivos de cada etapa basicamente permanecem os mesmos, entretanto, as modernas técnicas partem do princípio de interdependência. Na prática, diversas atividades de desenvolvimento podem ocorrer ao mesmo tempo e as diferentes partes de um projeto podem estar em etapas diferentes do ciclo. Assim como também é permitido aos desenvolvedores, a qualquer momento, o retorno para etapas anteriores, a fim de modificar e melhorar um sistema que esteja em desenvolvimento.

2.1.2.1. *Outros ciclos de desenvolvimento*

O modelo Espiral é representado graficamente como uma espiral, de forma que cada ciclo da espiral envolve uma progressão que aborda a mesma sequência de passos, para cada porção do produto e para cada um dos níveis de detalhamento; desde um conceito de operação até a codificação de cada programa individualmente. A abordagem fundamental dele é a de avaliar a cada volta da espiral as áreas do desenvolvimento do sistema que apresentam maior risco devido a incertezas. O modelo Espiral propõe que para as áreas de maior risco sejam realizadas ações que busquem mitigar ou eliminar estes riscos (BOEHM, 1981).

O modelo em V representa os aspectos técnicos do ciclo de vida de um projeto de desenvolvimento no formato da letra V, começando pelas necessidades do usuário na ponta superior esquerda e terminando com um sistema validado pelo usuário na ponta superior direita do V. No ramo esquerdo do V, a decomposição e definição descem como no modelo em cascata. Por sua vez, a integração e a verificação sobem para a direita realizando

verificações de unidades cada vez mais integradas, culminando na integração final do sistema (HERNANDES, 2013). Mesmo utilizando o modelo em Cascata para descrever as atividades de decomposição e definição, o modelo em V recomenda que em cada etapa do V sejam utilizadas técnicas de avaliação do risco e análise de viabilidade das soluções propostas. Exemplos destas técnicas incluem modelagem e simulação. Este modelo tem sido muito utilizado pela indústria aeroespacial.

2.1.3. Model Based Design - MBD

O *Model Based Design* é um tipo de simulação computacional que modela o comportamento de algum sistema real ou virtual, ao longo do tempo. É amplamente utilizado para a análise de sistemas e processos dinâmicos, como controle de tráfego aéreo, redes de comunicação, processos físicos e biológicos, e no desenvolvimento do projeto de sistemas em geral (FERRAZ, 2010).

Ao iniciar atividades de modelagem e simulação é necessário garantir a representatividade dos modelos matemáticos a serem utilizados; se o modelo não for uma representação válida do sistema em estudo, os resultados da simulação trarão pouca informação útil sobre o sistema real (RODRIGUES; TAVARES; PRADO, 1996).

A fim de garantir a representatividade dos modelos, uma estratégia é realizar o uso combinado de equipes de Desenvolvimento Integrado do Produto – DIP e pela construção de modelos com fidelidade crescente que permitam a completa validação dos requisitos ao longo do ciclo de desenvolvimento. Os processos de Desenvolvimento Baseados em Modelos e Desenvolvimento Baseados em Testes possibilitam desenvolver diversas soluções alternativas, para a melhor tomada de decisão, utilizando-se de laboratórios e simulações (BAKER; LONG, 2006).

Segundo o escritório de modelagem e simulação do departamento de defesa dos Estados Unidos, modelos são representações físicas, matemáticas ou lógicas de um sistema, uma entidade, um fenômeno ou um processo. Modelar consiste basicamente em aplicar padrões e rigorosas metodologias para a criação e validação de um modelo. Esta afirmação se refere aos modelos de uma forma geral. Algumas aplicações têm se destacado, são eles: o desenvolvimento de controladores; a especificação e validação de requisitos de sistemas; a

simulação computacional; os cálculos estruturais, dentre outras (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2007).

Processos baseados em modelagem e simulação têm sido largamente utilizados no desenvolvimento de sistemas complexos, como proposta de minimizar os testes realizados em protótipos que usualmente possuem custo elevado e também para agilizar as fases de desenvolvimento do processo. Atualmente, a EMBRAER, utiliza a tecnologia de modelagem e simulação em diversas etapas do desenvolvimento do produto; desde: modelos para ensaio em túnel de vento, modelos para prototipação rápida de sistemas e em ferramentas *Computer Aided Engineering* – CAE (SILVA, 2008).

O *Hardware-in-the-loop* - HIL refere-se a uma simulação onde alguns dos componentes são reais e não simulados. Muitos a consideram uma técnica bem segura, pois se trata de componentes reais trabalhando em ambientes virtuais, ou seja, a maioria dos componentes reais é substituída por modelos matemáticos e os componentes em teste são inseridos em uma malha fechada (SILVA, 2008).

O hardware é normalmente instrumentado por atuadores ou circuitos eletrônicos que introduzem perturbações ao componente em teste; e que retorna com sinais coletados por sensores, para a execução da simulação por software a fim de avaliar o comportamento do resto do sistema. Para se entender melhor este conceito, Mendes (2012, p. 1) afirma que:

Um dos aspectos mais interessantes da técnica HIL é que os componentes testados são submetidos à situação resultante das simulações, que por sua vez, têm o modelo alimentado pelos sinais lidos pelos sensores que instrumentam o hardware. Portanto, os sinais de excitação recebidos pelo hardware se adaptam às mudanças do sistema, tal como ocorre no sistema real.

A indústria aeroespacial está entre as pioneiras na utilização deste tipo de simulação, principalmente com o objetivo de desenvolver formas viáveis de realizar testes em sistemas de controle de voo; muito embora, desde então, as aplicações passaram a ser bastante diversificadas (MACLAY, 1997).

Grega (1999), descreve em seu trabalho os conceitos básicos e as aplicações práticas de HIL, utilizados em simulações. As etapas de construção de um sistema HIL, se iniciam com a elaboração do modelo de simulação que representa a parte virtual do sistema e a parte física real (hardware). É geralmente utilizada quando se tem pouca informação do seu comportamento dinâmico; ou pela dificuldade de se obter dados para a criação de um modelo matemático acurado.

Ainda são apresentados em Grega (1999), alguns recursos de software e hardware que são geralmente utilizados para o desenvolvimento de trabalhos a partir do HIL; tanto em ambientes industriais, quanto em pesquisas. Por fim o autor descreve um estudo de caso sobre a sintonização de um controlador.

A simulação HIL é bastante utilizada na avaliação e desenvolvimento de controladores, oferecendo baixo risco na experimentação de diferentes técnicas e metodologias de controle, eliminando a necessidade da plataforma real para teste (ANAKWA, 2002). Desta forma, é possível eliminar desperdícios e antecipar a detecção de defeitos ainda no projeto inicial dos controladores, reduzindo assim custo no desenvolvimento do projeto.

Para garantir a representatividade de experimentos realizados com o HIL, é de extrema importância a capacidade de simulação em tempo real dos modelos matemáticos dos componentes. Isto pode ser mais bem entendido pelas afirmações de SILVA (2008, p. 27)

A simulação em tempo real (STR) pode ser definida como aquela em que as variáveis de um sistema simulado representam fielmente não só os valores do sistema real, mas também os instantes temporais associados a esses valores.

No setor automobilístico a técnica de *Hardware-in-the-loop* é amplamente utilizada no desenvolvimento das Unidades de Controle Eletrônicas - ECU, no sentido de que tais ferramentas HIL, são úteis para o desenvolvimento e testes, uma vez que várias condições de operação podem ser testadas sem o risco para o hardware do veículo. Obtêm-se ainda a vantagem de avaliar as arquiteturas de controle antes mesmo da construção do primeiro protótipo real (MENDES, 2012).

2.1.4. Model Based Testing- MBT

Devido às demandas por uma diminuição dos recursos gastos em testes durante as etapas de desenvolvimento e nos testes realizados no protótipo final, a aplicação de modelos torna-se uma importante prática de apoio nesta etapa, pois possibilita a avaliação de requisitos a menores custos (GREGA, 1999).

A adoção das técnicas de *Model-Based-Testing* vem sendo altamente utilizada no desenvolvimento de sistemas computacionais embarcados, diversas companhias tem observado as vantagens obtidas nos processos de desenvolvimento, diminuição do tempo de

desenvolvimento, aumento da qualidade final do produto e significativa redução de custos (ALTHOLFF, 2007)

Um dos benefícios da utilização de modelos é a capacidade de desenvolver algo que pode ser entendido e utilizado por todas as pessoas envolvidas no projeto, facilitando o reuso e os testes. Segundo Altholff (2007, p.78) “[...] modelos podem ser tratados como especificações executáveis do sistema”.

Com o avanço no desenvolvimento de aplicações de sistemas embarcados, as técnicas de MBT, normalmente incorporadas no desenvolvimento destes produtos, se tornaram cada vez mais difundidas. O desenvolvimento de aplicações embarcadas normalmente exige: automação dos testes (devido à quantidade requerida); projeto e testes orientados a modelos; modelagem matemática para atender aos requisitos de confiabilidade e desempenho; e componentes desenvolvidos para reuso (GRECA, 1999).

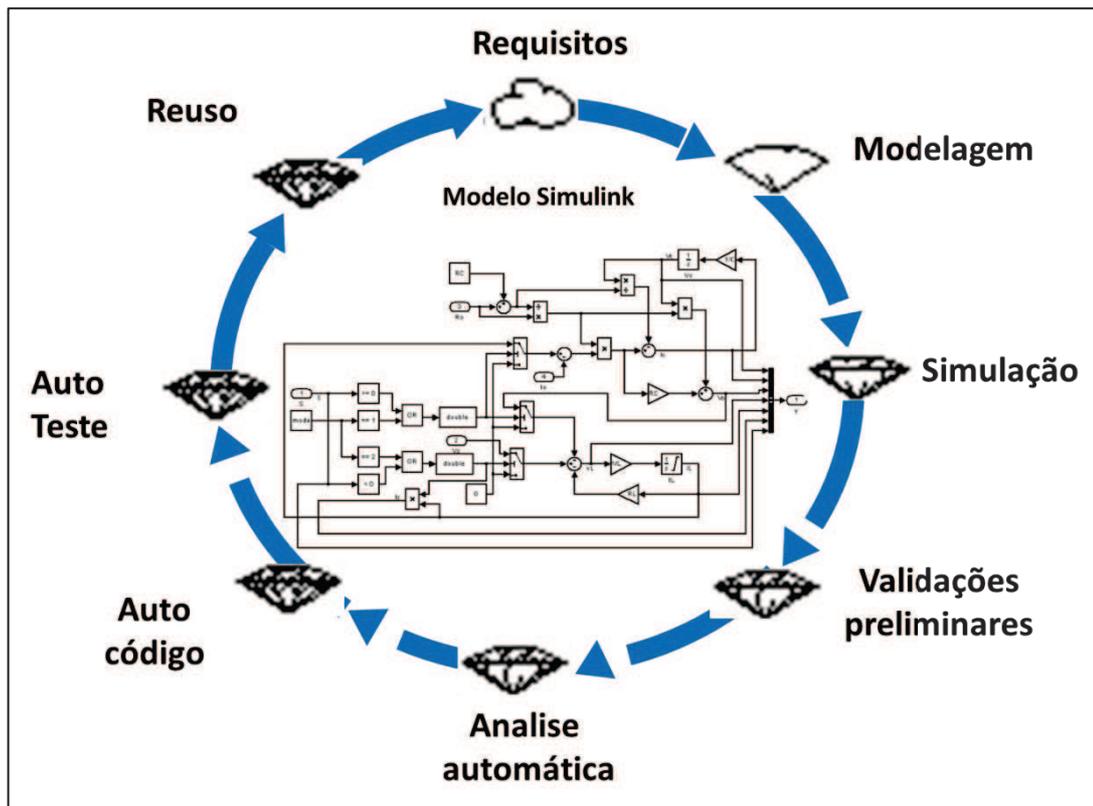
No mercado de sistemas complexos, como aeronaves; em que os sistemas estão cada vez mais integrados, a necessidade de utilização de uma estratégia de testes que aumente a eficiência da sua execução é de extrema relevância (JIMENEZ, 2005). Quando se fala em *Model Based Testing* não se pode deixar de lado o conceito de *Design for Testability*, ou seja, produtos concebíveis para serem facilmente testados.

Os principais objetivos da utilização de MBD e MBT são: redução do ciclo de desenvolvimento do produto; a antecipação da detecção de defeitos; facilitar a compreensão dos testes de sistemas; reuso dos artefatos de teste ao longo das etapas de desenvolvimento.

Observa-se na Figura 12, no processo utilizado pela *Rockwell Collins*, um ciclo contínuo de desenvolvimento, onde repetidamente os requisitos do produto são revisitados, modelados, simulados e por fim testados. Ainda na Figura 12, verifica-se o valor agregado de cada etapa de desenvolvimento, representado pelo nível de detalhe do diamante.

Esta característica favorece a robustez do desenvolvimento do produto, pois em todas as etapas do desenvolvimento, os requisitos são validados e verificados (UTTING; LEGEARD, 2007).

Figura 12- Processo de desenvolvimento MBD utilizado pela Rockwell Collins



Fonte: (UNIVERSIDADE DE MINNESOTA, 2010, p. 10)

Ainda para Utting e Legeard (2007) o *Model-Based-Testing* significa desenvolver métodos, procedimentos e ferramentas para: criar, executar e analisar os sistemas a serem testados ao longo do ciclo do desenvolvimento do produto. Este processo deve identificar as oportunidades de automação dos testes e as suas capacidades, possibilitar reuso dos artefatos de testes em todo o ciclo de desenvolvimento do produto.

2.2.Simulação

Neste capítulo pretende-se conceituar simulação e suas aplicações na manufatura.

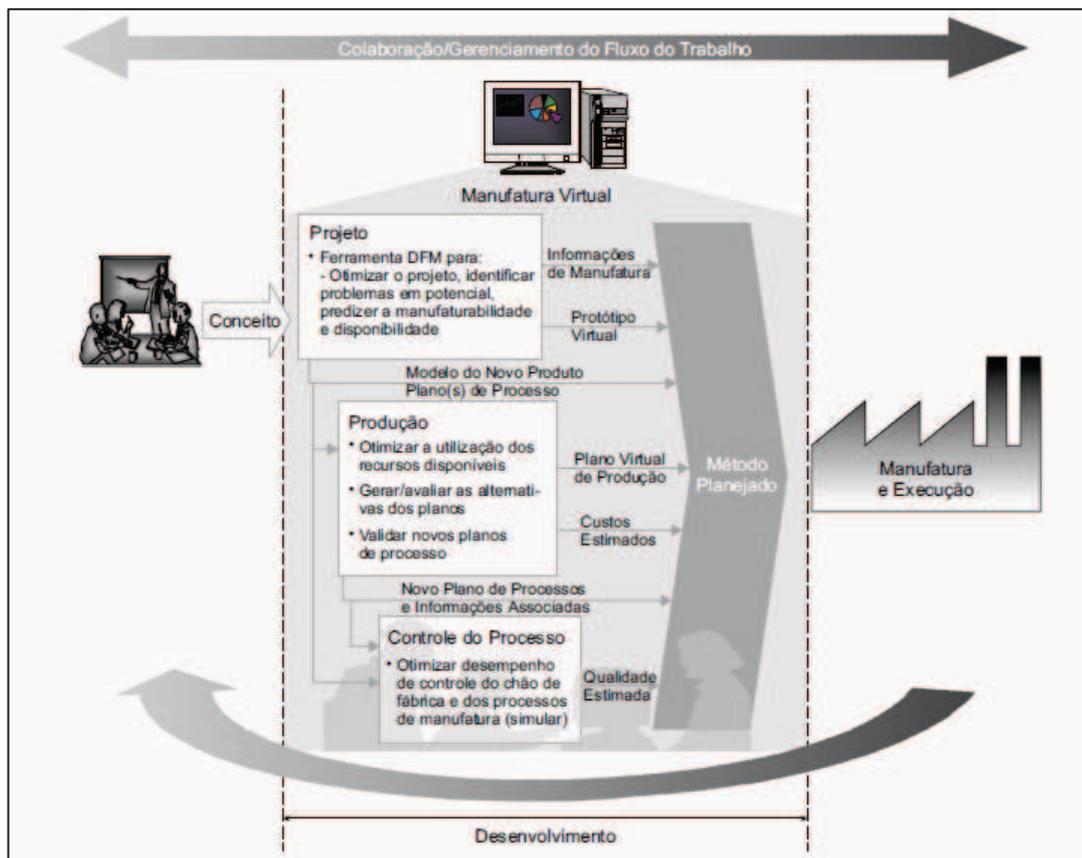
2.2.1.Manufatura Virtual

A Manufatura Virtual - MV vem sendo utilizada pelas empresas a fim de revolucionar seus processos, visando introduzir no mercado produtos de qualidade superior, mais rapidamente e a um menor custo. Geralmente, se faz necessário o desenvolvimento de um ambiente integrado, composto de diversos sistemas e principalmente ferramentas de software,

com a finalidade de gerar um novo método de desenvolvimento de produto. A ideia é que esse novo ambiente proposto seja abordado em todo o processo de desenvolvimento, simulação e fabricação do produto, possibilitando a execução dessas atividades no computador; Ou seja: virtualmente; antes de realizá-las no mundo real, independentemente do grau de complexidade da forma e da estrutura de um produto (SOUZA *et al.*, 2002).

A tecnologia de Manufatura Virtual está focada na reprodução das operações da manufatura real, por meio de modelos, simulações e inteligência artificial. Trata-se de um processo baseado no conhecimento e na informação técnica. Sua utilização permite que várias atividades da manufatura sejam integradas e realizadas, proporcionando assim a redução de custos e a diminuição do *time-to-market*. A utilização de modelos baseados nas instalações reais da manufatura e dos processos, possibilita não apenas informações reais sobre o produto e seus processos de manufatura, mas também permitir a avaliação e validação destes (PORTO; PALMA, 2000). A Figura 13 ilustra um exemplo de ambiente da Manufatura Virtual.

Figura 13 - Ambiente da Manufatura Virtual

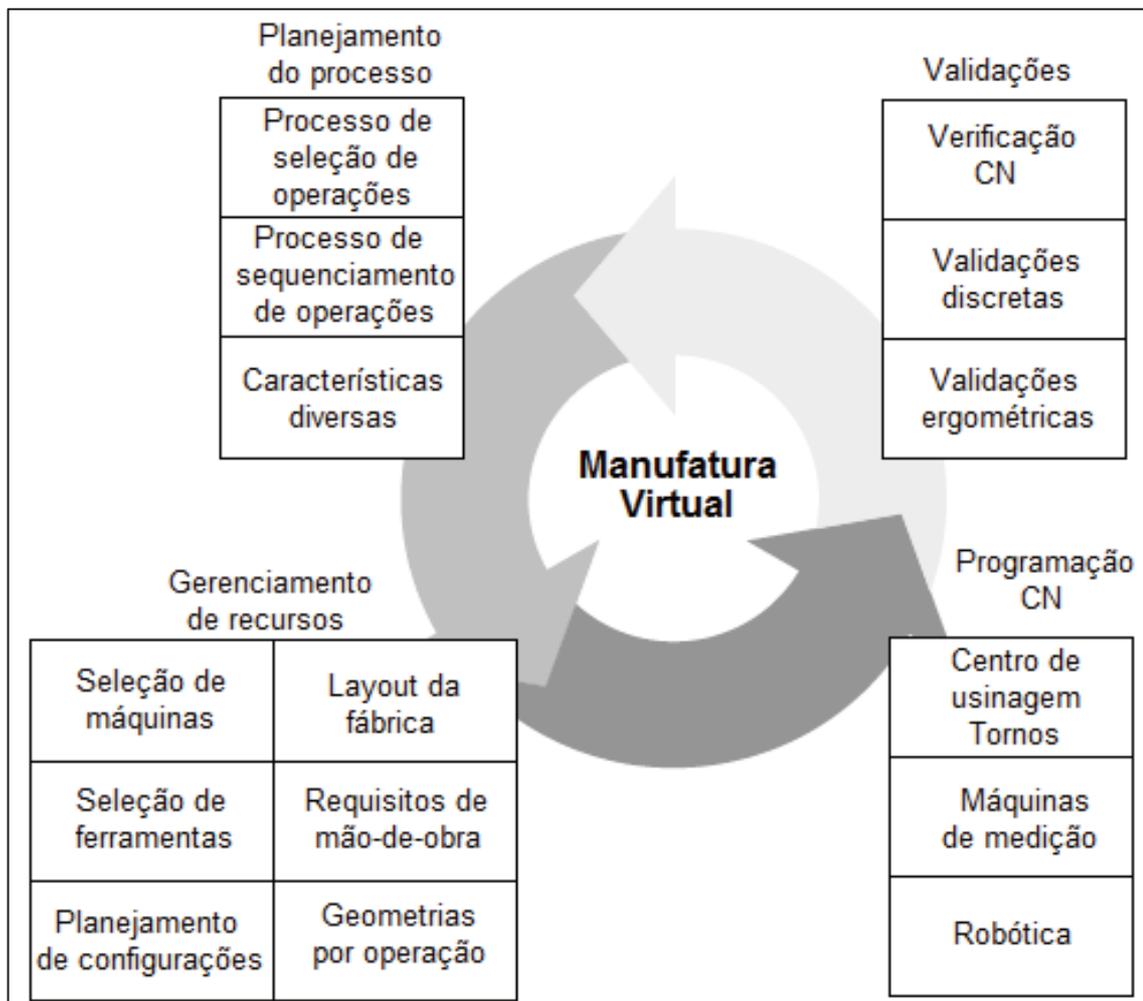


Fonte: (PORTO; PALMA, 2000, p. 300).

Pode-se considerar a Manufatura Virtual um ambiente de realidade virtual exercido para possibilitar todos os níveis de controle em um sistema discreto ou contínuo. Seus objetos incluem funções tangíveis e intangíveis, de produção, incluindo: fabricação, os custos, o processo de planejamento, a programação, o controle de qualidade e o sistema de informações gerenciais (KHAN; RAOUF; CHENG, 2011).

Segundo Lee et al. (2001) o principal benefício esperado pela Manufatura Virtual é a redução do tempo de ciclo e do custo de desenvolvimento de produto. No desenvolvimento de novos sistemas ou produtos, a tomada de decisão sobre custos ocorre nas primeiras etapas do ciclo de desenvolvimento. A correção de erros encontrados nas etapas finais do processo de desenvolvimento, causados por má decisões nas etapas iniciais, envolve mudanças no projeto que consomem tempo e custo. A Figura 14 apresenta as principais atividades cobertas pela MV.

Figura 14- Principais atividades a serem cobertas no ambiente de Manufatura Virtual.



Além de amenizar a correção tardia de erros, a Manufatura Virtual complementa o processo de Desenvolvimento Integrado do Produto (DIP), pois viabiliza uma maneira na qual as informações da manufatura possam ser compartilhadas já nas fases iniciais do desenvolvimento; ou seja: irá proporcionar precisão e formalismo, permitindo a verificação rápida dos projetos e o aumento das variáveis para as tomadas de decisão (SOUZA *et al.*, 2002).

Com o avanço da Manufatura Virtual, a sua integração aos recursos de CAD e CAM possibilitam a geração de ferramentas eficientes no desenvolvimento da manufatura, contribuindo assim para a otimização de seus processos de fabricação e montagem. Esta integração enfatiza critérios de portabilidade entre os sistemas CAD/CAM no desenvolvimento de Mundos Virtuais, utilizando-se para isso das técnicas de modelagem, visualização e navegação. Tais técnicas incrementam o processo de manufatura tornando-os eficientes e acessíveis para as pequenas e médias empresas (JUGEND, 2006).

As pesquisas de Nikolaos, Markos, Aristomenis (2008) demonstram que a tendência na utilização de sistemas de simulação concentra-se no projeto integrado de desenvolvimento do produto. Os enfoques principais aplicados no desenvolvimento podem ser distinguidos em três categorias de acordo com o assunto e a tecnologia necessária:

- Aplicações focadas em processos de produção, como operações de usinagem.
- Montagem virtual, que pode ser consideradas como parte das aplicações virtuais da fabricação, porém com características diferentes das aplicações típicas de manufatura virtual.
- Prototipação virtual, focadas no estudo do produto, por meio do desenvolvimento de digital *mock ups* e *Model Based Design*.

O Quadro 2 apresenta os principais processos envolvidos no desenvolvimento da manufatura virtual, montagem virtual e prototipação virtual.

Quadro 2 - Processos envolvidos na Manufatura Virtual

Manufatura Virtual	Montagem Virtual	Prototipação Virtual
Sequencia dos processos de produção.	Aplicações que envolvem a interação humana com processo automáticos ou manuais.	Modelos que representam o comportamento de um produto ou sistema.
Fluxo de matéria Prima	Mecanismos de montagem e desmontagem	Modelos CAE / CAD
Visualização das células de manufatura	Lay-out de fabricação	Model Based Definition
Aplicações de robótica	Ergonomia e <i>Human factors</i>	Engineering Requirements
Aplicação dos conceitos de <i>Design for Manufacturing</i>	Aplicação dos conceitos de <i>Design for Assembly</i>	Aplicação dos conceitos de Model Based Design

Fonte: Adaptado de (NIKOLAOS; MARKOS; ARISTOMENIS, 2008).

2.2.2. Simulação de Sistemas

Nos dias atuais, a simulação de sistemas, processos e da produção do produto constituem uma parte essencial do desenvolvimento do produto. Com o desenvolvimento dos sistemas computacionais; a simulação, por meio das tecnologias de Realidade Virtual ou Manufatura Virtual é capaz de fornecer as seguintes características:

- Visualização dos mundos reais;
- Interação entre o usuário e o ambiente virtual desenvolvido;
- Estudo específico das características do produto em condições quase reais;

Neste sentido, engenheiros podem então obter e gerar informações sobre o produto ou o processo produtivo durante o desenvolvimento; o que era impraticável com os métodos tradicionais de desenvolvimento, pois requerem maior custo e tempo (NIKOLAOS; MARKOS; ARISTOMENIS, 2008).

As empresas do setor automobilístico e aeronáutico têm usado cada vez mais a simulação como ferramenta de suporte à decisão. A maioria faz uso da simulação de eventos discretos para modelar sistemas de manufatura como o layout de fábrica, fluxo de processo, sistemas de manuseio de material, planejamento de capacidade, utilização de mão-de-obra, investimento em novos equipamentos, programação da produção e logística (SOUZA *et al.*, 2002).

Ainda segundo SOUZA *et al.* (2002, p. 306):

No futuro, modelos de simulação se desenvolverão como o conceito de um sistema se desenvolve, crescerão como cresce o projeto em detalhes, suportarão atividades de validação da integração do sistema como o sistema real é construído e instalado e suportarão a tomada de decisões durante o estágio de operação do sistema real. À medida que o sistema real é modificado, modelos de simulação correspondentes são atualizados.

Os trabalhos de Khan, Raouf e Cheng (2011) apresentam que os sistemas de simulação para suporte às atividades de Manufatura Virtual podem ser distribuídos em quatro grandes grupos: a simulação de sistemas de manufatura; a simulação de processos de manufatura; a simulação de sistemas mecânicos e a simulação de elementos finitos. As ferramentas e softwares desenvolvidos são aplicados principalmente nas seguintes atividades:

- Processos de fabricação e de montagem;
- Análise de fluxo de material e layout de fábrica;
- Eventos discretos da manufatura;
- Programação de controle numérico;

Os processos de fabricação e montagem fornecem um método sistemático para o projeto de fábrica (criação e análise visual do modelo), enfatizando os conceitos da Engenharia Simultânea. Tem-se como exemplos os software's, VisFactory da Siemens e o DELMIA Process Enginer (NIKOLAOS; MARKOS; ARISTOMENIS, 2008).

A simulação da atividade de integração de desenhos de fábrica e caminhos do fluxo de material com os dados de produção possibilita a avaliação do desempenho de um sistema produtivo e dimensionamento do impacto de possíveis mudanças. A simulação do chão de fábrica permite também definir ainda nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto, a melhor estratégia de fabricação como por exemplo, definir entre uma estratégia de montagem em células ou produção contínua em linha, que melhor se adapte as características e demandas do produto. Esta capacidade é a base da criação de uma fábrica virtual . Tem-se como exemplo de softwares nessa área o eM-Plant da Tecnomatix, o FactoryFlow e o FactoryCAD da Siemens e o Factor/AIM da Pricster (MAS *et al.*, 2012).

Ainda segundo Khan, Raouf e Cheng (2011) a simulação tem grande contribuição na análise de eventos discretos, pois permite modelar questões complexas de manuseio de material e manufatura, provendo animações realistas, enquanto o modelo está sendo

executado. Pode-se citar como exemplo de softwares o AutoMod da Autosimulations, o Quest da Delmia, o Witness da Lanner Group Ltda. e o Arena da Rockwell.

A programação de controles numéricos ou Controle Numérico Computadorizado - CNC utilizada em processos de usinagem de metais, tais como: fresamento, torneamento, furação e corte podem ser simulados interativamente, demonstrando em tempo real o processo de remoção de material e o caminho da ferramenta, o que permite até mesmo detectar automaticamente colisões de ferramentas, interferências entre peças e condições de corte inadequadas. A utilização deste tipo de tecnologia permite visualizar virtualmente a transformação da matéria-prima em um produto final. Alguns softwares disponíveis nessa área são o Vericut da CGTech, o Virtual NC da Delmia e o NC Simul da Spring (SOUZA *et al.*, 2002).

Segundo Nikolaos; Markos; Aristomenis (2008) a programação de robôs, para o desenvolvimento e otimização de aplicações em: pintura, processos de inspeção, solda e células de manufatura, utilizam-se de simulação para a avaliação do processo. Pode-se citar como exemplo os softwares UltraArc e o UltraPaint da Delmia, o CimStation Robotics e por fim o CimStation Inspection da Silma. A Figura 15 ilustra um exemplo de uma avaliação de simulação com robôs na avaliação de uma célula de manufatura.

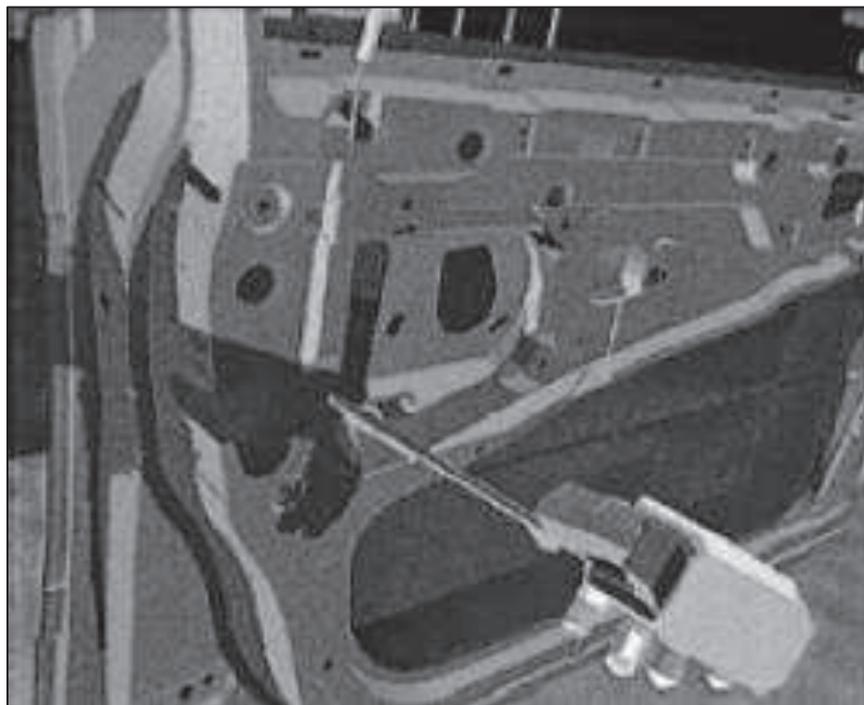
Figura 15- Avaliação de uma célula de manufatura com robôs



Fonte: (NIKOLAOS; MARKOS; ARISTOMENIS, 2008, p. 7)

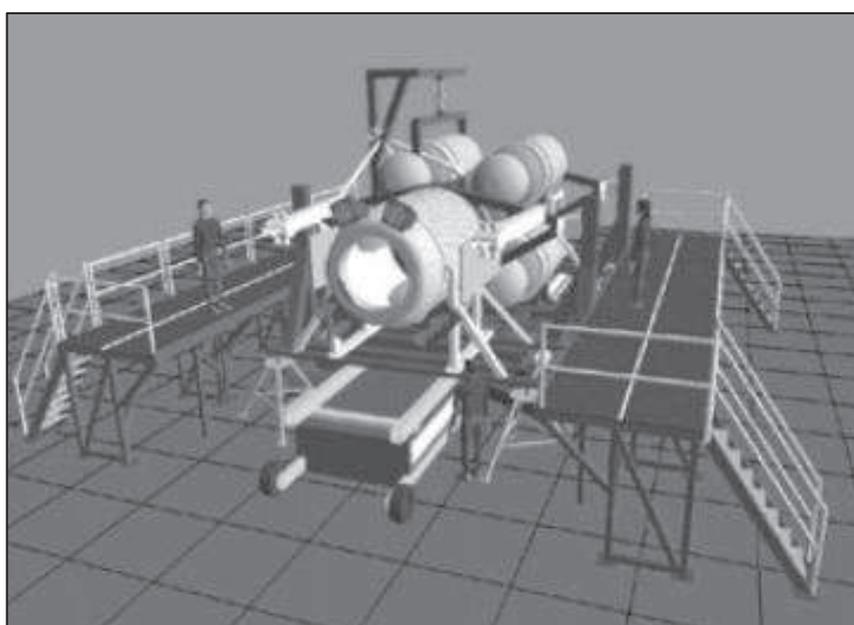
Grandes empresas como Ford, BMW, Boeing, AIRBUS dentre outras, fazem uso intensivo de softwares de simulação no desenvolvimento de seus processos e sistemas, conforme ilustra a Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

Figura 16 – Simulação de um Processo de Montagem de uma porta na BMW



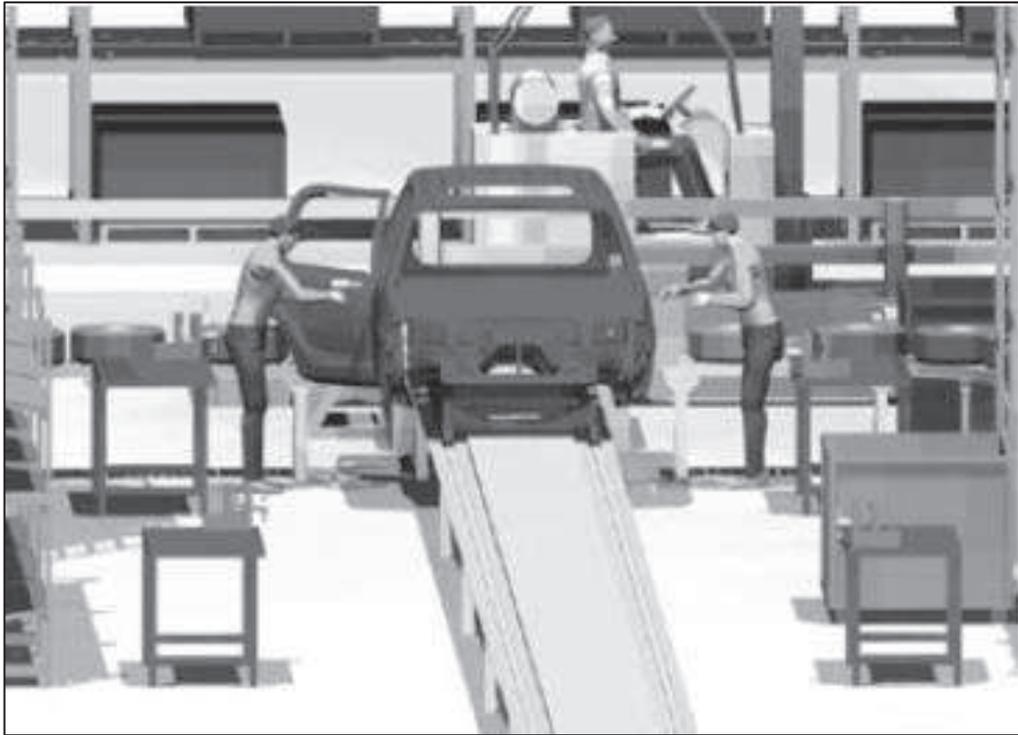
Fonte: (ZACHMANN; SA, 1999, p. 8)

Figura 17 - Aplicação da BOEING utilizando o software Robcad



Fonte : (LEDERER, 1996, p. 9)

Figura 18 - Aplicação da FORD utilizando o software Visfactory



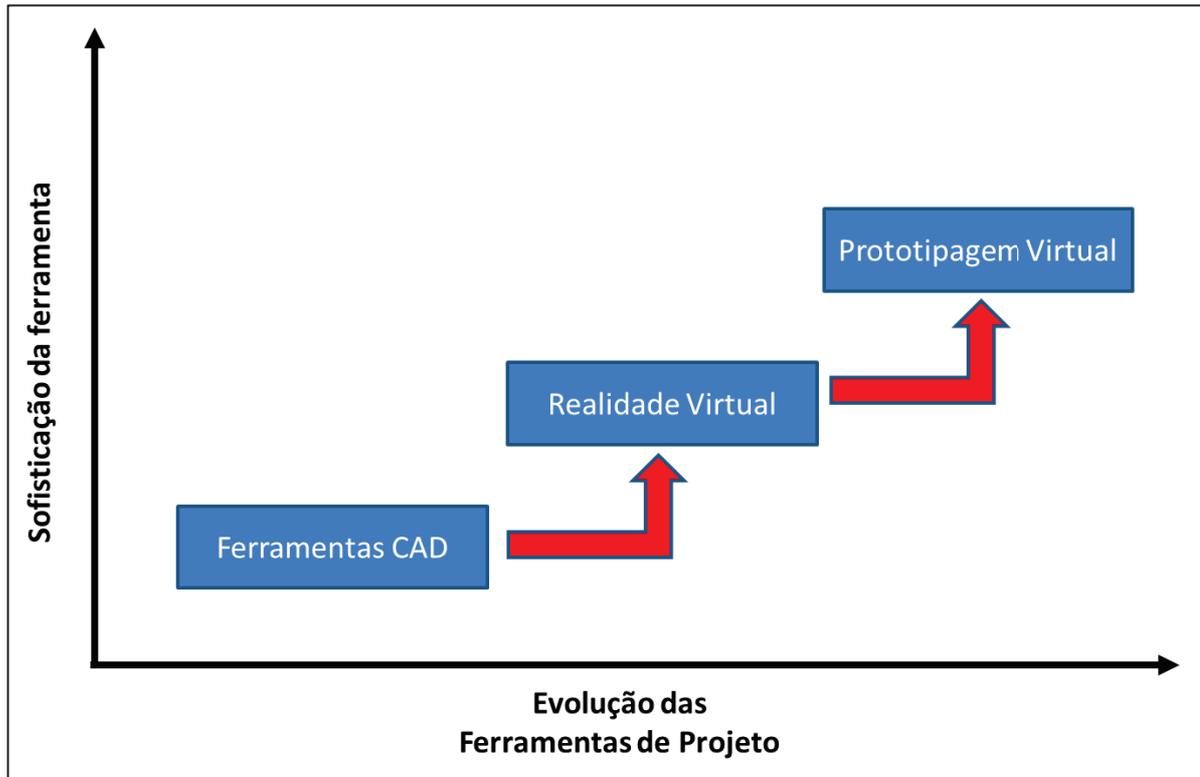
Fonte: (LEDERER, 1996, p. 9)

Uma das vertentes da simulação é a Prototipagem Virtual, também conhecida como prototipagem digital ou modelagem virtual, tem sido ampliada na área de simulação graças a evolução da computação. A integração das tecnologias, tais como a simulação, *Computer-aided-design* - CAD e Realidade Virtual permitiram o desenvolvimento de sistemas de Prototipagem Virtual acessíveis, baixo custos, fáceis de usar. Tais sistemas estão cada vez mais sendo vistos como a próxima geração de sistemas informatizados no desenvolvimento do produto (LEDERER, 1996).

Segundo Mcleod (2001) a Prototipação Virtual - PV é uma evolução das ferramentas CAD, em sua última análise, ferramentas de PV utilizadas na manufatura discreta integradas aos sistemas CAD, conhecida como a prototipagem digital, servem para demonstrar que a tecnologia está madura em termos de aplicação empresarial, deixando de ser consideradas como técnicas experimentais para serem diferencial no desenvolvimento do produto em empresas inovadoras.

A Figura 19 ilustra esta evolução das ferramentas de projeto.

Figura 19 –Evolução das ferramentas computadorizadas de desenvolvimento do produto

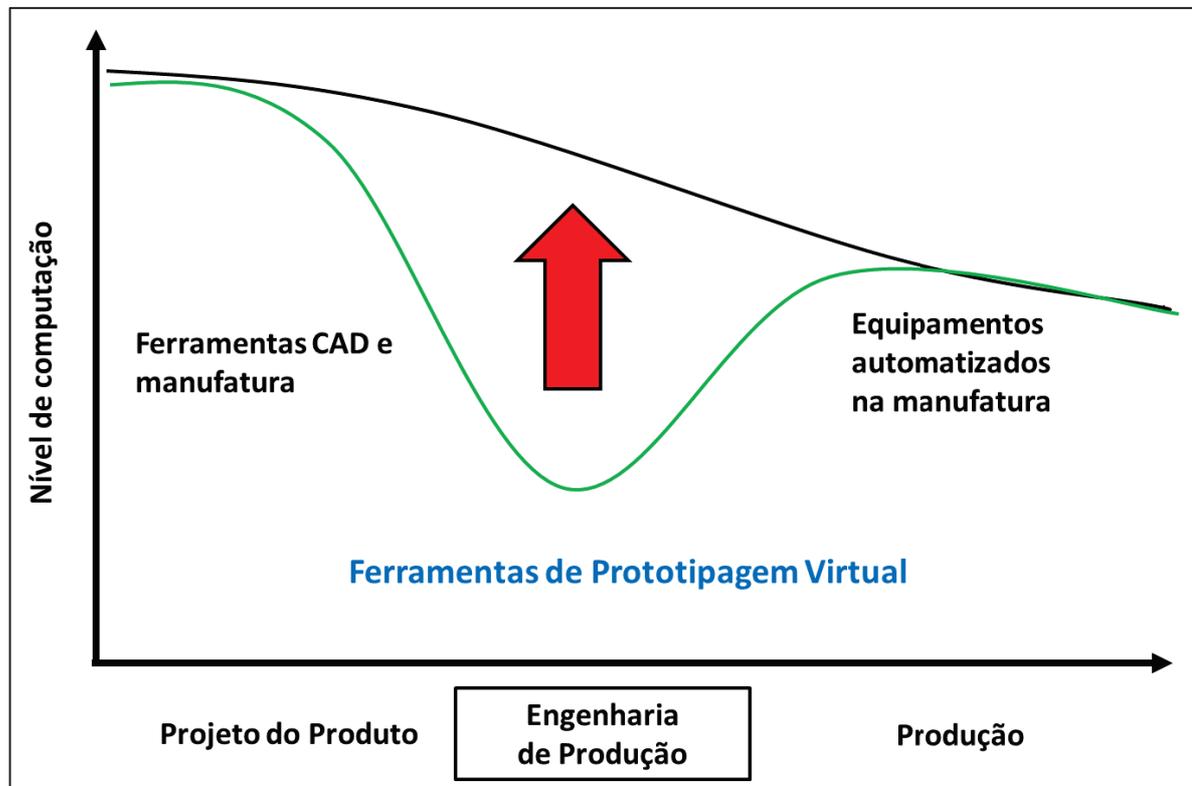


Fonte: (MCLEOD, 2001, p. 4)

A prototipagem virtual pode ser considerada como uma ferramenta de software de engenharia, conhecida como *software-based-engineering*, esta ferramenta implica na capacidade de modelagem de sistemas mecânicos, simulação e visualização em ambiente 3D, em condições bem próximas do mundo real. Esta capacidade oferece estudos colaborativos durante o projeto do produto, no qual refinamentos e a otimização da solução são realizados antes da construção do modelo físico (LEDERER, 1996).

A prototipagem virtual pode ser considerada como uma evolução das ferramentas CAD e de Realidade Virtual, como ilustra a Figura 20; Ele preenche a lacuna entre as atuais ferramentas de design e os sistemas de fabricação automatizada. Também permite que engenheiros e designers utilizem técnicas para construir simulações interativas com modelos que representam aspectos do comportamento físico do produto, ainda em fase de desenvolvimento digital, além de permitir testes já nas etapas iniciais (MCLEOD, 2001).

Figura 20 - Preenchimento dos gaps na automação industrial pela Prototipação Virtual



Fonte: Adaptado de (LEDERER, 1996, p. 6)

Uma vez criado um modelo virtual de produto funcional então ele pode ser testado de inúmeras de maneiras, eliminando a necessidade de um modelo físico. Se um modelo 3D virtual completo de um protótipo e de seus ferramentais de montagem existe, é possível aplicar um pacote de simulação de montagem para obter uma simulação completa, mecânica e cinemática, da sequência de montagem e avaliar a acessibilidade dos componentes. A equipe de Engenharia também pode utilizar a Prototipagem Virtual para medir pequenos componentes que normalmente seriam difíceis de serem medidos sem afetar as condições de teste. Testes ergonômicos também podem ser aplicados nestes modelos, a fim de realizar análises, como por exemplo, em automóveis, aviões e estações de montagem (MCLEOD, 2001).

2.2.3. Automação Aeronáutica

Quando se fala em automação logo se relaciona algo que possui algum controle automático, ou seja: ações que não dependem da intervenção humana. Porém, este conceito é

discutível, pois a ação humana sempre será necessária, até mesmo para a construção e implementação dos processos automáticos (SILVA, 2007).

A automação industrial tem o potencial de aumentar a produtividade, reduzir custos, aumentar a qualidade, a repetibilidade e a flexibilidade de processos industriais. Assim ela vem sendo utilizada amplamente em diversos setores industriais (FERREIRA; TRABASSO, 2009).

Devido às peculiaridades do setor aeronáutico (regulamentações e certificações), a automação ainda não é tão empregada no setor, quando comparada com o nível de automação em outros setores. Todavia, a indústria aeronáutica tem constatado que a automação pode ser um recurso para melhorar o processo produtivo, permitindo maior competitividade no cenário mundial (DORF; KUSIAK, 2007).

Frente a crescente demanda de encomendas, os fabricantes do setor aeroespacial estão seguindo a mesma estratégia das empresas automotivas; ou seja: utilizando a robótica avançada, máquinas especiais e outras ferramentas de automação, para auxiliar no ganho da produtividade, e melhorar a eficiência da indústria aeroespacial (BARBOSA, 2012).

Outro fator a ser considerado é que segundo Dorf e Kusiak (2007) a automação de um processo torna-o autossuficiente, reduzindo a necessidade da intervenção humana, portanto, a decisão de automação de um processo não pode ser baseada somente no ganho de produtividade. No setor industrial, a automação procura reduzir e eliminar a necessidade de intervenção humana por meio da inserção de sistemas mecânicos e ou eletrônicos que substituem as funções desempenhadas pelos operadores, reduzindo, como consequência, a variabilidade dos processos industriais.

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

- Máquinas com Controle Numérico
- Controladores Lógico Programáveis
- Robótica
- Sistemas Flexíveis de Manufatura

Pode-se observar no Quadro 3, que várias são as razões para a aplicação de automação em processos industriais.

Quadro 3 - Oportunidades para implementação da automação

Fatores para automação da produção	
Aumento de produtividade	muitas vezes a automação pode proporcionar o aumento da taxa de produção
Segurança	a automação de um processo permite que operações perigosas para o homem possam ser executadas sem a sua intervenção direta, aumentando a segurança inerente ao processo;
Qualidade	normalmente, a automação leva a obtenção de maior qualidade dada à inserção de sistemas computadorizados e sensores capazes de compensarem os erros e aumentar a precisão;
Repetibilidade	diferentemente de um processo manual, um processo automático é desenvolvido para que as operações sejam repetidas sempre da mesma forma dentro de tolerâncias estabelecidas, diminuindo a retrabalhos e não conformidades;
Ergonomia e segurança	operações que podem trazer riscos a um operador humano podem ser executadas por dispositivos automáticos de modo a evitar problemas de ergonomia ou até mesmo de segurança na operação;
Redução de mão de obra	a automação leva a redução da intervenção humana e possibilita, normalmente, a substituição de um número significativo de pessoas, reduzindo assim o custo operacional;
Flexibilidade	possibilidade de reconfiguração e adaptação a novas situações sem grandes investimentos

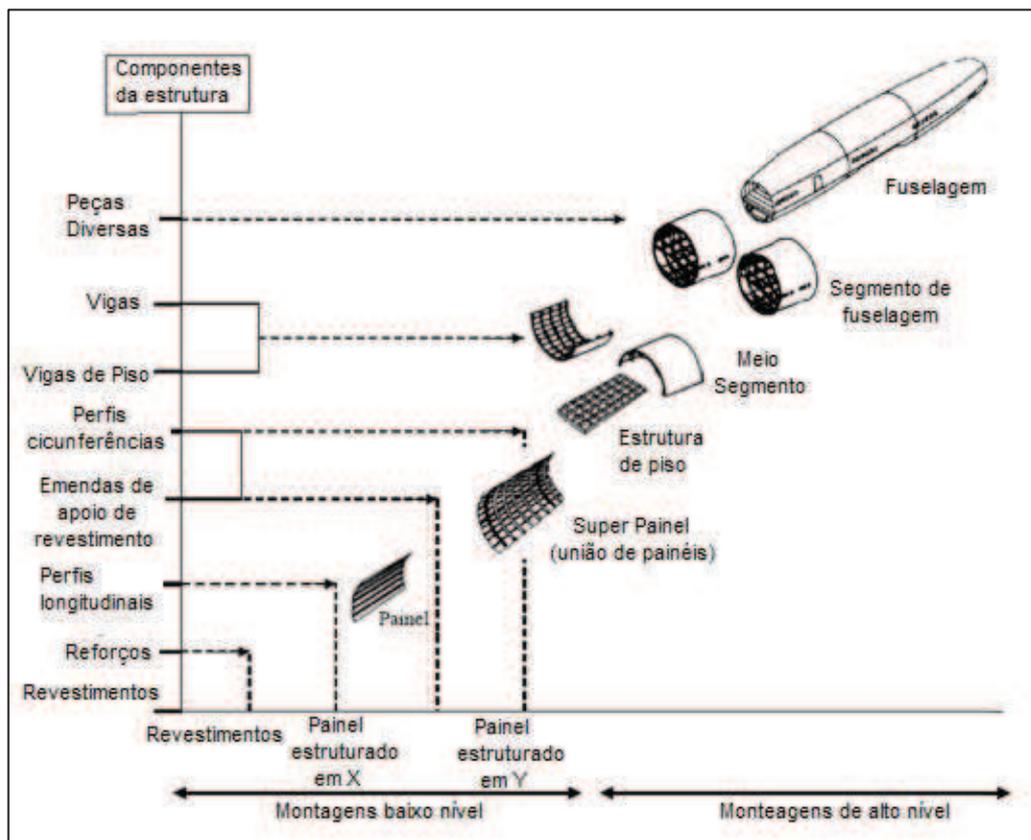
Fonte: Adaptado de Dorf e Kusiak (2007).

Por outro lado, o processo de montagem estrutural de aeronaves é uma área que mais evoluiu em relação à automação, na afirmação de VILLANI *et al.* (2010, p. 633) verifica-se isso:

Há várias formas para a implantação da automação no setor aeronáutico, dentre elas, aquela que utiliza robôs industriais de uso geral e/ou customizados para um processo específico. Há vários benefícios associados à utilização de robôs. Para o processo de rebiteamento, por exemplo, destaca-se a eliminação do uso de gabaritos dedicados para furação. Estes gabaritos são necessários quando a operação é realizada de forma manual e tem um custo elevado para o fornecedor. Para a indústria aeronáutica brasileira, em particular, a automação é um recurso essencial para sua sobrevivência num mercado globalizado.

O processo pode ser observado na Figura 21, no qual se observa as diversas etapas da montagem estrutural de uma aeronave, desde a fabricação de painéis, até a obtenção dos painéis de fuselagem e de sua junção final. Os processos de mais baixo nível se caracterizam pelo grande uso de rebites. Ou seja, grande quantidade de operações de rebitagem; já as montagens de alto nível caracterizam-se por exigir soluções com maior restrição de acesso e nivelamento dos painéis (MUNROE; WILKINS; GRUBER, 2000).

Figura 21 - Etapas do processo de montagem estrutural de aeronaves

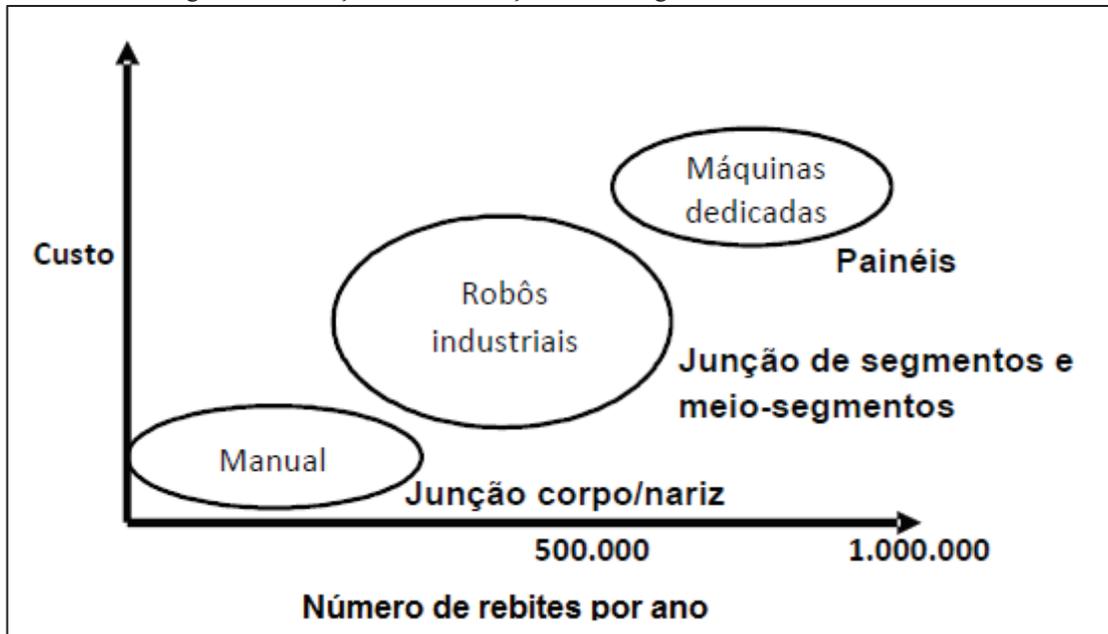


Fonte: (MUNROE; WILKINS; GRUBER, 2000, p. 102)

No processo de automação da montagem estrutural de aeronaves, a solução para automação pode variar de acordo com a etapa do processo de montagem, conforme observado na Figura 21; onde por exemplo, nos processos de baixo nível se justifica o desenvolvimento de máquinas dedicadas para sua automação. Porém, o mesmo não se aplica às montagens de alto nível, onde o número de operações é menor e as restrições de acesso e nivelamento das partes exigem soluções de maior flexibilidade. Villani et al (2010, p. 635) afirma que “[...] no conceito de sistemas flexíveis de manufatura, a indústria aeronáutica tem caminhado na direção da utilização de robôs industriais para a automação destas etapas do processo de

montagem estrutural de aeronaves”. Tal variação de soluções de automação pode ser observada na Figura 22.

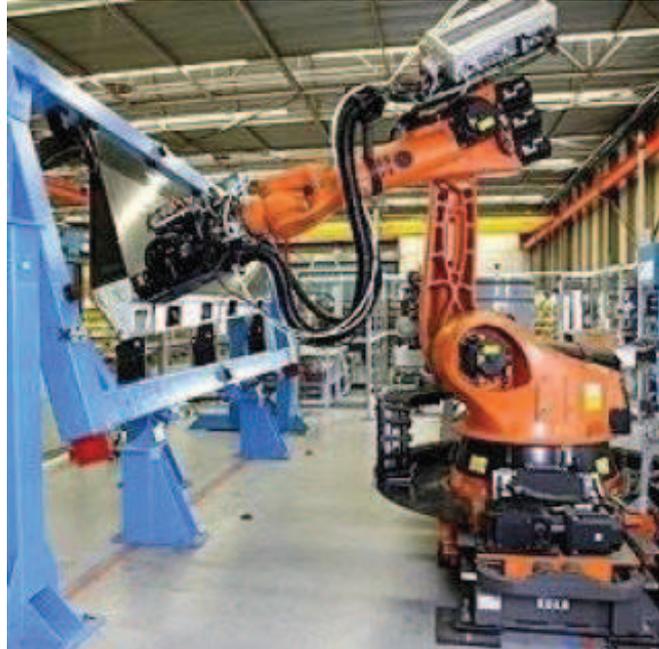
Figura 22 - Soluções de Automação da montagem estrutural de aeronaves



Fonte: (VILLANI *et al.*, 2010, p. 11)

A Robótica vem sendo amplamente utilizada na automação dos processos de manufatura nos fabricantes de aeronaves. A Figura 23 ilustra um destes casos.

Figura 23 - Robô de furação e rebiteagem na empresa Stork-Fokker



Fonte: (KUKA, 2014)

A Figura 23 mostra um robô de furação e rebiteamento utilizado pela empresa de serviços aeronáuticos *Stork-Fokker* em componentes de material composto e de alumínio. Esse sistema realiza a execução da furação de uma superfície de comando de material composto (FERREIRA; TRABASSO, 2009).

Atualmente as fabricantes de aeronaves como Boeing, Airbus e Embraer vêm fazendo o uso intensivo dos conceitos de *Design for Automation*, que tem por finalidade realizar um design que permita a automação dos processos produtivos. Para que isto ocorra, se faz necessário uma integração entre o produto desenvolvido e o processo de produção a ser automatizado, sendo necessária a integração das funções:

- Minimização do número de peças e Padronização;
- Uso de sistemas modulares;
- Alta flexibilidade dos sistemas;
- Integração total do produto ao sistema de produção.

Estes fatores auxiliam na utilização de células robotizadas e de veículos teleguiados (BARBOSA, 2012).

O processo produtivo de aeronaves não é composto apenas de montagens estruturais, e sim de outra etapa complementar que é a montagem e testes finais. Nessa etapa, o número de atividades repetitivas é relativamente baixo quando comparada a etapa de montagem estrutural, possuindo diversas atividades artesanais em praticamente toda a sua extensão. Os principais indicadores do processo de montagem e testes finais são (ZENUN; ALVES, 2005) :

- Redução de ciclo
- Eliminação de não conformidades
- Redução de *Work in process* - WIP

Segundo Rodrigues (2011) os testes de produção representam cerca de 30% do ciclo de produção da montagem final; assim o objetivo principal é assegurar a qualidade dos processos de montagem, por meio da verificação da integração dos sistemas da aeronave, a fim de garantir que a mesma está operando normalmente. Outro fator inerente a este processo é que ele é realizado nas etapas finais de fabricação, quando os custos de WIP já estão elevados e a identificação de problemas (*Troubleshooting*) é complexa. Isso tudo justifica o elevado grau de automação encontrado atualmente na aviação mundial.

Em sua maioria, o processo de automação de testes na montagem final de aeronaves se dá por meio de um *Automatic Test Equipment* – ATE; que se trata de um equipamento, que possui interface com a aeronave e executa de forma automática os testes e as validações necessárias no processo produtivo. Na Figura 24 observa-se um exemplo de um ATE.

Figura 24 - ATE testador de cabos



Fonte: (NAVAIR, 2014)

Segundo Costa (2004) a atividade de teste vem ao encontro da crescente demanda por uma maior qualidade do sistema. A automação traz a possibilidade de tornar o teste mais rápido e efetivo em encontrar erros, para isso diversos requisitos de automação precisam ser considerados, destacando-se cinco funcionalidades:

- Planejamento dos testes;
- Construção dos artefatos;
- Execução;
- Análise de falhas;
- Medições e gerência de configuração dos artefatos de teste.

2.3. Validação e Verificação

A Validação e a Verificação compõem uma parte importante do processo de desenvolvimento do produto. Aqui neste capítulo são apresentados os principais conceitos, as melhores práticas e os padrões existentes na área.

2.3.1. Definições

No final da década de 1970, 50% do tempo e 50% do custo eram empregados para testar programas ou sistemas. Hoje, isso continua sendo válido, mesmo contando com linguagens avançadas e novos ambientes de desenvolvimento, mas os testes continuam tendo um papel fundamental para garantir a qualidade do produto. Um bom processo de Validação e Verificação é atingido por meio de testes (MYERS, 2010).

Segundo Pressman (2007) verificar é confirmar com provas objetivas que requisitos especificados foram cumpridos e validar é confirmar com provas objetivas que requisitos particulares para um determinado uso foram cumpridos. Este estudo se inicia por definir o que é validar, verificar; e testar; e como a estratégia e o planejamento desses ao longo do desenvolvimento do sistema são importantes para a garantia da qualidade.

Observa-se na literatura que o uso contínuo dos testes ao longo do processo de desenvolvimento de sistemas antecipa a detecção de defeitos (MYERS, 2010).

O processo de validação e verificação adotado neste trabalho, segue a abordagem de Pressman (2007), onde a validação é a confirmação de que se está realmente produzindo o produto certo; e a verificação é a confirmação de que se está produzindo o produto corretamente. Para entender melhor esta sua afirmação, observa-se claramente que o processo de validação é utilizado ainda na fase de levantamento de requisitos, para certificar que o sistema à ser construído será capaz de atender os requisitos de mercado.

Já a verificação, ocorre praticamente em todas as fases do desenvolvimento, no sentido de garantir que os produtos de uma dada fase implementem em sua totalidade as entradas e saídas especificadas; ou seja: o produto foi construído corretamente.

Outra definição importante no processo de validação e verificação faz referencia aos tipos de testes executados em cada fase de desenvolvimento, que segundo Pressman (2007) podem ser divididos de forma macro em dois grandes grupos :

- Testes do tipo caixa preta (*Black Box*)
- Testes do tipo caixa branca (*White Box*)

Os testes do tipo caixa preta, são os principais testes realizados para verificar os requisitos funcionais do software. Os testes tipo caixa-preta permitem ao engenheiro de teste, derivar um conjunto de condições de entradas e exercitar todos os requisitos funcionais de um programa (PRESSMAN, 2007).

Basicamente, os testes de caixa preta identificam falhas nos seguintes itens do sistema:

- Funções incorretas ou inexistentes;
- Erros de interface;
- Erros na estrutura de dados ou no acesso aos dados externos;
- Erros de comportamento ou desempenho;
- Erros de inicialização e fechamento.

Diferentemente nos testes de caixa branca (*White Box*), a informação utilizada para sua criação geralmente provém das especificações e dos requisitos. Elas são selecionadas como entradas válidas e não-válidas, para verificar o correto funcionamento das saídas (PRESSMAN, 2007).

Exemplos de testes funcionais são: o particionamento de equivalência; a análise de valor limite ou condição-limite; o teste exaustivo, o teste de comparação; o teste orientado por sintaxe; o teste baseado em tabela de decisão; e, o grafo de causa-efeito (MYERS, 2010).

Os testes eletroeletrônicos na produção de aeronaves, adotados nesta pesquisa, seguem a abordagem tipo caixa preta.

Os testes do tipo caixa branca ou testes estruturais baseiam-se na estrutura interna do sistema. No caso de software, as ferramentas de diagnóstico analisam sintaticamente o código-fonte, procurando pontos fracos e erros estruturais e, normalmente, fornecem uma lista que permite tomar uma ação corretiva subsequente. Em geral, esse teste é realizado por desenvolvedores, e não por testadores do sistema e podem ser aplicados desde o início do processo de desenvolvimento (RUP, 2012).

Por meio das técnicas de teste do tipo caixa branca, o engenheiro de software pode criar testes que garantirão que todos os caminhos do código em um determinado módulo do software possa ser exercitado pelo menos uma vez, ou então que todas as decisões de um

determinado módulo sejam exercitados pelo menos uma vez, em suas condições verdadeiras e falsas, podendo assim exercitar a estrutura interna do código (PRESSMAN, 2007).

Exemplos de testes estruturais são o teste de caminho básico ou abrangência de instrução; a abrangência de ramificação / condição e a abrangência de caminho; o teste de caminho em grafos com *loop* e o teste de estrutura de controle, tais como os testes de condição e de fluxo de dados e de laços.

2.3.2. Melhores Práticas

Muitas vezes espera-se ou imagina-se uma campanha de teste como bem sucedida, quando os produtos passam ou são validados em todos os itens verificados, e se esquece da definição e dos objetivos principais de se realizar testes, que conforme Myers (2010) é um processo de executar um sistema com o objetivo de se encontrar erros.

A criação de testes deve seguir uma estratégia e um planejamento que guie todo o processo de teste ao longo do desenvolvimento, agrupando ideias que direcionem o projeto dos testes, com objetivos claros e específicos. É por meio de testes que se obtêm a Validação e a Verificação com provas objetivas (CEM; JAMES; BRET, 2001).

Myers (2010) demonstra que é necessário testar e depois codificar. Isto mostra claramente a importância da realização de testes em todas as etapas do desenvolvimento do produto, conceito este abordado neste trabalho; uma vez que agir na antecipação da detecção de problemas reduz o custo das não conformidades e até mesmo da atividade de teste.

Na Tabela 1 visualiza-se o custo da antecipação de defeitos, que quando encontrados nas etapas iniciais do desenvolvimento, como levantamento de requisitos e definição da arquitetura, é cerca de dez vezes menor do que quando encontrados nos testes finais do produto. Os custos podem ser até mesmo cem vezes maiores quando o erro for encontrado após a entrega do produto (CEM; JAMES; BRET, 2001).

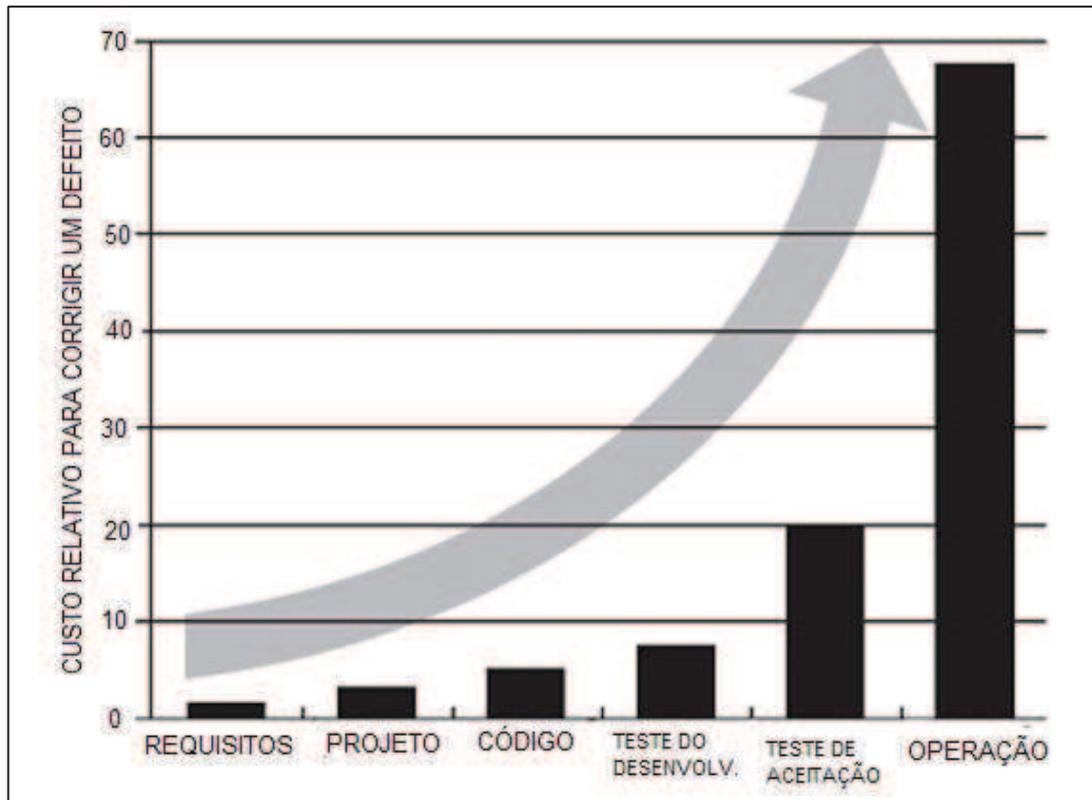
Tabela 1 - Custo da detecção de defeitos ao longo do desenvolvimento

Custo para Corrigir o problema		Tempo da detecção				
		Requisitos	Arquitetura	Construção	Teste de sistemas	Após entrega
Tempo introduzido	Requisitos	1x	3x	5-10x	10x	10-100x
	Arquitetura	-	1x	10x	15x	25-100x
	Construção	-	-	1x	10x	10-25x

Fonte: Adaptado de CEM, JAMES, BRET (2001).

Assim como a Tabela 1, a Figura 25 é uma figura clássica na literatura que demonstra a evolução do custo da detecção de um erro ao longo do desenvolvimento do produto de software, utilizando como base um processo tradicional de desenvolvimento de sistemas.

Figura 25- Custo de detecção de defeitos ao longo do desenvolvimento



Fonte: (BURNSTEIN, 2008, p. 110)

A estratégia de testes pode ser vista em um contexto espiral, conforme se observa na Figura 26. Os testes de unidade se iniciam no centro da espiral e concentram-se em cada unidade ou componente do software implantado no código fonte.

O processo de teste progride de forma espiral para os testes de integração, onde o foco principal é o projeto e a construção da arquitetura do sistema. Na espiral seguinte encontram-se os testes de validação onde os requisitos são validados de acordo com o produto desenvolvido.

E finalmente, a espiral conduz aos testes de sistema, onde todas as partes do sistema são testadas como um todo. De forma geral a cada espiral o escopo planejado dos testes é incrementado e concluído (PRESSMAN, 2007).

Figura 26 - Estratégia de teste de forma espiral



Fonte: Adaptado de (PRESSMAN, 2007)

Durante a etapa de planejamento dos testes é importante ter em mente a criação dos artefatos de teste, que basicamente são compostos por: Plano de Teste, Caso de Teste, Procedimento de Teste e o Relatório dos Resultados do Teste.

2.3.3. Padrões Existentes

Um dos primeiros artefatos padrões a ser utilizado é o Plano de Testes, que é um documento que apresenta uma breve introdução, especificando os tipos de testes que serão executados, os objetivos destes, a metodologia utilizada, onde está composto o mapeamento dos casos de testes, as técnicas e tipos de testes (PRESSMAN, 2007)

O Plano de Teste dá suporte para atingir aos objetivos, e geralmente é desenvolvido por um especialista de testes ou de qualidade (VIJAYKUMAR, 2009).

Por meio do Plano de Teste o gerente de testes deve articular os objetivos de teste para o projeto, definindo ferramentas e técnicas de testes, estimando o tempo a ser gasto e os recursos necessários para que o processo seja eficaz, dentro do prazo, dentro do orçamento e principalmente consistente com os objetivos do projeto (VIJAYKUMAR, 2009).

O recurso necessário geralmente é composto, de dois papéis de acordo com Plinio (2007):

- O analista de testes, tem como funções: identificar as ideias; definir os detalhes; determinar os resultados; documentar solicitações de mudança; avaliar a qualidade do produto; apresentar relatórios; defender os interesses; verificar as técnicas e definir os elementos de testabilidade;
- O testador, é quem executa testes, deve: registrar os resultados, analisar as falhas durante a execução e possibilitar a recuperação a partir da documentação dos incidentes.

O procedimento de teste é por sua vez outro artefato padrão existente no processo de teste de sistemas; esse documento se faz necessário para que o mesmo possa ser executado em um *System Under Test* - SUT. De forma geral um procedimento de teste é uma sequência detalhada de passos necessários para a execução de um ou mais casos de teste (BURNSTEIN, 2008)

Os procedimentos de teste devem ser completos, auto contidos, auto validados e devem proporcionar a sua execução por outro testador que não elaborou o procedimento detalhado (PRESSMAN, 2007).

O procedimento de teste especifica os passos para analisar o produto e validar um conjunto de características do mesmo; pode se considerado como um procedimento de como um conjunto de casos devem ser executados em um SUT (BURNSTEIN, 2008).

Para Vijaykumar (2009) o artefato padrão Caso de Teste, pode ser considerado como a seleção de um conjunto de entradas, do domínio de entrada de um sistema P, que encontre o maior número possível de faltas ou defeitos.

Os casos de testes são métodos que visam identificar todos os cenários possíveis de testes. Para Plinio (2007) existem duas possibilidades de identificar os casos de testes:

- 1) A partir da decomposição de requisitos e estrutura interna;
- 2) A partir do método de análise de documentos.

Geralmente a geração de Casos de Teste se inicia nas fases de especificação e início do projeto; ou seja: nas fases preliminares do ciclo de desenvolvimento. Portanto devem ficar prontos para serem utilizados bem antes da construção do produto; com isso, outras grandes vantagens como as inconsistências e as ambiguidades em especificação de requisitos e as

documentações do projeto do software ficam mais completas e robustas (VIJAYKUMAR, 2009).

Para Burnstein (2008) os casos de teste na prática, são compostos das seguintes informações:

- Um conjunto de entradas recebem dados de uma fonte externa ao sistema em teste, normalmente estas fontes são um hardware, software ou uma entrada do usuário;
- Condições de execução necessárias para a execução do teste, alguns exemplos são: um estado do banco de dados ou uma configuração de um dispositivo de hardware.
- Saídas esperadas: o resultado do teste aplicado ao código em teste.

Por fim os resultados de teste são artefatos padrões que compreendem no registro das operações efetuadas durante o procedimento, e se utilizar de regras estabelecidas nos casos de teste, geralmente chamados de resultados esperados (VIJAYKUMAR, 2009).

Por meio dos resultados dos testes é possível comprovar com provas objetivas que um determinado sistema, ou parte deste sistema, atende aos requisitos especificados (BURNSTEIN, 2008).

3.METODOLOGIA

Este capítulo descreve as fases desta pesquisa, como objetivo principal pretende-se descrever passo a passo o trabalho realizado, a fim de que outro pesquisador possa seguir o mesmo método e atingir os mesmos resultados.

A pesquisa foi dividida em cinco partes:

- Coleta de Dados;
- Identificação do Processo Existente;
- Desenvolvimento do novo processo;
- Validação do novo processo proposto;
- Validação das observações com especialistas (Delphi).

3.1.Coleta dos Dados

Na coleta de dados foi possível capturar informações sobre o processo atual de desenvolvimento e validação dos testes eletroeletrônicos na fabricação de aeronaves regionais de médio porte.

Esta etapa ocorreu durante um *workshop* documental realizado pelo fabricante em março de 2013 na cidade de São José dos Campos - São Paulo.

Nesta atividade em grupo, estavam presentes diversos especialistas das áreas envolvidas na atividade de desenvolvimento e validação dos testes de produção, como: Engenharia de Desenvolvimento do Produto; Engenharia de Manufatura, Engenharia de Automação Industrial e Engenharia de Ensaios.

Durante o *workshop*, por meio da experiência dos especialistas de diferentes áreas da empresa, e também do registro de dados de projetos anteriores, foram obtidas diversas informações que demonstravam oportunidades de melhoria sobre o processo então vigente. Estes fatores foram apresentados também, como os responsáveis pela baixa maturidade dos procedimentos de teste para aplicação nos protótipos.

Dentre os fatores mais representativos, destacaram-se:

- Retrabalho do procedimento de teste: o processo atual de validação dos testes de produção é realizado somente no protótipo pronto;
- Retrabalho de hardware da estação de testes: só é possível identificar uma má interpretação das especificações de um determinado sinal elétrico, durante os testes nos protótipos;
- Retrabalho de software: erros ocasionados devido à má interpretação das especificações técnicas identificadas tardiamente somente no protótipo;
- Solução de problemas durante o teste: a incerteza durante uma pesquisa de pane nos protótipos é grande, pois durante a validação dos testes de produção podem ocorrer tanto erros de procedimento de teste como falhas do produto;
- Dificuldade na detecção de falhas: a impossibilidade de exercitar todos os modos de falha do sistema sobre teste, antes do protótipo pronto, ocasiona problemas e comportamentos inesperados, identificados somente nos testes reais.

Outro fator levantado pelo grupo presente foi a grande concorrência no protótipo, pois durante as atividades de teste, a aeronave protótipo é objeto de diversas outras atividades, como montagens mecânicas e montagens elétricas, que por sua vez também demandam horas de trabalho. Portanto o processo atual, devido aos fatores descritos anteriormente, apresenta oportunidades de melhorias e de redução do Hh (Homem-hora) utilizado para validação dos testes de produção nos protótipos.

Em posse dos dados coletados durante o *workshop*, foi consenso entre os participantes que a principal oportunidade de melhoria existente no processo atual de desenvolvimento e validação dos testes de produção é a falta de maturidade dos procedimentos de teste no momento da execução nos protótipos.

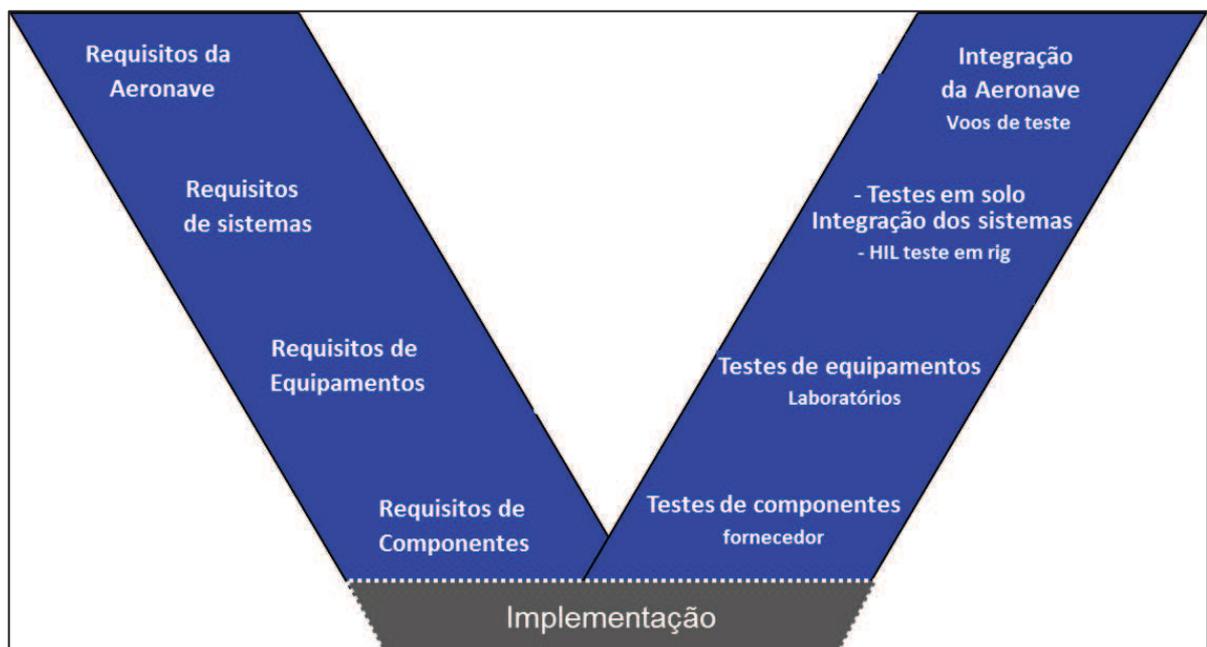
3.2. Identificação do Processo Existente

Em vista do cenário capturado no *workshop*, se observou que o processo atual de desenvolvimento e validação dos procedimentos de teste impossibilita a validação e verificação antecipada, pois são desenvolvidos por meio de documentações estáticas que dependem da interpretação pessoal, ou seja, existe um julgamento sobre uma documentação formal, e este processo pode ocasionar erros de interpretação.

Outro fator observado foi que o fato de o desenvolvimento dos testes ser realizado por meio de especificações e documentações estáticas, o conhecimento do desenvolvedor no sistema sobre teste pode determinar um maior grau de maturidade dos testes para aplicação nos protótipos.

As atividades de validação dos testes de produção são realizadas somente nas fases finais, de protótipo, deixando de lado as fases preliminares de desenvolvimento do produto como o anteprojeto, *Join-Definition-Phase - JDP* e a *Detailed-Definition-Phase - DDP*. Tal característica nos remete à Figura 27.

Figura 27– Processo tradicional de desenvolvimento em V



Fonte: Do Autor

O processo de desenvolvimento ilustrado na Figura 27 remete ao ciclo tradicional de desenvolvimento do produto em V, citado na literatura e observado na maioria das empresas

tradicionais de desenvolvimento. Esse processo possui diversas oportunidades de melhorias, pois concentra os testes na segunda etapa do V, onde protótipos e equipamentos já foram desenvolvidos e os custos de correção de problemas são elevados.

O processo apresentado pela Figura 27 foi identificado nas diversas ocorrências reportadas sobre a execução dos testes nos protótipos em projetos passados, quando o custo de correção de problemas se torna mais oneroso. Este processo de desenvolvimento se assemelha ao modelo Cascata descrito anteriormente.

No modelo Cascata, as atividades de desenvolvimento ocorrem de forma sequencial impossibilitando antecipar características finais do desenvolvimento, o que foi identificado no processo existente na empresa.

3.3. Desenvolvimento de um novo processo de desenvolvimento

Ficou evidenciado a necessidade de uma metodologia que proporcionasse a capacidade de validação e verificação antecipada dos procedimentos de teste eletroeletrônicos, a fim de contribuir para o aumento da maturidade dos procedimentos de teste e reduzir o tempo de utilização dos protótipos.

Atualmente na empresa, as técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing*, vêm sendo utilizadas largamente no processo de desenvolvimento do produto, porém para a Engenharia de Manufatura estas técnicas são novas e ainda não foram incorporadas aos seus processos.

Neste sentido, foi estruturado um novo processo para desenvolvimento e validação dos procedimentos de teste de produção por meio de modelos de simulação.

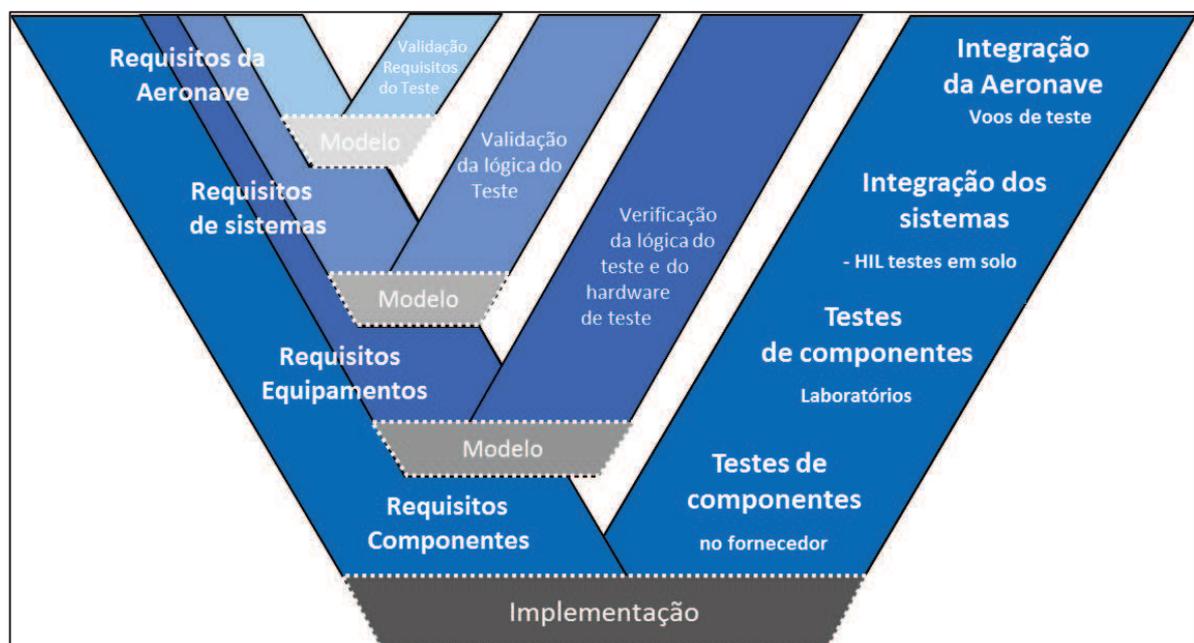
O novo processo teve como principal objetivo: validar os procedimentos de testes antes da sua aplicação na aeronave, no sentido de identificar a antecipação de diversos problemas que só seriam descobertos nos protótipos, e assim diminuir os custos com retrabalhos, melhorando a qualidade do produto.

Uma vez estabelecido um novo processo de trabalho, baseado em modelagem e simulação, surgiu um leque de oportunidades, destacando-se:

- A capacidade de antecipar características nos sistemas da aeronave que afetem os testes de produção, *Design for Testability*;
- A capacidade de otimizar as soluções de testes de produção pela antecipação de problemas operacionais nos testes;
- A capacidade de padronizar o processo de desenvolvimento e validação e verificação - V&V dos testes eletroeletrônicos da produção;
- A capacidade de reduzir o tempo de desenvolvimento do procedimento de teste por meio de simulação, em contrapartida as especificações estáticas, para aprendizado do sistema pela Engenharia de Teste.

Esta migração da técnica tradicional de desenvolvimento para as técnicas de MBD e MBT permite a validação e verificação contínua ao longo de todas as etapas do processo de desenvolvimento dos testes eletroeletrônicos da produção, conforme observa-se na Figura 28.

Figura 28 – Explosão do método tradicional de desenvolvimento em V .



Fonte: Do Autor

O novo processo desenvolvido, já remete à Figura 28, que apresenta o processo de verificação contínua, que permite o aumento da maturidade dos procedimentos de teste em desenvolvimento e a antecipação da detecção de defeitos.

No primeiro micro V, identificado na Figura 28, já é possível validar e verificar em ambiente virtual os requisitos de mais alto nível. Com a evolução do desenvolvimento, os modelos e a arquitetura do produto vão adquirindo maior nível de fidelidade, possibilitando assim, outras etapas de verificação.

Já nas etapas finais de desenvolvimento, o procedimento de teste pode ser executado em laboratórios o que permite a realização da verificação em ambientes bem próximos ao ambiente real.

3.4. Validação por Simulação

Após o desenvolvimento do novo processo, foram realizados dois testes como referencial para a avaliação da viabilidade técnica e a identificação de requisitos específicos para o novo processo. Outro fator avaliado pelos casos de uso foi o desempenho do novo processo, por meio da identificação e quantificação dos ganhos quantitativos e qualitativos.

Para validar o novo processo desenvolvido, utilizou-se de simulação computacional, onde um modelo computacional, representa o comportamento dinâmico de um sistema real, neste caso o sistema de uma aeronave.

Utilizou-se um modelo computacional maduro e já validado, que estivesse preparado para ser utilizado por outras áreas da empresa. Nessa etapa, o grande desafio foi garantir que o modelo computacional utilizado já estivesse livre de erros, ou seja, já tivesse sido validado e verificado, para que assim fosse possível validar e verificar os testes de produção.

Os modelos computacionais selecionados foram os modelos do sistema elétrico e os modelos de combustível de uma aeronave regional de médio porte.

Em seguida identificou-se as ferramentas necessárias para realizar a simulação computacional. Nos dois casos de uso foram identificados e utilizados os seguintes artefatos:

- Modelo Computacional ou Modelo de Simulação. Foram utilizados dois modelos matemáticos, que representam o comportamento dinâmico dos sistemas elétrico e de combustível, desenvolvidos na ferramenta *Simulink*.
- Executor dos Modelos ou *Player* de Modelos. Esta ferramenta é responsável por executar os modelos computacionais.

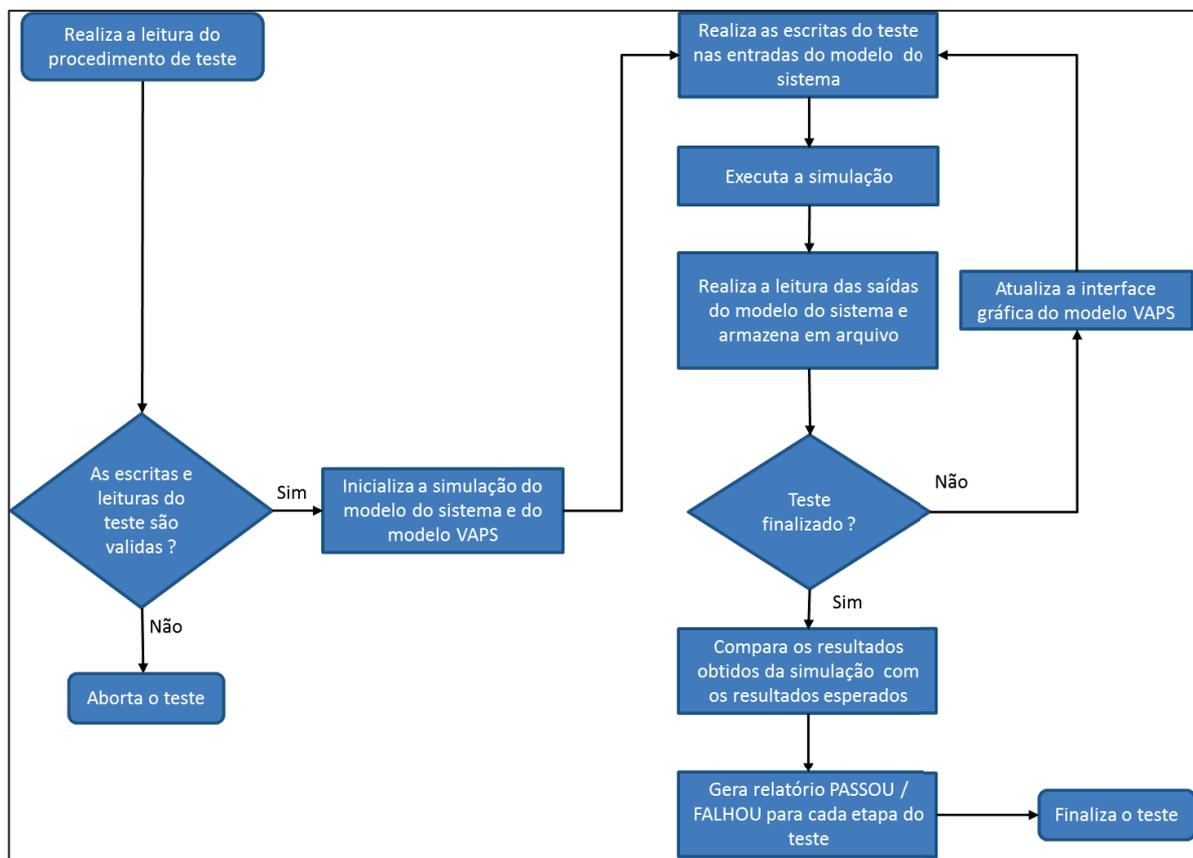
- *Framework* de Teste OPENVIB - Ambiente para execução de *scripts* de teste nos modelos computacionais.
- VAPS – Ambiente de prototipagem rápida de telas gráficas, *Presagis*.

Em posse dos artefatos para execução dos testes, um impasse surgiu; pois estas ferramentas não estavam preparadas para executarem os testes desenvolvidos pela Engenharia de Manufatura.

A fim de solucionar tal impasse, foi desenvolvida uma biblioteca de software capaz de efetuar a leitura do procedimento de teste da Engenharia de Manufatura e interagir com o modelo de simulação. Essa biblioteca, nomeada como *TestSequence*, foi desenvolvida na linguagem de programação Python. Após o seu desenvolvimento, realizou-se a incorporação desta ao *framework* OPENVIB, possibilitando assim a execução do teste de produção.

De posse da biblioteca desenvolvida, dos procedimentos de teste e dos modelos de simulação, foram executados diversos testes em diferentes cenários, de acordo com o fluxo ilustrado na Figura 29.

Figura 29- Ciclo de execução do teste no modelo de simulação



Fonte: Do autor

Na Figura 29, observa-se o fluxo de execução do teste no modelo de simulação; da esquerda para direita, a primeira atividade do ciclo é realizar a leitura do procedimento de teste, em formato Excel[®], que possui todos os dados utilizados no teste. Nesta etapa, são armazenadas em memória as leituras, escritas, lógicas e resultados esperados do teste, utilizando-se para isso a biblioteca *TestSequence*.

Seguindo adiante no fluxo da Figura 29, verifica-se a validade das escritas e leituras a serem realizadas durante a execução do teste. Tal atividade se faz necessário para evitar que erros ocorram nas atividades de escrita e leitura das entradas e saídas do modelo, durante a execução da simulação.

Na etapa seguinte do fluxo da Figura 29, inicializa-se a simulação com as condições iniciais do teste; nesta atividade, é iniciado o modelo dinâmico do sistema sobre teste e o modelo VAPS. O modelo dinâmico do comportamento do sistema apresenta-se no formato de um arquivo executável (.exe) ou uma biblioteca dinâmica (.dll), ou seja, durante todas as etapas da simulação será possível interagir com o modelo somente por meio de suas interfaces externas; entradas e saídas. Tal fato não representa problema algum para os testes de produção, pois estes testes caracterizam-se por serem testes do tipo caixa-preta, no qual não se pretende interagir com o sistema por meio de suas lógicas e interfaces internas.

Já o modelo VAPS também utilizado nesta etapa, representa o sinóptico do sistema da Aeronave; este modelo foi utilizado por meio de um arquivo executável (.exe). Nos testes realizados, tal modelo serviu como uma interface gráfica para acompanhamento da simulação.

Após a inicialização dos modelos, a próxima etapa do fluxo é a execução da simulação; nessa etapa, o executor de modelos e a biblioteca *TestSequence* tiveram um papel fundamental, como por exemplo:

- Integrar e sincronizar os modelos utilizados na simulação por meio de memória compartilhada;
- Realizar as operações de escrita e leitura nos modelos de simulação;
- Efetuar a atualização do modelo VAPS.

Um visão mais detalhada da etapa de execução da simulação pode ser observada na Figura 30.

Figura 30 - Interação com os modelos durante a execução da simulação



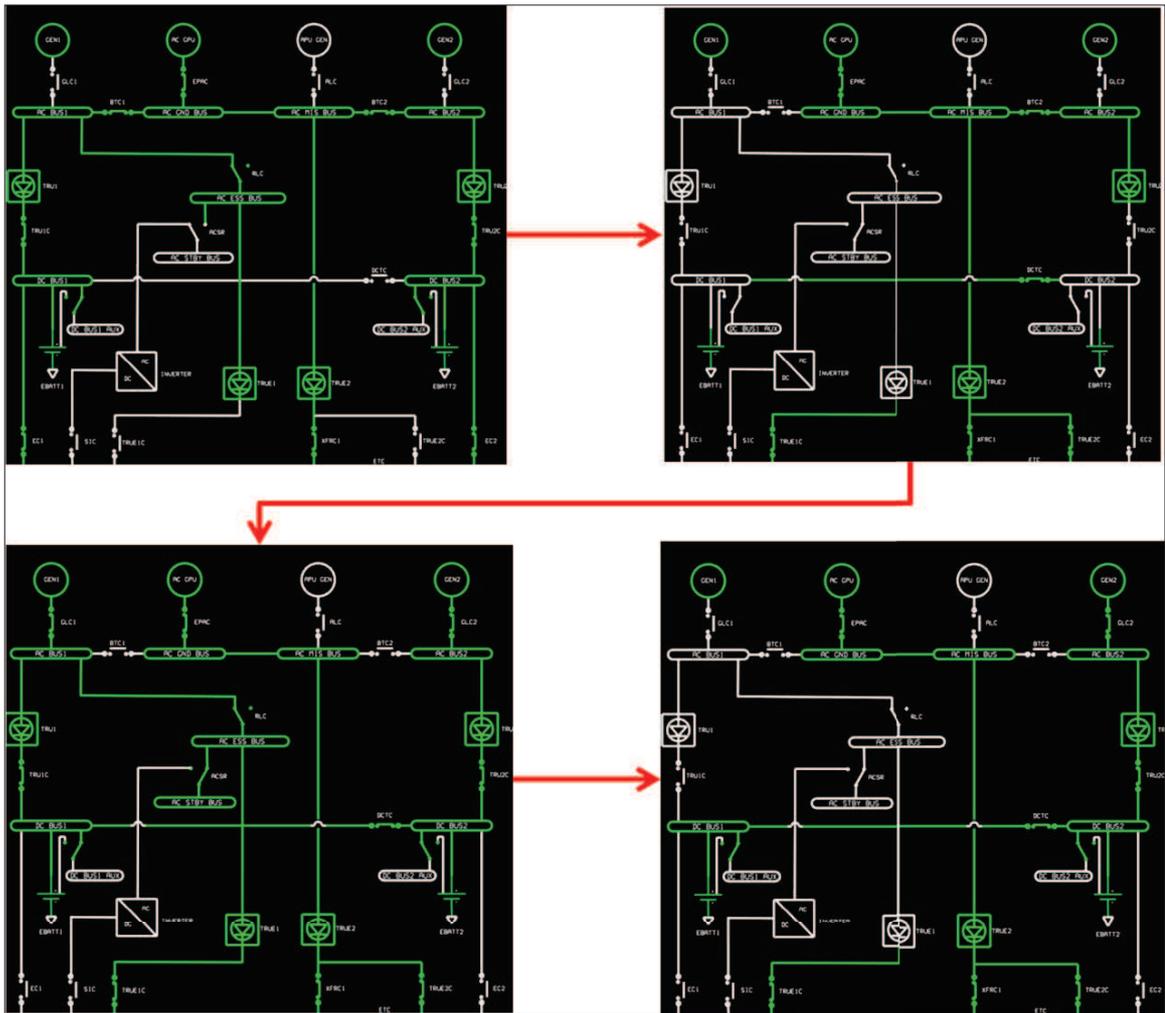
Fonte: Do autor

Na Figura 30 verifica-se um fluxo contínuo de interação com o modelo de simulação, tal ciclo é repetido até que o procedimento de teste seja finalizado. Primeiramente os valores de escrita especificados no procedimento de teste foram aplicados nas entradas do modelo de simulação; em seguida efetua-se um passo de simulação no modelo, a fim de colocá-lo em condições previamente estabelecidas; após isso efetua-se a leitura e gravação das saídas do modelo para posterior comparação dos resultados obtidos contra os resultados previamente estabelecidos no procedimento de teste .

Ao final de cada ciclo de execução da simulação, é realizada a atualização da interface gráfica do VAPS, tal atualização possibilita o acompanhamento visual do teste. A Figura 31 ilustra um exemplo de evolução da atualização do sinóptico VAPS do sistema elétrico durante a simulação.

Depois de finalizado a simulação, a biblioteca *TesteSequence* gera um relatório comparando os resultados obtidos na simulação computacional com os resultados especificados no procedimento de teste. Neste relatório uma indicação de PASSOU ou FALHOU é inserida para cada avaliação especificada no teste.

Figura 31 – Exemplo de evolução do sinóptico VAPS do sistema elétrico durante a simulação



Fonte: Do Autor

Observa-se na Figura 31 quatro representações em sequência do sinóptico VAPS do sistema elétrico; tais representações foram obtidas durante a execução do teste. Verifica-se nestes quadros o chaveamento das barras de alimentação do sistema, de acordo com as lógicas do teste. Tem-se, então, que essa interface gráfica auxiliou o acompanhamento visual do teste.

Por meio dos testes realizados, utilizando-se os modelos de simulação dos sistemas Elétrico e de Combustível, foi possível validar o novo processo desenvolvido. Foi possível ainda avaliar e quantificar a utilização das técnicas de modelagem e simulação no desenvolvimento dos testes eletroeletrônicos da produção.

3.5. Validação por especialistas

O novo processo foi avaliado e validado também por meio de uma pesquisa qualitativa utilizando o método *Delphi*, a fim de identificar os fatores que influenciam na utilização de MBD e MBT no processo de desenvolvimento e validação dos testes eletroeletrônicos da produção.

O método Delphi foi desenvolvido inicialmente na *Rand Corporation*, EUA, na década de 1950, seu principal objetivo era de obter consenso de especialistas sobre previsões tecnológicas (WRIGHT; GIOVINAZZO, 2000).

Segundo o estudo de Grisi e Britto (2003), o *Delphi* é um processo estruturado de comunicação coletiva, que permite a um grupo de indivíduos trabalhar com um problema complexo.

O primeiro passo para a realização da pesquisa foi identificar as áreas que seriam envolvidas; então foram selecionadas as áreas que participaram do *workshop* e áreas envolvidas com o processo de elaboração dos testes de produção. A pluralidade de áreas foi uma estratégia adotada para compensar possíveis respostas tendenciosas. Foram selecionados 21 especialistas de quatro áreas de desenvolvimento. A Tabela 2 mostra a distribuição por área dos especialistas que responderam as perguntas do Delphi.

Tabela 2 - Proporção das áreas afetadas pela pesquisa Delphi

Área	Percentual
Eng. Manufatura	24%
Eng. Testes e Automação	19%
Eng. Desenvolvimento Produto	43%
Eng. Ensaios de Sistemas	14%

A maior concentração de especialistas está na Engenharia de Desenvolvimento do Produto e na Engenharia de Manufatura por serem as principais áreas envolvidas no processo de desenvolvimento e validação dos testes.

Outra característica identificada nos especialistas envolvidos na pesquisa pode ser observada na Tabela 3, que apresenta uma classificação dos especialistas por tempo de experiência na área.

Tabela 3 - Distribuição dos especialistas por tempo de experiência

Tempo de experiência	Percentual
0 - 5 anos	24%
6 - 10 anos	38%
mais de 10 anos	38%

Uma vez selecionadas as áreas e os especialistas, elaborou-se o questionário do Delphi. As questões foram elaboradas com o objetivo de validar os principais tópicos abordados pelo novo processo de desenvolvimento de teste da produção e também da utilização das técnicas de *Model Based Design e Model Based Testing*.

As questões enviadas aos especialistas em testes de sistemas e em modelagem e simulação se encontram no Apêndice I desta dissertação. As questões elaboradas são perguntas fechadas que possuem cinco alternativas.

Após realizar a elaboração das questões do questionário foi efetuada uma validação das perguntas com três especialistas. Esta validação teve o objetivo de avaliar o entendimento e a assertividade das questões antes de serem enviadas aos demais. Feito a validação do questionário, o mesmo foi enviado aos especialistas durante o primeiro trimestre de 2014, tendo como prazo inicial 30 dias para obtenção das respostas. Este prazo acabou sendo estendido por mais 30 dias devido à indisponibilidade dos especialistas efetuarem a resposta da pesquisa.

Foi identificado e classificado o perfil dos especialistas participantes desta pesquisa de acordo com a sua área de atuação e o seu tempo de experiência, tais informações serão importantes para uma melhor análise das respostas.

Como ferramenta de análise das respostas obtidas na pesquisa do Delphi, foi utilizado o software Microsoft Excel[®], que possibilitou o agrupamento dos dados obtidos em tabelas, permitindo assim avaliar os dados capturados de diferentes pontos de vistas, como por exemplo, por área de atuação e tempo de experiência.

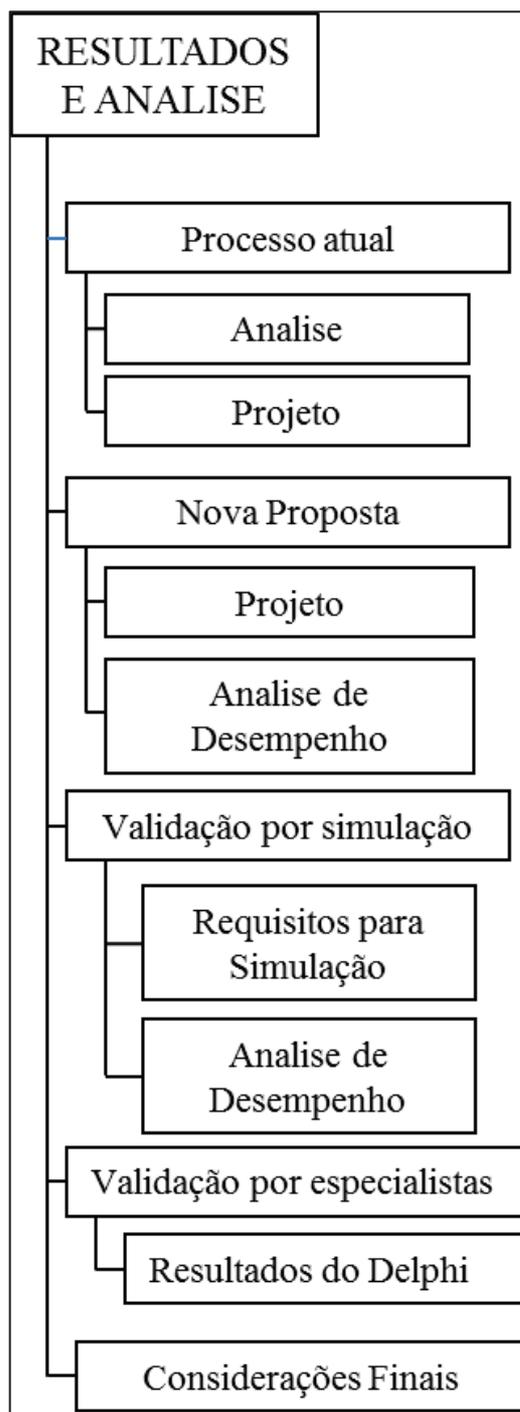
Ao final da pesquisa foi obtida:

- A validação do novo processo desenvolvido;
- Validação do uso das técnicas de modelagem e simulação no desenvolvimento;
- Respostas as perguntas de pesquisa deste trabalho.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos na pesquisa, estes resultados refletem as respostas obtidas dos procedimentos metodológicos utilizados. A estrutura do tópico resultados pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 - Estrutura do capítulo Resultados



Fonte: Do Autor

A Figura 32 ilustra a estrutura deste capítulo de Resultados de forma compacta, dividido em quatro grandes partes. A primeira parte, Processo Atual, apresenta os resultados obtidos no *workshop* para a construção e identificação do processo existente na empresa. Na segunda parte, Nova Proposta, apresenta os resultados obtidos na elaboração do novo processo proposto. A parte seguinte demonstra os resultados obtidos da validação do novo processo por meio da simulação. E por fim foram descritos os resultados obtidos da pesquisa qualitativa realizada pelo método Delphi.

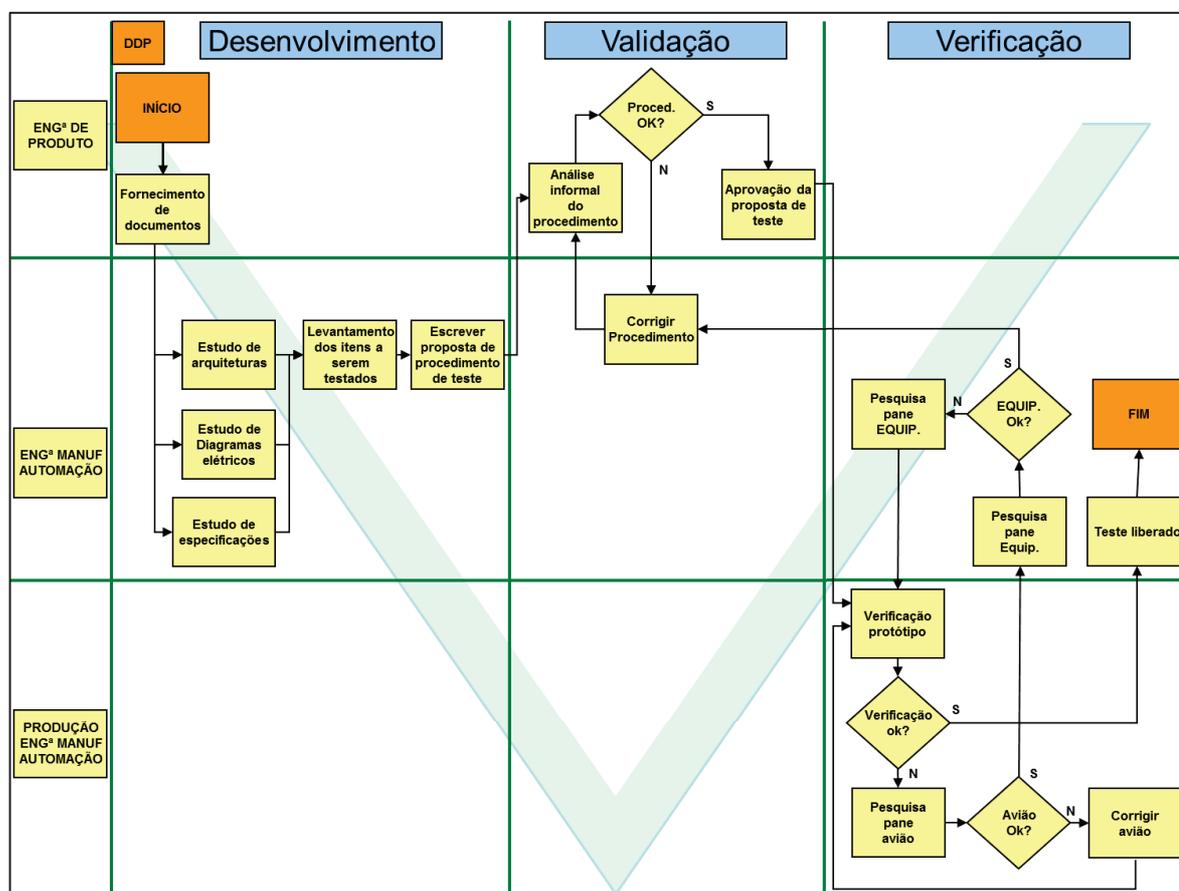
4.1.Caracterização do processo atual de desenvolvimento dos Testes

As informações obtidas pelo workshop contribuíram para a construção e identificação do processo existente na empresa para o desenvolvimento e validação dos testes de produção. A Figura 33 representa o processo atual de desenvolvimento e validação dos testes de produção existente na empresa.

Para análise do processo atual representado pela Figura 33, deve-se considerar que o fluxo da informação ocorre sempre da esquerda para a direita. Este fluxo, indica que o desenvolvimento e validação dos testes eletroeletrônicos da produção inicia-se na fase de *Design Detailed Phase - DDP*, ou seja, na fase de detalhamento do produto, no qual as características técnicas da aeronave já estão finalizadas e concretizadas; e portanto, a correção de defeitos já apresenta um custo relativamente alto.

Seguindo adiante neste fluxo, observa-se que após desenvolvido todo o procedimento de teste, ocorre a validação conjunta entre a Engenharia de Manufatura e a Engenharia de Desenvolvimento do Produto. Tal validação é realizada por um processo documental, no qual realiza-se julgamentos de Engenharia, confrontando os requisitos textuais contidos nas especificações técnicas com o procedimento de teste desenvolvido. Uma desvantagem deste método é a dependência existente do conhecimento dos profissionais envolvidos nesta etapa.

Figura 33 -- Mapa mental do processo atual de desenvolvimento dos testes



Fonte: Do Autor

Ao final do fluxo representado na Figura 33 está concentrada a etapa de verificação, realizada nas aeronaves protótipos, no qual os procedimentos de teste são exercitados pela primeira vez, para detecção de possíveis erros inerentes ao procedimento, ao produto ou ao equipamento de teste, o que se torna dispendioso, devido as diversas variáveis envolvidas na solução dos erros encontrados nos protótipos, e que demanda um período de tempo relativamente alto para a solução do problema.

No mapeamento deste fluxo, o processo tradicional envolve em média 448Hh (Homem-hora) para o desenvolvimento de um procedimento de teste.

4.2.Nova Proposta para desenvolvimento e validação dos testes da produção

A fim de adicionar melhorias no processo atual de desenvolvimento dos testes, um novo processo de desenvolvimento, baseado em modelagem e simulação, foi desenvolvido e avaliado.

4.2.1.Projeto do novo processo

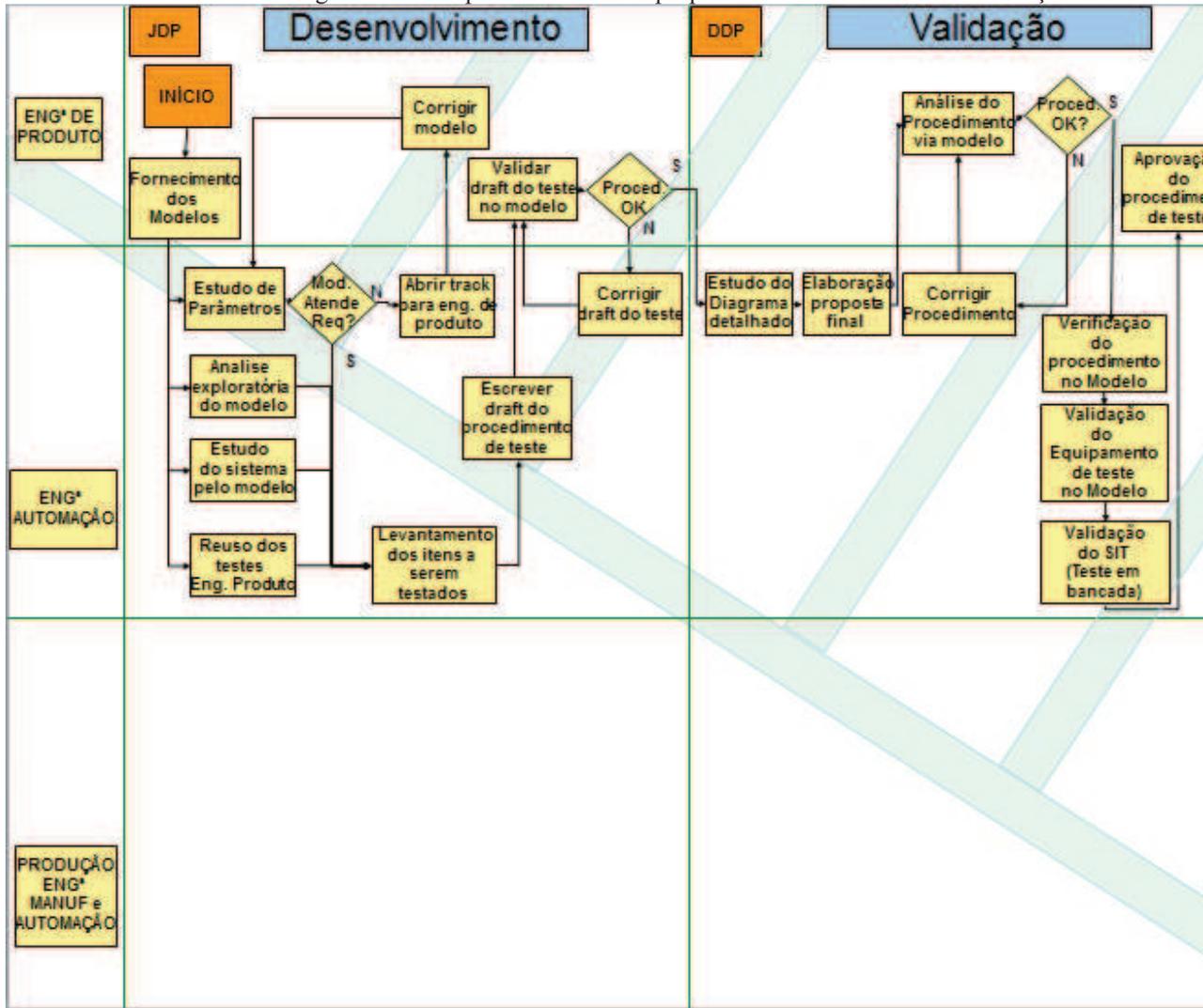
A nova proposta para desenvolvimento e validação dos testes eletroeletrônicos da produção está baseada na utilização das técnicas de MBD e MBT. A nova proposta está ilustrada na Figura 34; nesta representação o fluxo da informação ocorre sempre da esquerda para a direita.

Diferentemente do processo atual, o novo processo inicia as atividades de teste já nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto, denominada JDP – *Join Definition Phase* possibilitando assim o envolvimento da engenharia de teste desde o início do desenvolvimento. Tal fato, facilita a introdução de modificações no produto para facilitar ou agilizar os testes da produção. Um bom exemplo é a capacidade de realizar paralelamente ao desenvolvimento do produto testes simulados virtuais com cenários distintos a fim de avaliar a melhor proposta de teste e identificar a dificuldade de implementação de determinados requisitos de teste. Neste caso, estas propostas de melhoria ou correções no produto, apresentam um custo mais baixo devido ao fato de que o produto ainda está em desenvolvimento ou até mesmo em fase de elaboração de requisitos.

Neste novo processo de desenvolvimento dos testes se observa a validação e verificação continua ao longo do processo de desenvolvimento do produto; neste caso o procedimento de teste é desenvolvido paralelamente ao produto seguindo o mesmo nível de abstração da fase em questão. Desenvolver testes em paralelo com o projeto e desenvolvimento do sistema possibilitou o engajamento do engenheiro de manufatura ainda nas fases preliminares do desenvolvimento do sistema, o que facilitou o processo de verificação. Esta colaboração resultou numa verificação antecipada do produto o que reduziu custos e aumentou o tempo para correção de erros, sem afetar a entrega final do produto.

Outro fator identificado no novo processo proposto na Figura 34 é permitir já nas etapas iniciais da concepção do teste a utilização dos modelos computacionais, acarretando assim na antecipação do entendimento do sistema. Este fato diminui a curva de aprendizado do engenheiro de teste e por consequência reduz o tempo gasto nesta etapa.

Figura 34 - - Mapa mental da nova proposta de desenvolvimento e validação dos testes da



A nova proposta de desenvolvimento e validação dos testes da produção demonstrada na Figura 34, ilustra as etapas de validação e verificação dos testes antes de sua execução no protótipo real. Observa-se ao fundo da figura, na cor azul, os múltiplos V, no qual identifica-se tais validações antecipadas. Dessa forma, com a capacidade dos testes serem realizados ainda nas fases preliminares, é possível sugerir a tempo modificações no produto para que a automação dos testes eletroeletrônicos na produção ocorra de forma natural, reduzindo o número de equipamentos especiais de teste na linha de produção.

Tempo e custo geralmente são os limites da quantidade e variabilidade de características testadas no produto; a possibilidade de realização de testes em ambientes simulados, conforme verificado na Figura 34, possibilita a simulação de cenários de teste de forma rápida e até mesmo de forma paralela, explorando os domínios do problema em laboratórios ou desktops.

Com o envolvimento da Engenharia de Manufatura nas fases preliminares do projeto, foi possível identificar que os testes realizados pela Engenharia de Produto e a Engenharia de Ensaios continha semelhança aos testes de produção. Uma vez identificada esta característica, um processo formal de Reuso destes testes foi estabelecido na nova proposta desenvolvida, a fim de reduzir ainda mais o tempo de desenvolvimento dos testes.

O reuso de testes é a palavra chave da metodologia *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing*. A capacidade de executar os mesmos testes já realizados por meio de modelos nos hardwares reais, possibilita saber exatamente como os componentes físicos devem se comportar nos laboratórios e protótipos. Quando os testes encontram valores inesperados, o reuso dos testes possibilita de forma fácil e rápida interagir com a Engenharia de Produto e solucionar o problema. Tal característica permite validar previamente os equipamentos de teste utilizados na produção, conforme ilustrado ao centro do processo na Figura 34.

4.2.2. Desempenho do novo processo

A aplicação do MBD e MBT nos testes eletroeletrônicos da produção proporciona diversos ganhos de eficiência e eficácia.

Após a criação da nova proposta de desenvolvimento e validação dos testes, foi possível reduzir o tempo de desenvolvimento dos procedimentos para 336 Hh, o que representa um ganho de 25% de produtividade, quando comparado ao processo atual de

desenvolvimento dos testes que dispense atualmente 448 Hh; tal redução diminui o ciclo de desenvolvimento do produto.

Estes ganhos seriam provenientes de diversos fatores, destacando-se principalmente:

- A Antecipação da curva de aprendizado do Engenheiro de Testes de Manufatura em relação ao sistema testado;
- O processo de aprovação do procedimento de teste por meio de modelos passa a ser um processo formal, eliminando a subjetividade dos julgamentos de engenharia.

Diversas possibilidades de melhoria da qualidade também foram evidenciadas durante a aplicação do novo processo, conforme demonstra o Quadro 4.

Quadro 4 - Quadro comparativo dos possíveis ganhos entre o processo tradicional e o processo baseado em modelos

Item	Processo Tradicional	Processo Model Based Design and Testing	Ganho
Antecipar características nos sistemas que afetem os testes de produção	Processo Informal , realizado por meio de leitura de especificações e reuniões.	Capacidade de avaliar a arquitetura "Executável" por meio dos modelos de simulação. Exercitar os conceitos de DFT(<i>Design for Testability</i>)	Padronização do processo de desenvolvimento dos testes.
Otimizar as soluções dos testes de produção pela antecipação de problemas operacionais nos testes	Dificuldade de avaliar o que realmente precisa ser testado na produção, o que é integração e o que é teste de componente.	Modelo arquitetural permite avaliar de forma "formal" a arquitetura do sistema. Facilidade de gerar cenários de teste a fim de otimização.	Eliminação de desperdícios no teste de produção. Se realiza teste nos requisitos necessários
Padronizar o modo de verificação e validação dos testes de produção	Processo depende da experiência dos engenheiros envolvidos no desenvolvimento, gerando "conflitos" algumas vezes devido a subjetividade	Modelo computacional representa o comportamento real do sistema.	Processo formal de verificação por meio dos modelos de simulação, eliminação da subjetividade.
Avaliação da Robustez dos testes	Dificuldade de avaliar e testar todos os modos de falha do sistema sobre teste, alta dependência da experiência dos envolvidos na etapa de teste.	Facilidade de gerar diversos cenários de teste , induzir o sistema a condições de falha e avaliar a robustez do procedimento de teste.	Capacidade de realizar testes antes inviáveis no processo tradicional.

Fonte: Do Autor

4.3. Validação do novo processo por simulação

Uma vez proposto um novo processo de desenvolvimento dos testes de produção, este foi validado e avaliado por meio de modelagem e simulação. Para tal utilizou-se modelos de dois sistemas da aeronave, o sistema elétrico e o de combustível.

4.3.1. Requisitos para a simulação

A fim de possibilitar a validação do novo processo de desenvolvimento dos testes por meio de modelagem e simulação, foi desenvolvida neste trabalho uma biblioteca de software capaz de executar os procedimentos de teste da produção nos modelos computacionais. Este aplicativo, foi desenvolvido na linguagem de *scripts* Python.

Com a biblioteca, foi possível exercitar a nova proposta de desenvolvimento dos procedimentos de teste eletroeletrônicos da produção, rumo que induz as técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing*.

4.3.2. Requisitos da biblioteca de software desenvolvida

Os principais requisitos implementados pela biblioteca desenvolvida denominada *TesSequence* podem ser observados no Quadro 5.

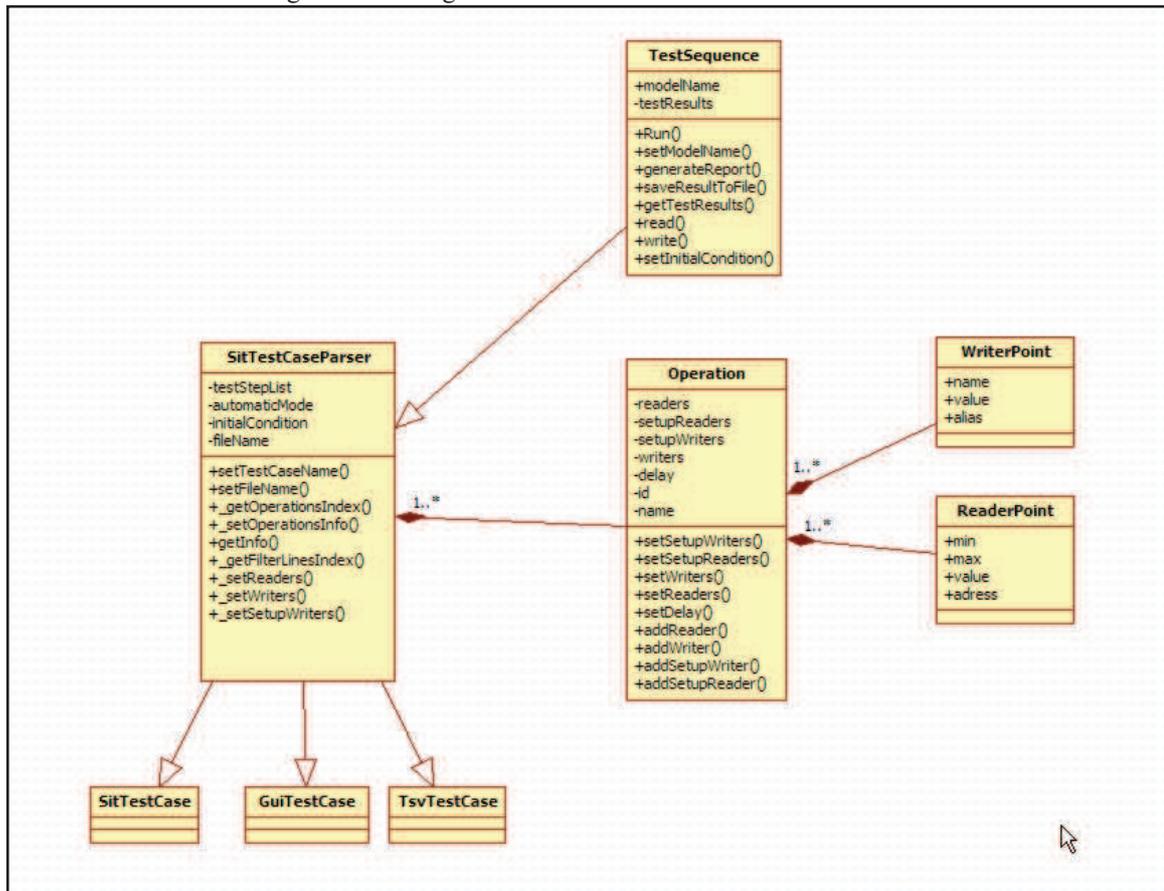
Quadro 5 - – Requisitos da biblioteca desenvolvida

Funcionalidade	Requisito	Rationale
Padronização do teste	A biblioteca devera ser capaz de efetuar a leitura do procedimento de teste em formato Excel.	Este é o formato já utilizado pelos testes da produção.
Entradas do Teste	A biblioteca devera ser capaz de armazenar os valores a serem inseridos no modelo de simulação e os resultados esperados especificados no procedimento de teste	Esta funcionalidade irá permitir que a biblioteca interfaceie com o modelo computacional em tempo de execução.
Processamento do Teste	A biblioteca devera ser capaz de escrever valores nas entradas do modelo computacional provenientes do procedimento de teste	Esta funcionalidade irá permitir colocar os modelos computacionais em condições pré determinadas.
Processamento do Teste	A biblioteca devera ser capaz de realizar a leitura da resposta do modelo computacional especificadas no procedimento do teste	Esta funcionalidade irá permitir a leitura dos parâmetros desejados do modelo computacional para avaliação futura.
Resultados dos testes	A biblioteca devera ser capaz de comparar os resultados obtidos do modelo computacional com os resultados esperados especificados no roteiro de teste	Esta funcionalidade irá permitir comparar o resultado da simulação computacional com as condições especificadas no procedimento de teste.
Documentação do Teste	A biblioteca devera gerar um relatório final do teste com resultado PASSOU E FALHOU de acordo com os resultados esperados	Esta funcionalidade irá permitir documentar os resultados do teste para rastreabilidade futura.

4.3.3. Arquitetura da biblioteca de software desenvolvida

O diagrama de classe da biblioteca desenvolvida segue na Figura 35.

Figura 35- – Diagrama de classe da biblioteca desenvolvida.



Fonte: Do Autor

A primeira classe observada na Figura 35, denominada *SitTestCaseParser*, é responsável pelo carregamento do procedimento teste, esta etapa é responsável pela leitura do arquivo Excel[®] que contém os parâmetros necessários para a execução do teste. Durante esta etapa de carga do procedimento, a classe *Operation* realiza a criação de todas as operações necessárias para a execução da simulação.

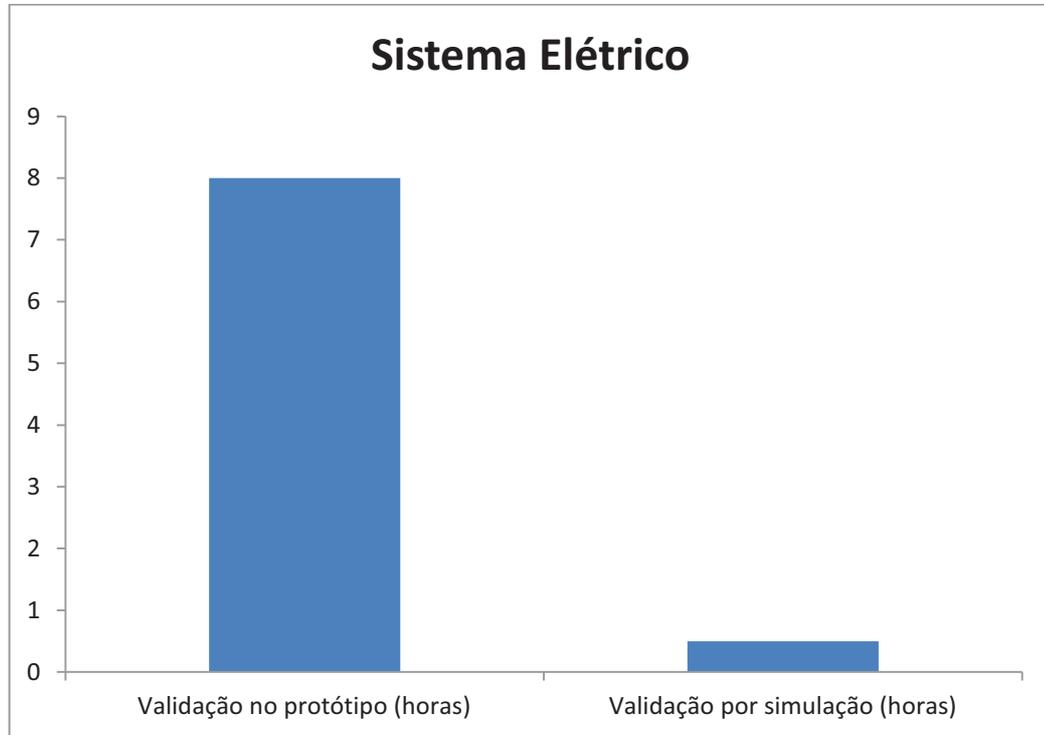
Por fim observa-se na Figura 35 a classe *TestSequence*, tal classe é responsável pela execução do teste. Nesta etapa realiza-se a interface direta com o modelo de simulação; por meio da escrita de parâmetros previamente estabelecidos no procedimento de teste e da leitura de parâmetros provenientes dos modelos de simulação. Ao final da simulação, esta classe é responsável por gerar um relatório com os resultados obtidos na execução dos procedimentos de teste nos modelos.

4.3.4. Análise de desempenho do novo processo

Com a realização dos testes nos sistemas Elétrico e Combustível foi possível validar a nova proposta de desenvolvimento, demonstrando a capacidade e aplicabilidade das técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing*.

As Figura 36 e Figura 37 demonstram os ganhos de eficiência na utilização de modelagem e simulação no processo de validação dos procedimentos de teste.

Figura 36 -- Comparativo do teste do Sistema Elétrico (protótipo vs. simulação)



Fonte: Do Autor

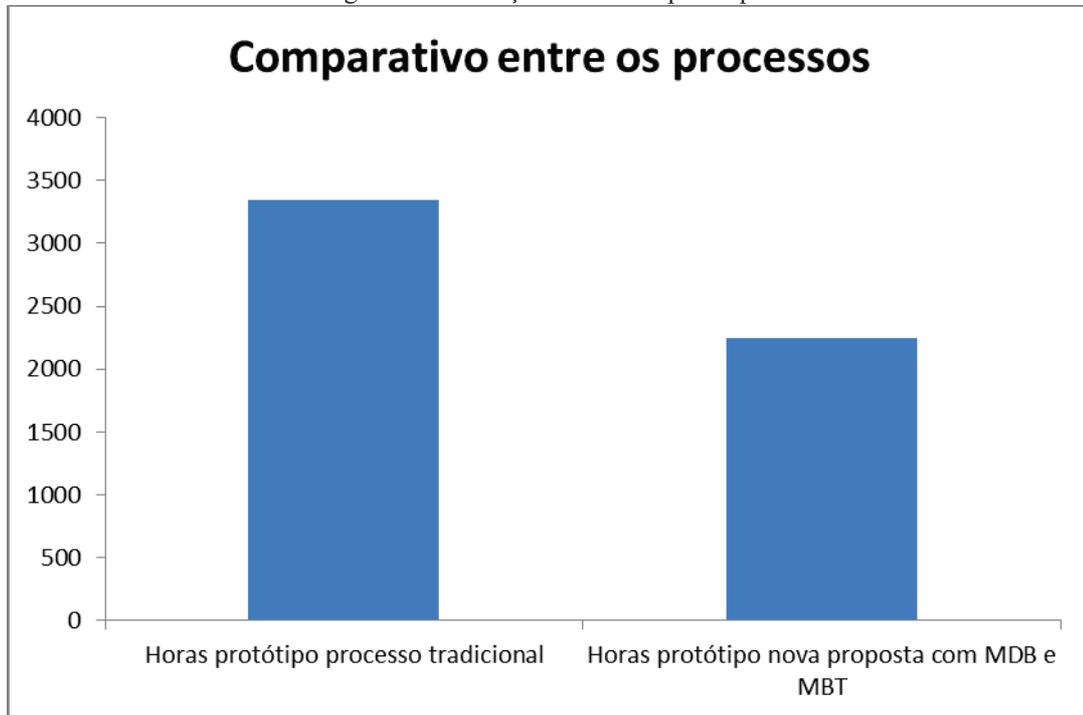
Figura 37 -- Comparativo do teste do Sistema de Combustível (protótipo vs. simulação)



Fonte: Do Autor

Com os ganhos demonstrados nas Figura 36 e Figura 37, ficou evidenciado um ganho expressivo de redução de tempo de utilização do protótipo conforme observado na Figura 38.

Figura 38 – Redução de Hh nos protótipos



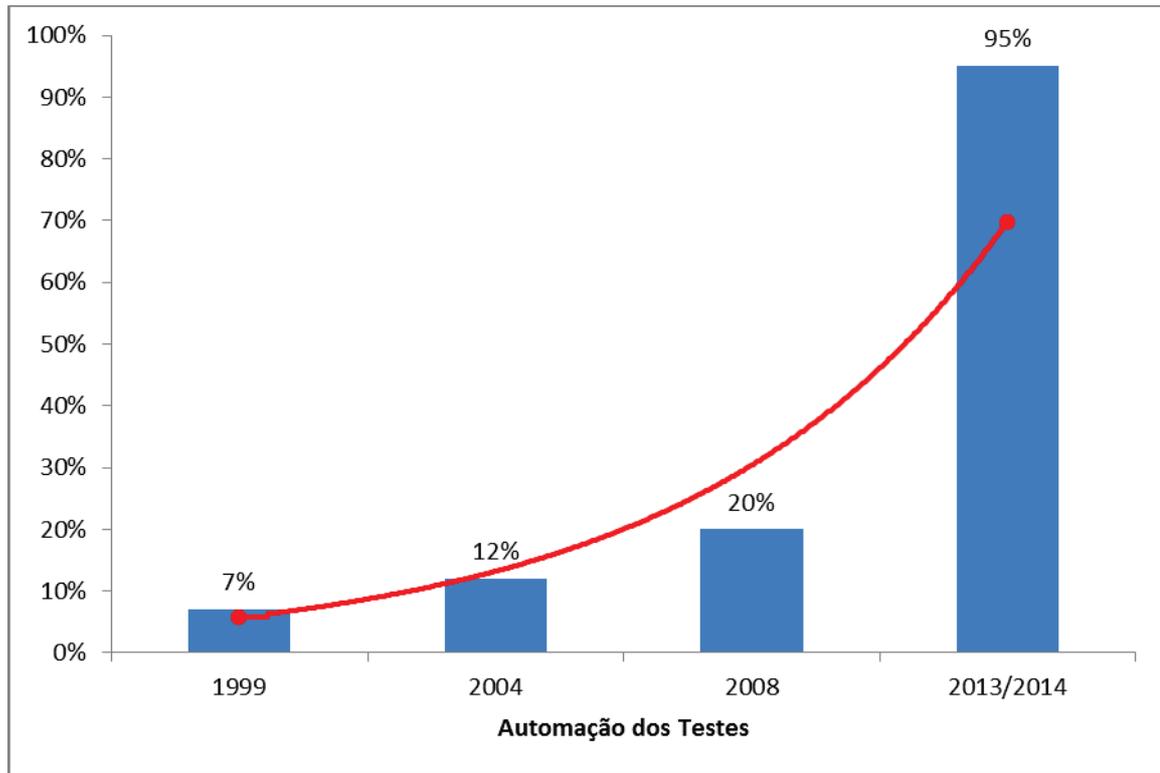
Fonte: Do Autor

A redução de 33% de utilização do protótipo ilustrada na Figura 38 se dá principalmente pelo aumento da maturidade dos procedimentos de teste, já validados previamente em modelos, evitando assim que não conformidades no procedimento de teste fossem encontradas durante os testes no protótipo. Estes dados foram consolidados em função dos resultados obtidos nos testes realizados nesta pesquisa e do histórico do registro das não conformidades encontradas na última aeronave projetada pela empresa, que atualmente executa em torno de 105 testes por aeronave.

Os resultados evidenciados nas Figura 37 e Figura 38 demonstram a capacidade de redução do tempo de validação de um procedimento de teste por meio de modelagem e simulação, com isso, será possível evoluir e aumentar a automação dos testes eletroeletrônicos na produção, devido principalmente à diminuição do tempo de desenvolvimento e validação.

Com os resultados desta pesquisa comprova-se a possibilidade da mesma equipe de Engenheiros de Manufatura aumentar o número de testes automatizados no processo produtivo, conforme ilustra a Figura 39.

Figura 39– Evolução dos testes automatizados na produção presentes na empresa



Fonte: Do Autor

Na Figura 39 verifica-se a possibilidade de um crescimento exponencial nos anos de 2013 e 2014, demonstrando um grande salto no número de testes automatizados, proporcionados principalmente pela utilização de modelagem e simulação no desenvolvimento dos testes de produção. Ainda que a evolução tecnológica das aeronaves facilite tal automação, o tempo de desenvolvimento do procedimento de teste permanece o mesmo.

Portanto, vale salientar que a evolução do número de testes automatizados apresentado na Figura 39 pode ser obtida sem a necessidade de aumento da equipe de desenvolvimento, graças ao ganho potencial de produtividade proporcionado pelo novo processo proposto nesta pesquisa.

4.4. Estratégia obtida pela pesquisa Delphi

Neste item encontram-se as respostas obtidas pela pesquisa do Delphi. A fim de preservar a identidade dos especialistas, estes foram nomeados temporariamente como S1, S2, S3 e assim sucessivamente até S21, onde S significa o sujeito da pesquisa.

A distribuição dos especialistas por área de atuação e tempo de experiência pode ser observada no Quadro 6. Esta distribuição foi realizada de acordo com os critérios adotados no planejamento da pesquisa Delphi.

Quadro 6 - Classificação dos especialistas por área de atuação e tempo de experiência

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21
Eng. Manufatura					X						X	X			X				X		
Eng. Testes e Automação								X					X				X				X
Eng. Desenvolvimento do Produto	X	X				X			X	X				X		X		X		X	
Eng. Ensaios de Sistemas			X	X			X														
Experiência profissional de 0 - 5 anos		X	X											X	X				X		
Experiência profissional de 6 - 10 anos					X	X	X		X	X		X						X		X	
Experiência de mais de 10 anos	X			X				X			X		X			X	X				X

Fonte: Do Autor

No Quadro 6 visualiza-se em suas colunas o especialista envolvido na pesquisa e nas linhas a sua classificação quanto à área de atuação e ao tempo de experiência. Vale salientar que cada especialista é classificado em somente uma área de atuação e uma escala de tempo de experiência.

Em posse das respostas obtidas, foi possível avaliar, a opinião dos especialistas quanto ao tema abordado por esta pesquisa. Uma visão compilada das respostas pode ser verificada no Apêndice A.

Um detalhamento das respostas do Delphi pode ser visualizado no Quadro 7 e no Quadro 8. Nestes quadros verifica-se a coluna Id que é responsável por identificar numericamente a pergunta, seguido da descrição da pergunta na coluna seguinte e por fim a compilação dos resultados obtidos na pesquisa.

As avaliações recebidas nas opções de cada pergunta, respondida pelos especialistas, estão representadas no Quadro 7 e no Quadro 8 em valores absolutos e relativos. No Quadro 7 encontram-se as respostas obtidas das perguntas de 1 a 13 e no Quadro 8 as demais respostas da pesquisa Delphi.

Em posse das repostas dos especialistas, foi possível identificar pontos positivos e oportunidades de melhoria no processo de implantação das técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* aplicados aos testes produtivos, sugeridos por esta pesquisa.

Quadro 7- Respostas das perguntas de 1 a 13 da pesquisa do Delphi

Id Pergunta	Tópicos abordados					
		Sim sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
1	É possível através de Model Based Design e Model Based Testing o reuso dos testes ao longo do processo de desenvolvimento do produto ?	2	16	3	0	0
		10%	76%	14%	0%	0%
2	Pelas técnicas de Model Based Design e Model Based Testing é possível antecipar defeitos nos procedimentos de teste eletro eletrônicos da produção ?	De 90 a 100 % dos defeitos	De 60-80% dos defeitos	50% dos defeitos	De 10-30% dos defeitos	Até 10% dos defeitos
		1	11	4	5	0
		5%	52%	19%	24%	0%
3	A representatividade dos modelos de simulação que você já utilizou foram suficientes para antecipar defeitos nos testes eletro eletrônicos da produção ?	De 90 a 100 % dos modelos utilizados	De 60-80% dos modelos utilizados	50% dos modelos utilizados	De 10-30% dos modelos utilizados	Apenas 10% dos modelos utilizados
		0	3	5	12	1
		0%	14%	24%	57%	5%
4	É possível criar um processo confiável de validação e verificação dos testes de produção por meio de modelos de simulação ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		6	13	1	1	0
		29%	62%	5%	5%	0%
5	O controle de configuração dos modelos de simulação pode ser seguido para a validação dos procedimentos dos testes de produção ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		20	0	0	1	0
		95%	0%	0%	5%	0%
6	As ferramentas utilizadas na empresa são suficientes para a validação dos testes de produção pelos MBD e MBT ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		0	8	13	0	0
		0%	38%	62%	0%	0%
7	Por meio da utilização dos modelos de simulação é possível agilizar também o processo de desenvolvimento dos procedimento de teste eletro-eletrônicos?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		1	10	10	0	0
		5%	48%	48%	0%	0%
8	Os aplicativos de testes utilizados para validação dos procedimentos de teste da produção por meio de modelos são eficientes no processo ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		1	13	6	1	0
		5%	62%	29%	5%	0%
9	É possível utilizar modelos de simulação com diferentes "representatividades" ou diferentes "níveis de fidelidade" de acordo com a sua necessidade ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		0	21	0	0	0
		0%	100%	0%	0%	0%
10	Modelos de alta fidelidade possibilitam o desenvolvimento de aplicações em HIL(Hardware-In-The-Loop) para integração nos RIG's, IRON BIRDS e Testes de produção ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		1	7	3	10	0
		5%	33%	14%	48%	0%
11	Os modelos de sistemas podem ser utilizados para antecipar as campanhas de ensaios ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		14	6	1	0	0
		67%	29%	5%	0%	0%
12	Através de modelos de simulação é possível explorar um número maior de testes em ambientes simulados ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		20	1	0	0	0
		95%	5%	0%	0%	0%
13	Os procedimentos de teste validados com a utilização de modelos de simulação podem ser documentados ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
		13	6	2	0	0
		62%	29%	10%	0%	0%

Fonte: Do autor

Quadro 8 - Respostas das perguntas de 14 a 23 da pesquisa do Delphi

Id Pergunta	Tópicos abordados					
		Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
14	Os testes realizados com a utilização de modelos de simulação podem ser planejados ao longo do desenvolvimento do produto ?	14	7	0	0	0
		67%	33%	0%	0%	0%
15	É possível rastrear requisitos textuais nos modelos de simulação ?	9	3	7	2	0
		43%	14%	33%	10%	0%
16	Os modelos de simulação podem auxiliar na execução dos testes realizados na produção para facilitar troubleshooting ?	0	16	5	0	0
		0%	76%	24%	0%	0%
17	O modelo pode ser considerado como um requisito de sistema ?	1	6	14	0	0
		5%	29%	67%	0%	0%
18	Model Based Design e Model Based Testing auxilia na identificação de requisitos de testabilidade DFT (Design for Testability) para facilitar a automação dos testes de produção ?	4	4	13	0	0
		19%	19%	62%	0%	0%
19	Os modelos de simulação podem possibilitar a geração automática dos resultados esperados dos procedimentos de teste da produção ?	0	20	1	0	0
		0%	95%	5%	0%	0%
20	A utilização de Model Based Testing reduz o ciclo de desenvolvimento dos procedimentos de teste ?	3	14	4	0	0
		14%	67%	19%	0%	0%
21	Model Based Design e Model Based Testing são efetivos da etapa de especificação dos sistemas ?	6	15	0	0	0
		29%	71%	0%	0%	0%
22	Model Based Design e Model Based Testing são efetivos da etapa de desenvolvimento dos sistemas ?	5	16	0	0	0
		24%	76%	0%	0%	0%
23	Model Based Design e Model Based Testing são efetivos na etapa de verificação dos sistemas ?	7	14	0	0	0
		33%	67%	0%	0%	0%

Fonte: Do Autor

Verifica-se no Quadro 7 e no Quadro 8 um sombreamento em verde em cada pergunta; tal sombreamento representa a opção escolhida pela maioria dos especialistas na questão. O critério utilizado para tal atribuição foi o valor relativo obtido na avaliação da questão maior que cinquenta por cento dos especialistas. Vale ressaltar que as questões sete, dez e quinze

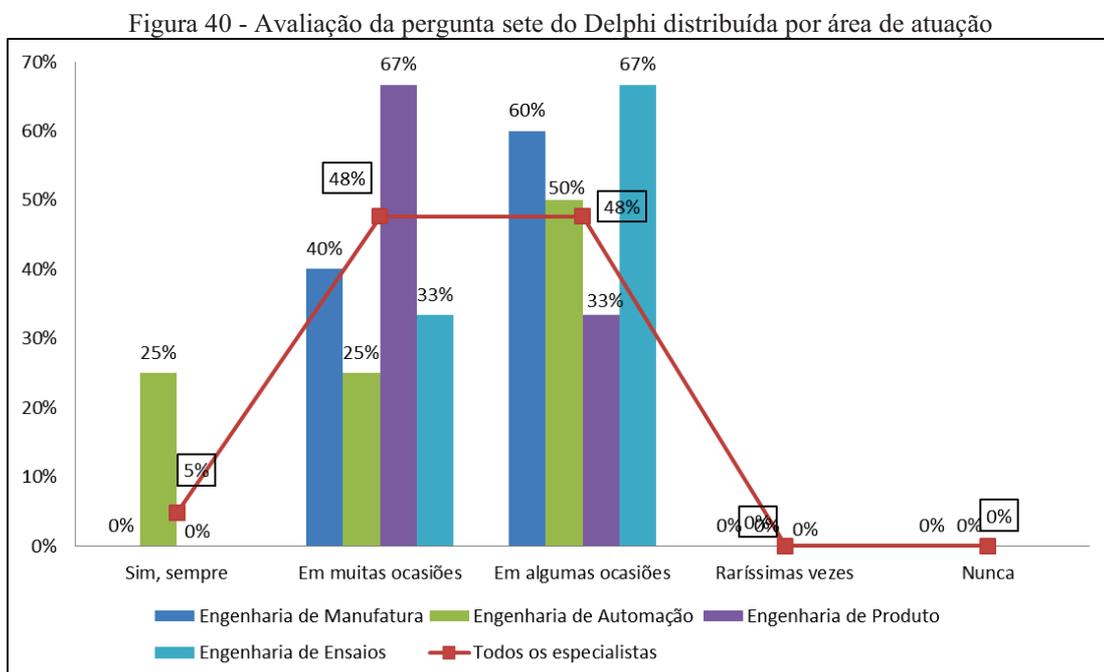
apresentaram mais de uma opção sombreada, tal fato ocorreu devido a nenhuma das opções nestas questões ter obtido um percentual maior que cinquenta por cento dos pesquisadores.

Verifica-se ainda nas respostas, que para a grande maioria das questões abordadas, já existe um consenso entre os especialistas, tal fato evidencia a possibilidade de implantação do novo processo de desenvolvimento dos testes de produção sugerido por esta pesquisa.

Observa-se por meio das respostas das perguntas de número um, nove, onze, doze, quatorze, 21 e 22 uma favorabilidade maior que cinquenta por cento para a aplicação das técnicas de *Model-Based-Design* e *Model-Based-Testing* nas diversas etapas de desenvolvimento do produto, como especificação de requisitos, desenvolvimento e verificação. Tal fato valida a pergunta de pesquisa deste trabalho: Quais as fases consideradas importantes na implantação do *Model-Based-Design* (MBD) e *Model-Based-Testing* (MBT).

A fim de realizar uma análise mais apurada das questões que não apresentaram uma única opção escolhida pela maioria dos especialistas, se fez necessário analisar tais questões por área de atuação e tempo de experiência.

A análise da questão sete do Delphi, pode ser verificada na Figura 40.

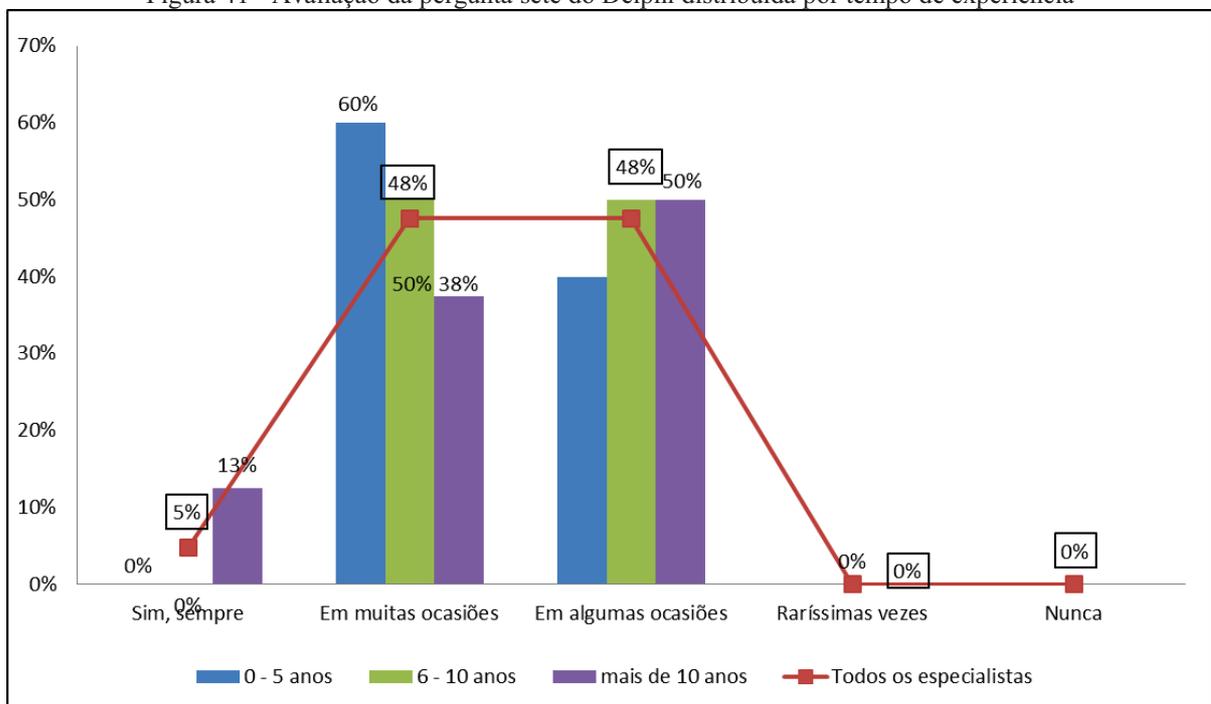


Fonte: Do autor

A Figura 40 apresenta as respostas obtidas na questão de numero sete agrupadas por área de atuação; observa-se nesta figura, o mesmo comportamento das respostas globais dos especialistas; porem verifica-se que a área de Engenharia de Automação foi a responsável por avaliar esta questão como: sim sempre, determinando então as duas opções sim sempre e em muitas ocasiões como as questões que receberam a maioria das avaliações dos especialistas.

A avaliação da questão sete do Delphi, distribuída por tempo de experiência dos especialistas, pode ser verificada na Figura 41.

Figura 41 - Avaliação da pergunta sete do Delphi distribuída por tempo de experiência

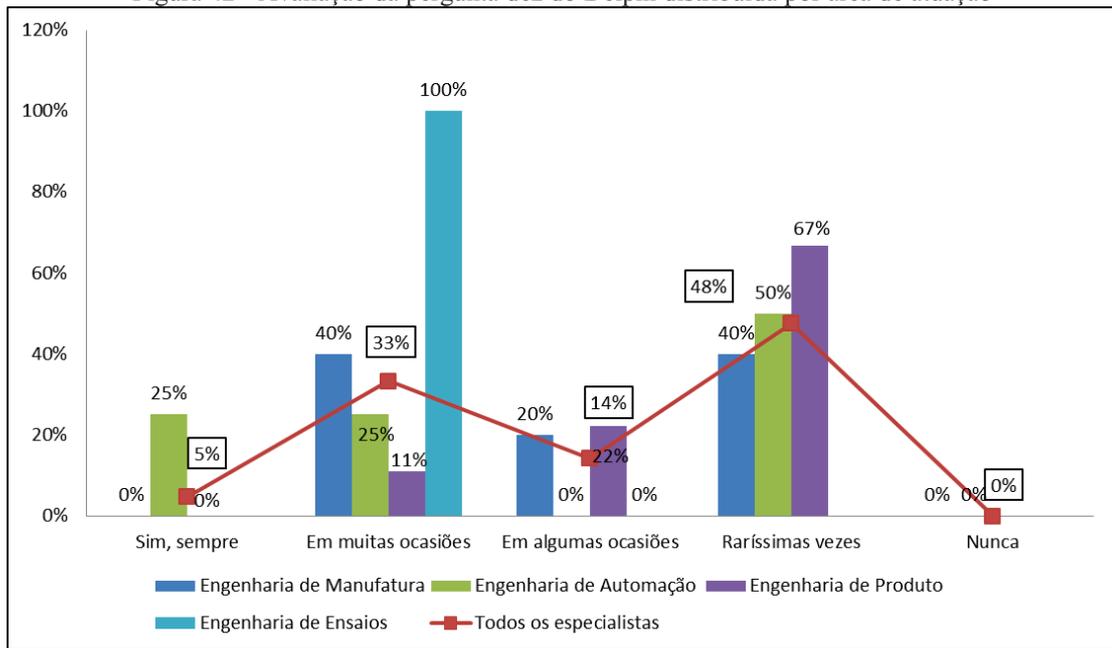


Fonte: Do autor

Observa-se na Figura 41 as respostas obtidas na questão de numero sete agrupadas por tempo de experiência; verifica-se nas respostas, o mesmo comportamento das respostas globais dos especialistas. Outra análise retirada da Figura 41 é a escolha de treze por cento da opção sim sempre pelos profissionais com mais de dez anos de experiência, fato este que contribuiu para que duas opções juntas recebessem a maioria das avaliações dos especialistas.

A avaliação da questão dez do Delphi, distribuída por área de atuação dos especialistas, pode ser verificada na Figura 42.

Figura 42 - Avaliação da pergunta dez do Delphi distribuída por área de atuação

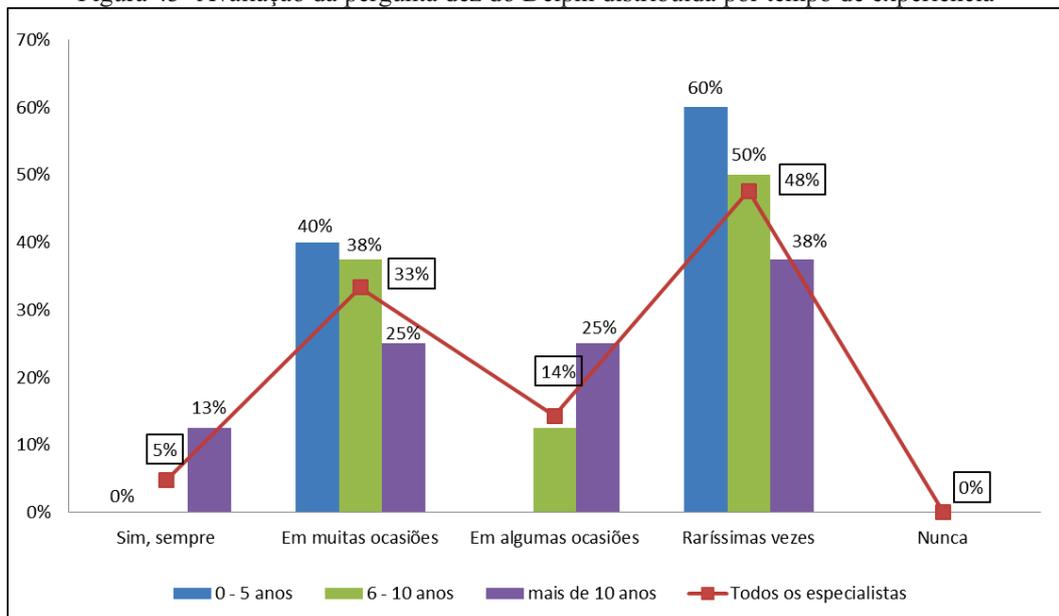


Fonte: Do Autor

Nos dados apresentados na Figura 42 observa-se na área de Engenharia de Ensaios uma visão mais otimista que o percentual total das respostas, sendo a única área que apresentou consenso em uma única opção de resposta, divergindo assim das duas opções que juntas receberam a maioria das avaliações dos especialistas. Tal fato pode ser explicado pela vivência desta área em aplicações com *Hardware-in-the-Loop* nos laboratórios de ensaio.

A avaliação da questão dez do Delphi, distribuída por tempo de experiência, pode ser verificada na Figura 43.

Figura 43- Avaliação da pergunta dez do Delphi distribuída por tempo de experiência

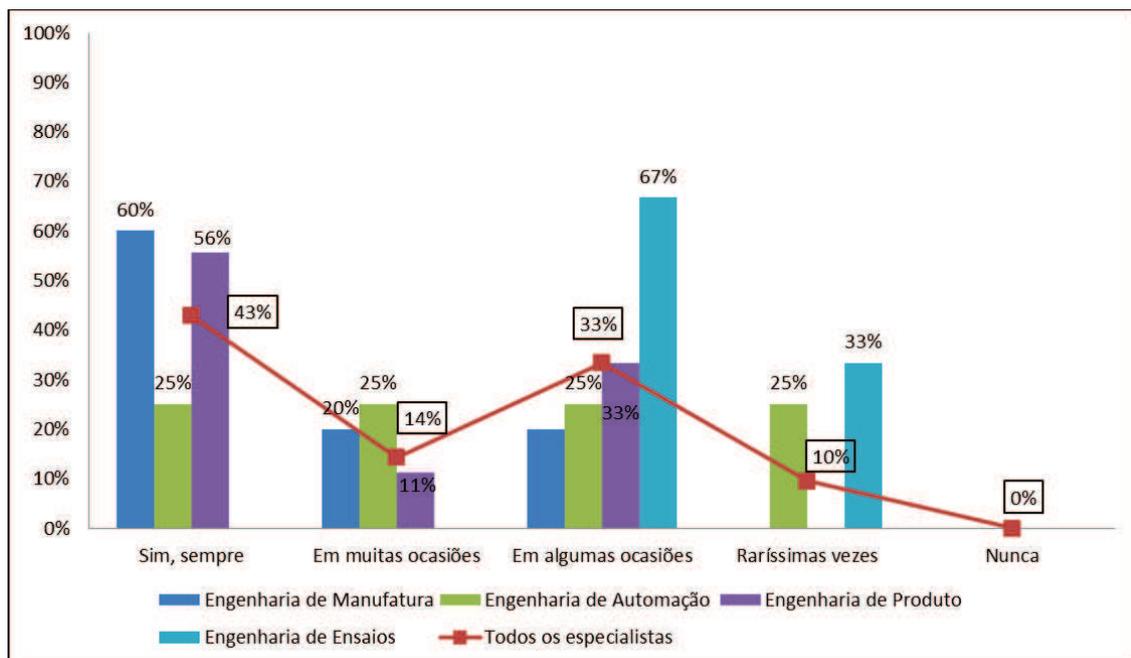


Fonte: Do Autor

Verifica-se na Figura 43 que as respostas das questões distribuídas por tempo de experiência, não apresentaram variações consideráveis em relação às respostas de todos os especialistas.

A avaliação da questão quinze do Delphi, distribuída por área de atuação, pode ser verificada na Figura 44.

Figura 44 - Avaliação da questão quinze do Delphi distribuída por área de atuação



Fonte: Do Autor

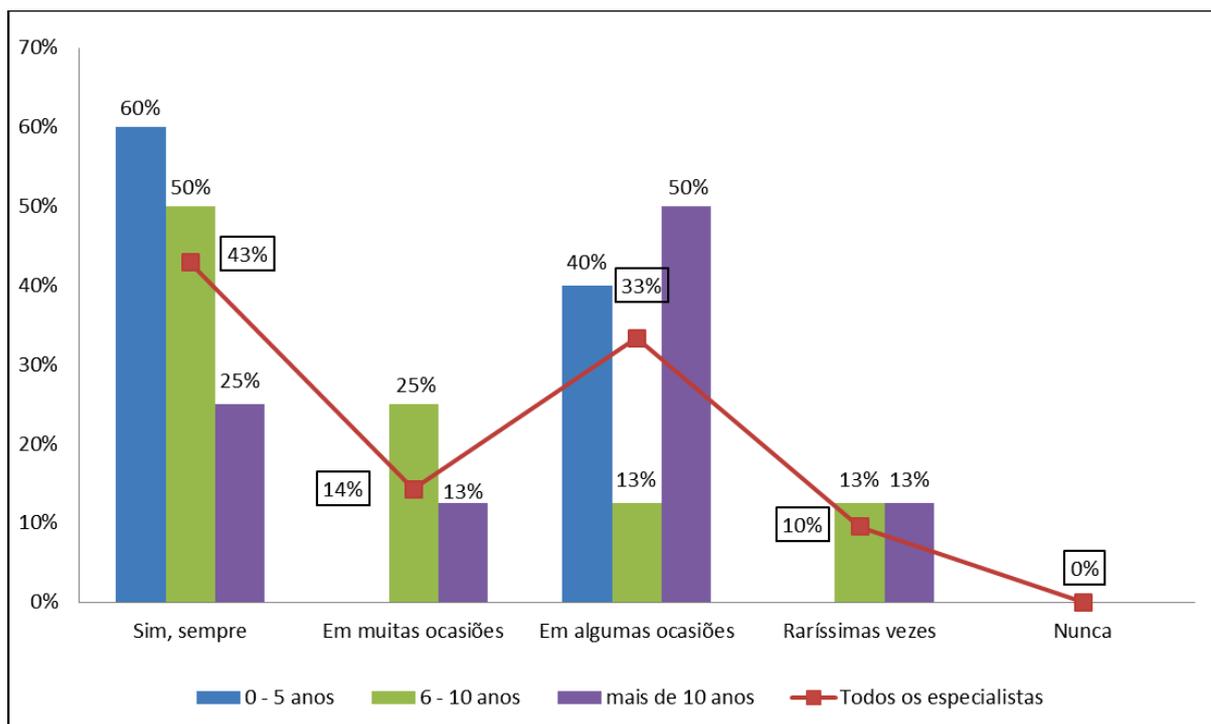
Observa-se na Figura 44 que a Engenharia de Automação apresentou um equilíbrio maior nesta pergunta, onde não houve consenso entre os especialistas desta área. Tal fato pode ser explicado pela pouca utilização de requisitos textuais conjuntamente com os modelos de simulação em suas aplicações.

Verifica-se também na Figura 44 uma disparidade da opção que recebeu a maioria das avaliações dos especialistas da Engenharia de Ensaio, quando comparadas com as opções que receberam a maioria da avaliação de todos os especialistas. Em sua avaliação, a Engenharia de Ensaio apresentou uma visão mais pessimista da capacidade de rastrear requisitos textuais nos modelos de simulação, tal disparidade pode ser explicada pelas experiências obtidas em projetos passados.

Para as demais áreas, na pergunta quinze, não houve variação considerável nas opções selecionadas pela maioria de seus especialistas, quando comparadas a visão global de todos os especialistas.

A avaliação da questão quinze do Delphi, distribuída por tempo de experiência, pode ser verificada na Figura 45.

Figura 45 - Avaliação da questão quinze do Delphi distribuída por tempo de experiência



Fonte: Do Autor

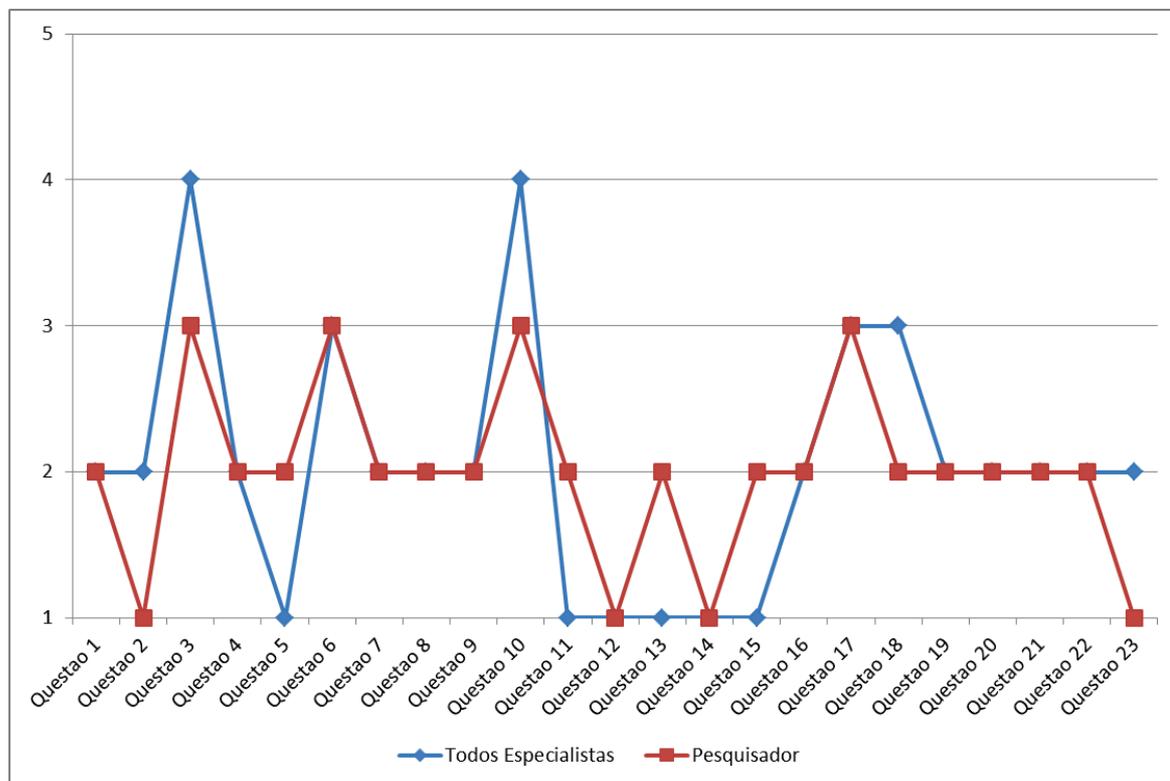
Observa-se na Figura 45, que os profissionais mais experientes demonstraram-se mais pessimistas quanto à capacidade de rastrear requisitos textuais nos modelos de simulação. Tal característica representa uma disparidade quando comparada as respostas que receberam a maioria da avaliação de todos os especialistas.

Esta disparidade das respostas dos especialistas mais experientes pode ser explicada pela maior oportunidade de contato destes especialistas em trabalhos relacionados a requisitos textuais.

Para as demais áreas, não houve variação considerável entre as suas opções e as opções globais desta pergunta.

A fim de avaliar as respostas dos especialistas com as expectativas esperadas por esta pesquisa, realizou-se uma comparação entre ambas às avaliações; a dos especialistas e a do pesquisador, conforme observa-se na Figura 46.

Figura 46 - Comparativo das respostas dos especialistas com as expectativas da pesquisa



Fonte: Do Autor

Analisando-se o gráfico da Figura 46, verifica-se que as questões dois, três, 18 e 23, demonstraram-se abaixo das expectativas esperadas por esta pesquisa, porém com um desvio pequeno. Tal fato pode ser explicado pela inovação trazida por esta tecnologia, que ainda está em desenvolvimento na empresa. Outro fator a ser considerado é o fato de que devido ao conhecimento do pesquisador, adquirido na elaboração desta pesquisa, apresentou uma visão mais otimista dos benefícios das técnicas de MBD e MBT em suas avaliações.

Em contrapartida, as questões cinco, onze e treze foram melhores avaliadas pelos pesquisadores. Tal ocorrência pode ser explicada pelo fato das perguntas se referirem a atividades de documentação e controle de configuração, característica esta, seguida a risca pelo perfil dos profissionais e pela característica da empresa.

4.5.Considerações finais

O processo atual de desenvolvimento dos testes se inicia nas fases finais de desenvolvimento do produto, onde os sistemas já estão desenvolvidos e o custo de modificações e ou correções se torna elevado. Além disso, não possibilita a validação dos testes antecipadamente, dando margem a possíveis desvios que somente seriam encontrados nos protótipos.

Já por meio do processo proposto por este trabalho, baseados em modelos (MBD) e testes (MBT), possibilita desenvolver soluções alternativas de teste para validar a melhor tomada de decisão de projeto, a partir da utilização de laboratórios e simulações. Esta nova proposta de desenvolvimento viabiliza a utilização de Engenharia Simultânea, Prototipação Rápida e outras técnicas inovadoras de desenvolvimento do produto.

A transição do processo atual de desenvolvimento dos testes para a nova proposta sugerida neste trabalho deve ser realizada de forma gradual. Para que isto seja possível, facilitadores deste movimento devem ser considerados como: a capacitação dos funcionários; o uso de modelagem e simulação; o reuso dos testes ao longo do desenvolvimento do produto e a automação nos processos de validação e verificação.

Algo importante a se considerar nesta transição é que os modelos de simulação devem seguir os mesmos níveis de abstração da etapa de desenvolvimento do produto; por exemplo, durante a etapa de elaboração e validação de requisitos não se espera nesta fase, utilizar modelos detalhados do sistema e sim modelos que representem o mesmo nível de abstração dos requisitos. Neste sentido o procedimento de teste deverá ser evoluído seguindo a mesma estratégia dos modelos.

Como fruto dos estudos realizados por esta pesquisa, nada justifica a impossibilidade ou prejuízo da utilização da nova proposta de desenvolvimento sugerida neste trabalho; ao contrário, os testes realizados apontam a possibilidade de:

- Redução do ciclo de desenvolvimento dos testes em 25%;
- Redução de 33% do tempo de teste nos protótipos;
- Antecipação da detecção de defeitos e consequente aumento da maturidade do teste;
- Facilidade de compreensão dos testes de sistemas;

- Reutilização dos artefatos de teste ao longo das etapas de desenvolvimento.

A redução de 25% do ciclo de desenvolvimento pode ser obtida considerando-se que atualmente são despendidos 448Hh de desenvolvimento no processo atual. Já com a nova proposta sugerida neste trabalho pretende-se realizar a mesma atividade com 336 Hh. Estes números foram adquiridos da seguinte forma: para processo atual avaliou-se o tempo dispendido em projetos passados; para a nova proposta realizou-se um mapeamento no novo processo proposto juntamente aos testes realizados em ambientes simulados.

Já a redução de 33% do tempo de teste nos protótipos, pode ser obtida em função dos resultados obtidos nos testes realizados nesta pesquisa e do histórico do registro das não-conformidades encontradas na última aeronave projetada pela empresa

Por fim, o questionário do Delphi serviu como método alternativo e complementar, via pesquisa qualitativa, para validar as perguntas de pesquisas estabelecidas neste trabalho. Por se tratar da opinião de especialistas de diferentes áreas de atuação e com tempo de experiência variado, o resultado obtido foi representativo em suas respostas. De forma geral, os resultados obtidos no questionário do Delphi não apresentaram desvios dos objetivos específicos propostos por esta pesquisa.

5.CONCLUSÃO

Ainda que o desenvolvimento de aeronaves seja uma atividade complexa; neste trabalho comprovou-se que a utilização das técnicas de MBD e MBT, como alternativa de desenvolvimento dos testes eletroeletrônicos da produção, demonstra-se; viável. Tais técnicas, possibilitam o envolvimento da equipe de testes ainda no início do desenvolvimento do produto. Tal fato, possibilita a antecipação de detecção de defeitos nos procedimentos de teste, diminuição do tempo de desenvolvimento do procedimento de teste e redução do tempo de validação dos testes no protótipo.

Neste trabalho realizou-se a simulação de dois sistemas: o Elétrico e o de Combustível de uma aeronave regional; tal capacidade, permitiu explorar e comprovar a viabilidade das técnicas de MBD e MBT. Por meio destas simulações realizadas, foi possível avaliar e identificar as etapas necessárias para a elaboração de um novo processo de validação dos procedimentos de teste. Tal simulação possibilitou ainda, avaliar e quantificar os ganhos da utilização das técnicas de modelagem e simulação no desenvolvimento e validação dos testes da produção.

Nesta pesquisa, foi possível desenvolver um novo processo de desenvolvimento e validação dos testes eletroeletrônicos da produção por meio de modelos de simulação. Tal processo, observado na Figura 34, baseia-se na validação contínua ao longo do desenvolvimento do produto por meio dos múltiplos Vs. Este novo processo possibilita a capacidade de exercitar o sistema ainda em desenvolvimento; com isso, o número de testes possíveis e desejáveis durante as várias etapas do desenvolvimento do produto, desde a validação de requisitos até os testes finais, proporciona o desenvolvimento de testes em paralelo com o desenvolvimento do projeto. Verificou-se ainda que pela nova proposta de desenvolvimento dos testes, soluções alternativas podem ser avaliadas facilitando assim a tomada de decisão da melhor alternativa de teste. Tal característica facilita a aplicação da engenharia simultânea. Por fim, o novo processo desenvolvido, permite a detecção antecipada de possíveis não-conformidades nos procedimentos de teste e até mesmo no produto.

Durante a pesquisa, foi possível realizar 2 testes em sistemas diferentes, sendo eles o sistema Elétrico e o sistema de Combustível. Tal fato, além de possibilitar a avaliação do novo processo de desenvolvimento, resultou no desenvolvimento de uma nova biblioteca de software, capaz de executar os testes da produção em modelos de simulação. Este resultado

proporciona a possibilidade de realização de novos testes; em outros sistemas da aeronave, de forma ágil e padronizada.

Observou-se nos resultados obtidos por esta pesquisa a possibilidade de ganhos de eficiência e eficácia na aplicação das técnicas de MBD e MBT. A expressiva redução de 33% do tempo de teste nos protótipos pode ser observada por meio dos resultados dos testes obtidos nas simulações efetuadas e pela redução de possíveis não conformidades que seriam identificadas somente na aeronave protótipo. Outro ganho evidenciado, foi a redução de 25% do ciclo de desenvolvimento dos testes, tal ganho se dá pela antecipação da curva de aprendizado do engenheiro de manufatura e também pela diminuição do tempo de aprovação do teste, que são verificados agora por regras formais, eliminando assim a subjetividade das especificações formais e estáticas. Evidencia-se ainda nos resultados obtidos nos testes, ganhos de eficácia da utilização destas técnicas, como o aumento da robustez dos procedimentos de teste para a sua execução no protótipo e a possibilidade de otimização dos procedimentos, evitando desperdícios.

A transição do processo atual de desenvolvimento dos testes para o novo processo proposto por este trabalho deve ser realizada de forma gradual, ou seja, deve-se iniciar primeiramente pelo preparo da equipe de desenvolvimento dos testes e posteriormente pela conscientização da alta direção da empresa. Para que o preparo da equipe de teste seja possível, facilitadores devem ser considerados como: treinamento dos funcionários em modelagem e simulação; conscientização da equipe dos ganhos de eficiência e eficácia das técnicas de MBD e MBT; mudança de paradigma da equipe. Tal mudança de paradigma é um dos fatores primordiais; pois iniciando-se as atividades de teste ainda nas etapas iniciais de desenvolvimento do produto, observa-se um maior grau de incerteza nos sistemas, devido a sua maturidade. Para solucionar tal incerteza, os procedimentos de teste devem seguir os mesmos níveis de abstração da etapa de desenvolvimento do produto; por exemplo, durante a etapa de elaboração e validação de requisitos não se espera nesta fase, utilizar procedimentos de teste detalhados do sistema e sim procedimentos que representem o mesmo nível de abstração da etapa de elaboração de requisitos. Neste sentido, precisa estar claro à equipe de desenvolvimento dos testes, que os procedimentos devem ser evoluídos seguindo a mesma estratégia do desenvolvimento do produto.

Outro fator a ser considerado para tal transição é a conscientização da alta direção da empresa; esta deverá prover os recursos necessários como: hardware; software; e pessoas treinadas. A alta direção deve também viabilizar a antecipação da curva de engajamento da

equipe de teste para as etapas iniciais de desenvolvimento do produto, antecipando assim o investimento em Hh da equipe de teste, tal investimento visa possibilitar o reuso dos testes ao longo do desenvolvimento do produto e a automação e padronização dos processos de validação e verificação.

A contribuição dos Especialistas no Delphi validou as principais propostas sugeridas por esta pesquisa; trazendo novos olhares e contribuições ao tema, principalmente no que se refere ao procedimento mais adequado à migração para a nova proposta de desenvolvimento sugerida nesta pesquisa. Por meio da pesquisa do Delphi foi possível identificar as principais fases para implantação do MBD e MBT, evidenciou-se nas respostas obtidas as fases de elaboração de requisitos e desenvolvimento como fases importantes para implantação da nova metodologia.

Como sugestão para trabalhos futuros, os seguintes temas são propostos:

- A geração automática dos testes de produção por meio de modelos de simulação.
- Utilização de modelos de simulação para aplicações com *hardware-in-the-loop* nas estações de teste da produção.
- Utilização de modelos de simulação como meio de resolução de problemas (*Troubleshooting*) da aeronave durante o processo produtivo.

REFERÊNCIAS

- ALTHOLFF, G. F. **Using executable assertions for runtime fault detection in a Model-Based Software Development Approach**. Dissertação de Mestrado do ITA. São José dos Campos, p. 95. 2007.
- ANAKWA, W. K.N.; ROCA, H. P.; LOPEZ, Jo.; MALINOWSKI, A. **Environments for Rapid Implementation of Control Algorithms And Hardware-in-the-Loop Simulation**. Proc. of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'02). Sevilla: IEEE. 2002. p. 2288-2293.
- BAKER, L.; LONG, J. **Role of System Engineering Across The System Life Cycle**. Interest Group White Paper of International Symposium. Los Angeles: INCOSE. 2006. p. 10-15.
- BARBOSA, G. F. **Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos da metodologia de projeto para excelência (DFX - Design for excellence) e produção enxuta (Lean Manufacturing)**. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, p. 332. 2012.
- BOEHM, B. W. **Software Engineering Economics - Prentice Hall**. 4. ed. New Jersey: Englewood Cliffs, v. 10, 1981.
- BOLGENHAGEM, N. J. **O processo de desenvolvimento de produtos: Proposicao de um modelo de gestao e organização**. Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Engenharia - UFRGS. Porto Alegre, p. 107. 2003.
- BURNSTEIN, I. **Practical Software Testing**. 7º. ed. Chicago: Springer, v. 2, 2008.
- CARVALHO, M. A.; BACK, N.; OGLIARE, A. **TRIZ no Desenvolvimento de Produto: Encontrando e Resolvendo Contradições Técnicas e Físicas**. V CBGDP. Curitiba: [s.n.]. 2005. p. 5-10.
- CASTILLO, M. A. R.; SOUZA, E. G. D. **ANÁLISE COMPARATIVA DA UTILIZAÇÃO DO MODELO TRADICIONAL**. 10th International Conference on Information Systems and Technology Management. São Paulo: CONTESI. 2013. p. 10 - 35.
- CEM, K.; JAMES, B.; BRET, P. **Lessons Learned in Software Testing**. 3. ed. NY: John Wiley & Sons, v. 5, 2001.
- COSTA, M. G. **Estrategia de automação em testes : requisitos, arquitetura e acompanhamento de sua implantação**. Mestrado Profissional em Ciencia da Computação - Unicamp. Caminas, p. 94. 2004. (vtls000389004).
- CROSS, N. **Enginnering Design Methods: Estrategies for Product Design**. 3. ed. New York: JOHN WILEY & SONS, v. 4, 2005.
- DEPARTMENT OF DEFENSE. **Standard practice for system safety**. DEPARTMENT OF DEFENSE. NY, p. 85. 2007. (MIL-STD-882-SD).
- DORF, R. C.; KUSIAK, A. **Handbook of Design, Manufacturing and Automation**. 2. ed. Iowa: John Wiley & Sons, v. III, 2007.

FERRAZ, R. B. D. **Proposta de Ferramenta para desenvolvimento de simuladores**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 88. 2010.

FERREIRA, D. D.; TRABASSO, L. G. **PROCESSO DE ANÁLISE DE DECISÃO DA AUTOMAÇÃO NA MANUFATURA AERONÁUTICA**. 3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control. Sao Jose dos Campos - SP: Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications. 2009. p. 1-10.

FORSBERG, K.; MOSS, H. The relationship of systems engineering to the project cycle. **Engineering Management Journal**, Chattanooga, TN, v. 4, n. 3, p. 36-43, October 1995.

FURNIVAL, A. A participação dos usuários no desenvolvimento de sistemas de informação. **Ciencia da Informação**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 5-15, fev. 1995. ISSN: 1518-8353.

GALIN, D. **Software quality assurance: from theory to implementation**. 2. ed. Boston: Pearson Education, v. 3, 2004.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas da Pesquisa Social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, v. 3, 1999.

GREGA, W. **Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education**. 29th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference. San Juan, Puerto Rico: IEEE. 1999. p. 7-12.

GRISI, C. C. H.; BRITTO, R. P. Técnica de Cenários e o Método Delphi: uma aplicação para o ambiente brasileiro. **SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO FEA-USP**, 2003. Disponível em: <<http://www.ead.fea.usp.br/Semead/6semead/MKT.htm>>. Acesso em: 14 abril 2013.

HERNANDES, G. **Fluxo de Atividades para Integração de Modelos de Sistemas Aeronáuticos: Caso KC390**. Dissertação de Mestrado do ITA. São José dos Campos, p. 96. 2013.

HUANG, G. Q. **Design for X: Concurrent engineering imperatives**. 1. ed. Fort Worth, TX: Springer Netherlands, v. 7, 1996.

INCOSE. **Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies**. INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING. Seattle, p. 55. 2008. (TD_2007-003-01 Revision B).

JUGEND, D. **Desenvolvimento de produtos em pequenas e médias empresas de base**. Dissertação de Mestrado - UFSCAR. São Carlos, p. 2006. 2006.

KHAN, W. A.; RAOUF, A.; CHENG, K. **Virtual Manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, v. 6, 2011.

KLUGLIANSKAS, I. Engenharia Simultânea: Organização e implantação em empresas Brasileiras. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 104-110, dezembro 1993.

KUKA. KUKA - Robotics. **Site da KUKA setor aeronautico**, 2014. Disponível em: <http://www.kuka.com/en/solutions/solutions_search/L_080519_Stork_Fokker.htm>. Acesso em: 15 julho 2014.

LEDERER, G. Making Virtual Manufacturing a Reality. **Prime Faraday Technology Watch**, Loughborough, v. 22, n. 4, p. 16-17, November 1996. ISSN ISBN 1-84402-018-5.

LEE, W.; CHEUNG, C.; LI, J. Applications of virtual manufacturing in materials processing. **Journal of Materials Processing Technology**, Seoul, Korea, v. 113, n. 3, p. 416-423, 15 June 2001. ISSN DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00668-9.

LUSTOSA, R. B. **PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO : uma aplicação no PROGER**. Dissertação de mestrado da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 189 f. 2009.

LYNCH, T.; GREGOR, S. **User Participation in Decision Support Systems Development: Influencing system outcomes**. European Journal of Information System. Basingstoke, UK: Macmillan Press Ltd. 2004. p. 286-301.

MACLAY, D. Simulation Gets into the Loop. **IEEE Review**, Cambridge, v. 43, n. 3, p. 109-112, May 1997. ISSN 0953-5683.

MAS, F.; RIOS, J.; MENENDEZ, J. L.; GOMEZ, A. **A process-oriented approach to modeling the conceptual design of aircraft assembly lines**. Springer-Verlag. London: Int J Adv Manuf Technol. 2012. p. 771-784.

MCLEOD, P. The Availability and Capabilities of 'Low-End' Virtual Modelling (Prototyping) Products to Enable Designers and Engineers to Prove Concept Early in the Design Cycle. **PRIME Faraday Technology Watch**, Loughborough, 10 November 2001. 8-20.

MENDES, A. S. **Verificação do Desempenho da Técnica "Hardware-in-the-Loop" Aplicada a Sistemas Mecânicos Não-Lineares**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 152. 2012.

MUNROE, J.; WILKINS, K.; GRUBER, M. **Integral Airframe Structures (IAS) - Validated Feasibility Study of Integrally Stiffened Metallic Fuselage Panels for Reducing Manufacturing Costs**. NASA Langley Technical Report Server. Los Angeles, p. 132. 2000. (NASA/CR-2000-209337).

MYERS, G. J. **The Art of Software Testing**. 6^o. ed. EUA: John Wiley & Sons, v. 3, 2010.

NAVAIR. Naval Air Systems Command. **Aircraft and Weapons**, 2014. Disponível em: <<http://www.navair.navy.mil/index.cfm?fuseaction=home.display&key=62D5ECE7-CB1C-41FD-B241-4B7BCC59E2C0>>. Acesso em: 01 agosto 2014.

NIKOLAOS, B.; MARKOS, P.; ARISTOMENIS, A. Virtual Manufacturing and Virtual Assembly. **International Journal of Computers, Communications and Controls**, Technical University of Crete, 18 February 2008. 196-203.

PEKKOLA, S.; KAARILAHTI, N.; POHJOLA, P. **Towards Formalised End-User Participation in Information Systems Development Process: Bridging the Gap between Participatory Design and ISD Methodologies**. Proceedings of the Ninth Conference on Participatory Design: Expanding Boundaries in Design. Trento, Italy: New York, ACM. 2006. p. 21-30.

PLINIO, V. Estratégia de Redução do Custo da Atividade de Teste. **Custo da Qualidade**, 2007. Disponível em: <<http://www.unimep.br/phpg/mostracademica/anais/4mostra/pdfs/481.pdf>>. Acesso em: 24 agosto 2013.

PORTO, A. J.; PALMA, J. G. **Fábrica do futuro**: entenda hoje como sua indústria vai ser amanhã. Manufatura Virtual. In: Jandira Guenka Palma. (Org.). São Paulo: Ed. Banas. 2000. p. 89-97.

PRESSMAN, R. **Software Engineering: A Practitioner's Approach**. 5°. ed. EUA: Higher Education, v. 3, 2007.

RIBEIRO, M. A. **Automação Industrial**. 4. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria, v. 1, 2001.

RODRIGUES, L.; TAVARES, P.; PRADO, M. Sliding Mode Control of an AUV in the diving and steering planes. **OCEANS '96. MTS/IEEE. Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings**, Fort Lauderdale, FL, v. 2, n. 1, p. 576 - 583, Sep 1996. ISSN ISBN: 0-7803-3519-8.

RODRIGUES, R. D. O. **Aplicação de Design for Testability na Elaboração de Requisitos de Testes de Produção no Desenvolvimento de Sistemas Aeronáuticos**. Dissertação de Mestrado Profissionalizante – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 79. 2011.

ROYCE, W. **Managing the Development of Large Software Systems**. IEEE WESCON. EUA: IEEE. 1970. p. 1-9.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, v. 5, 2010.

RTI, R. T. I. I. **The economic impacts of inadequate infrastructure for software testing**. National Institute for Standard and Technology. Washington DC: NIST Planing Report. 2002. p. 02-3.

RUP. Unified Process. **Rational Unified Process**, 2012. Disponível em: <<http://www.wthreex.com/rup/portugues/>>. Acesso em: 20 Junho 2014.

SAFFORD, E. **Test Automation Framework, Stated-based and Signal Flow Examples**. Twelfth Annual Software Technology Conference . EUA : [s.n.]. 2000. p. 50-63.

SENHORAS, E. M.; TAKEUCHI, K. P.; TAKEUCHI, K. P. **Gestão da Inovação no Desenvolvimento de Novos Produtos**. IV SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende: Fundação Dom Bosco. 2013. p. 5-9.

SILVA, D. M. E. **Apostila de Automação Industrial**. 1. ed. Piracicaba: EEP - Escola de Engenharia de Piracicaba, v. 1, 2007.

SILVA, H. M. **Simulação com Hardware In the Loop Aplicada a Veículos Submarinos Semi-Autônomos**. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 84. 2008.

SOBEK, D. K.; WARD, A. C.; LIKER, J. K. Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering. **MIT Sloan Management Review**, 1999. Disponível em: <<http://sloanreview.mit.edu/article/toyotas-principles-of-setbased-concurrent-engineering/>>. Acesso em: 28 jun 2014.

SOUZA, M. C. F.; PORTO, A. J. V.; RAVELLI, C. A.; BATOCCHIO, A. MANUFATURA VIRTUAL: CONCEITUAÇÃO E DESAFIOS. **Gestão e Produção**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 297-312, dezembro 2002.

UNIVERSIDADE DE MINNESOTA. Universidade de Minnesota Reports. **UMN Critical System Group**, 2010. Disponível em: <<http://www.cs.umn.edu/crisys>>. Acesso em: 8 setembro 2013.

UTTING, M.; LEGEARD, B. **Practical Model-Based Testing: a Tools Approach**. 3. ed. San Francisco: Morgan Kaufman, v. 2, 2007.

VIJAYKUMAR, N. L. **Testes de Software Baseados em Modelos**. Notas de Aula do programa de mestrado do INPE. São José dos Campos, p. 12. 2009.

VILLANI, E.; TRABASSO, L. G.; SUTERIO, R.; ALVARADO, B. H. L.; AMORIM, D. Y. K. Avaliação metrológica de um robô industrial para montagem estrutural de aeronaves. **Revista Controle & Automação**, São José dos Campos, v. 21, n. 6, p. 2-15, Dezembro 2010. ISSN Id.: 01068.

WRIGHT, J. T. C.; GIOVINAZZO, R. A. DELPHI – Uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. **Caderno de Pesquisas em Administração**, São Paulo, v. 1, n. 12, p. 54-65, fevereiro 2000.

ZACHMANN, G.; SA, A. G. D. **Virtual Reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes**. Computer and Graphics. New York: [s.n.]. 1999. p. 389 - 403.

ZENUN, M. M. N.; ALVES, J. M. **Princípios da manufatura enxuta integrados à gestão de projetos numa linha de montagem**: um estudo de caso na indústria aeronáutica. XXV Encontro Nac. de Eng. de Produção - ENEGEP - PUCRS. Porto Alegre: ABEPRO. 2005. p. 332-340.

APÊNDICE A

Seguem no Quadro 9 e no Quadro 10 as perguntas enviadas aos especialistas em Modelagem e Simulação de Sistemas e Testes de Produção.

Quadro 9 - – Formulário com as primeiras 10 perguntas do Delphi

Id Pergunta	Tópicos abordados					
1	É possível através de Model Based Design e Model Based Testing o reuso dos testes ao longo do processo de desenvolvimento do produto ?	Sim sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
2	Pelas técnicas de Model Based Design e Model Based Testing é possível antecipar defeitos nos procedimentos de teste eletro eletrônicos da produção ?	De 90 a 100 % dos defeitos	De 60-80% dos defeitos	50% dos defeitos	De 10-30% dos defeitos	Até 10% dos defeitos
3	A representatividade dos modelos de simulação que você já utilizou foram suficientes para antecipar defeitos nos testes eletro eletrônicos da produção ?	De 90 a 100 % dos modelos utilizados	De 60-80% dos modelos utilizados	50% dos modelos utilizados	De 10-30% dos modelos utilizados	Apenas 10% dos modelos utilizados
4	É possível criar um processo confiável de validação e verificação dos testes de produção por meio de modelos de simulação ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
5	O controle de configuração dos modelos de simulação pode ser seguido para a validação dos procedimentos dos testes de produção ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
6	As ferramentas utilizadas na empresa são suficientes para a validação dos testes de produção pelos MBD e MBT ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
7	Por meio da utilização dos modelos de simulação é possível agilizar também o processo de desenvolvimento dos procedimentos de teste eletro-eletrônicos?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
8	Os aplicativos de testes utilizados para validação dos procedimentos de teste da produção por meio de modelos são eficientes no processo ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
9	É possível utilizar modelos de simulação com diferentes "representatividades" ou diferentes "níveis de fidelidade" de acordo com a sua necessidade ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
10	Modelos de alta fidelidade possibilitam o desenvolvimento de aplicações em HIL(Hardware-In-The-Loop) para integração nos RIG's, IRON BIRDS e Testes de produção ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca

Quadro 10 - – Formulário com as perguntas de 11 a 23 da pesquisa Delphi

11	Os modelos de sistemas podem ser utilizados para antecipar as campanhas de ensaios ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
12	Através de modelos de simulação é possível explorar um número maior de testes em ambientes simulados ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
13	Os procedimentos de teste validados com a utilização de modelos de simulação podem ser documentados ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
14	Os testes realizados com a utilização de modelos de simulação podem ser planejados ao longo do desenvolvimento do produto ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
15	É possível rastrear requisitos textuais nos modelos de simulação ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
16	Os modelos de simulação podem auxiliar na execução dos testes realizados na produção para facilitar troubleshooting ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
17	O modelo pode ser considerado como um requisito de sistema ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
18	Model Based Design e Model Based Testing auxilia na identificação de requisitos de testabilidade DFT (Design for Testability) para facilitar a automação dos testes de produção ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
19	Os modelos de simulação podem possibilitar a geração automática dos resultados esperados dos procedimentos de teste da produção ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
20	A utilização de Model Based Testing reduz o ciclo de desenvolvimento dos procedimentos de teste ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
21	Model Based Design e Model Based Testing são efetivos da etapa de especificação dos sistemas ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
22	Model Based Design e Model Based Testing são efetivos da etapa de desenvolvimento dos sistemas ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
23	Model Based Design e Model Based Testing são efetivos na etapa de verificação dos sistemas ?	Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca

A consolidação das respostas dos especialistas do Delphi pode ser observada na Tabela 6. Para o melhor entendimento desta tabela, deve-se levar em consideração a Tabela 4 e a Tabela 5, que representam a escala de cada questão respondida pelo especialista.

Tabela 4 - Escala de avaliação das perguntas 2 e 3 da pesquisa Delphi

De 90 a 100 % dos defeitos	De 60-80% dos defeitos	50% dos defeitos	De 10-30% dos defeitos	Até 10% dos defeitos
1	2	3	4	5

Tabela 5 - Escala de avaliação das perguntas Delphi, exceto para as perguntas 2 e 3

Sim, sempre	Em muitas ocasiões	Em algumas ocasiões	Raríssimas vezes	Nunca
1	2	3	4	5

Tabela 6 - Agrupamento das respostas das perguntas do Delphi

Questões	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21
1	1	2	2	1	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
2	2	4	2	2	2	3	2	4	4	3	2	2	2	2	4	2	4	2	3	1	3
3	4	4	3	2	2	4	3	5	4	4	4	2	3	3	4	4	4	4	4	4	3
4	2	2	1	3	1	4	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1
5	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	3	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2
7	3	2	3	2	3	2	3	1	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3
8	2	2	3	1	3	2	4	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3
9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	3	4	2	2	2	4	2	4	4	3	3	2	2	2	4	4	4	4	4	4	1
11	1	1	2	1	3	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2
12	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	2	1	2	1	3	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	3
14	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2
15	3	1	3	3	1	2	4	2	1	3	3	2	3	3	1	1	1	1	1	1	4
16	3	2	2	3	2	3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	3	3	2	3	2	3	2	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	1
18	3	3	2	3	1	2	1	3	3	3	3	1	2	2	3	3	3	3	3	3	1
19	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	2	2	2	1	1	2	3	2	2	2	2	1	3	3	2	2	2	2	2	2	3
21	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1
22	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1
23	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1

A Tabela 6 apresenta de forma compactada a consolidação das respostas dos especialistas, observa-se em suas colunas o especialista envolvido no Delphi e em suas linhas o número correspondente da questão avaliada.