



**Campus de São Carlos**

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA  
VIRTUAL NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE  
PRODUTOS

**MARIELLA CONSONI FLORENZANO  
SOUZA**

*Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto*

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS**

Mariella Consoni Florenzano Souza

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...06.../...03.../...06...

Ass...*[assinatura]*...

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA  
VIRTUAL NO PROCESSO DE  
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto



São Carlos

2005

DEDALUS - Acervo - EESC



31100053710

Class.	TESE - EESC
Cutt.	5332
Tombo	T048/06
Sysno	14963 10

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

S729a Souza, Mariella Consoni Florenzano  
Análise da utilização da manufatura virtual no  
processo de desenvolvimento de produtos / Mariella  
Consoni Florenzano Souza. -- São Carlos, 2005.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto.

1. Desenvolvimento de produtos. 2. Manufatura  
virtual. 3. Simulação. 4. Realidade virtual.  
5. Integração de dados. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheira **MARIELLA CONSONI FLORENZANO SOUZA**

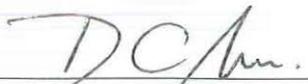
Dissertação defendida e julgada em 17-06-2005 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Titular **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

  
Prof. Dr. **DANIEL CAPALDO AMARAL**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

  
Prof. Dr. **DARIO HENRIQUE ALLIPRANDINI**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCAR)

Aprovada

  
Profª. Dra. **JANDIRA GUENKA PALMA**  
(Universidade Estadual de Londrina/UDEL)

aprovada

  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica

  
Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Ao meu marido Celso,  
com muito amor.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Arthur José Vieira Porto pelo apoio, dedicação e orientações que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Celso pela paciência, carinho e incentivo em todos os momentos.

À minha família, em especial aos meus pais José Alberto e Sonia, por toda a dedicação, amor e confiança depositada no meu trabalho.

Aos professores, colegas de pós-graduação e equipe de suporte do Laboratório de Simulação pelo compartilhamento de informações, colaboração e apoio.

À empresa do estudo de caso e aos funcionários que compartilharam seus conhecimentos e colaboraram com o desenvolvimento do trabalho.

Ao pesquisador Marco Sacco e colegas do Instituto de Tecnologia Industrial e Automação do Conselho Nacional de Pesquisa da Itália que me acolheram e possibilitaram a realização do estágio.

À FAPESP pelo apoio financeiro concedido.

## RESUMO

SOUZA, M.C.F. (2005). *Análise da utilização da manufatura virtual no processo de desenvolvimento de produtos*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

A Manufatura Virtual representa uma abordagem emergente que as empresas podem adotar para melhorar seus processos de desenvolvimento de produtos, introduzindo novos produtos no mercado mais rapidamente e a um custo apropriado. A idéia fundamental é criar um ambiente integrado e sintético, composto por um conjunto de ferramentas e sistemas de software, tais como Realidade Virtual e Simulação para apoiar esses processos. O objetivo deste trabalho é analisar a utilização da Manufatura Virtual no processo de desenvolvimento de produtos em termos de limitações existentes que podem ser superadas, proposta da Manufatura Virtual, benefícios, e desafios encontrados para sua aplicação. Para a realização da análise, foi desenvolvido um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no processo de desenvolvimento de produtos que considera: as atividades do desenvolvimento de produtos que podem ser apoiadas por sistemas de software da Manufatura Virtual; os tipos de sistemas e suas funcionalidades; e alternativas de formatos neutros para habilitar a interoperabilidade de dados. O trabalho foi desenvolvido através da realização de estudos de caso, que forneceram informações para a análise da utilização da Manufatura Virtual e para a geração do modelo proposto.

Palavras-chave: desenvolvimento de produtos; manufatura virtual; simulação; realidade virtual; integração de dados

## ABSTRACT

SOUZA, M.C.F. (2005). *Analysis of virtual manufacturing utilization in products development process*. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Virtual Manufacturing represents the emerging approach the enterprises can use to improve their processes, introducing new products more quickly in the market in a cost effective way. The fundamental idea is to create an integrated and synthetic environment, composed of software tools and systems such as Virtual Reality and Simulation to support those processes. The purpose of this work is to analyze the utilization of Virtual Manufacturing in the product development process regarding current limitations that can be overcome by Virtual Manufacturing, its proposal, benefits and challenges for its application. For the analysis accomplishment, a product development model in Virtual Manufacturing environment was developed which considers: the product development activities that can be supported by Virtual Manufacturing systems; the system types and their functionalities; and neutral formats alternatives to enable data interoperability. The research was done by the accomplishment of case studies that provided information to the impact analysis and to the model development.

Keywords: products development, virtual manufacturing, simulation, virtual reality, data integration

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de desenvolvimento da pesquisa	8
Figura 2 – Visão geral do Modelo de Referência	23
Figura 3 – Visão da Manufatura Virtual	30
Figura 4 – Os paradigmas da Manufatura Virtual	31
Figura 5 – Abordagem tradicional de PDP	33
Figura 6 – Abordagem atual de PDP	34
Figura 7 – PDP em ambiente de Manufatura Virtual	34
Figura 8 – Categorias de tecnologias da Manufatura Virtual	35
Figura 9 – Elementos básicos de uma aplicação de Realidade Virtual	42
Figura 10 – Caminhos alternativos para a estrutura tecnológica	45
Figura 11 – Transferência de dados entre dois sistemas usando formato neutro	46
Figura 12 – Metodologia para a nova abordagem de desenvolvimento de produtos	69
Figura 13 – Estrutura da aplicação de RV	73
Figura 14 – Arquitetura hardware do sistema	74
Figura 15 – Arquitetura software do ambiente	74
Figura 16 – Grupos de tarefas e sistemas da Manufatura Virtual	79
Figura 17 – Atividades do Projeto Conceitual que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual	87
Figura 18 – Modelo Proposto para o Projeto Conceitual em ambiente de Manufatura Virtual	88
Figura 19 – Plataforma móvel em terreno com obstáculos	93
Figura 20 – Atividades do Projeto Preliminar que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual	106
Figura 21 – Modelo Proposto para o Projeto Preliminar em ambiente de Manufatura Virtual	107
Figura 22 – Atividades do Projeto Detalhado que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual	128
Figura 23 – Modelo Proposto para o Projeto Detalhado em ambiente de Manufatura Virtual	130

Figura 24 – Exemplo de software de Planejamento de Processos	133
Figura 25 – Exemplo de sistema de simulação de máquina CN	138
Figura 26 – Exemplo de sistema de simulação de robô	139
Figura 27 – Exemplo de sistema de simulação de MMC	140
Figura 28 – Exemplo de sistema de simulação de operações humanas	140
Figura 29 – Atividades da Preparação da Produção que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual	151
Figura 30 – Modelo Proposto para a Preparação da Produção em ambiente de Manufatura Virtual	152
Figura 31 – Fábrica Virtual	156
Figura 32 – Visão Global do Modelo Proposto para PDP em Ambiente de Manufatura Virtual	163

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Fases do processo de desenvolvimento de produtos segundo a visão de diversos autores	19
Tabela 2 – Áreas de processo do modelo CMMI	21
Tabela 3 – Atividades que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual	78
Tabela 4 – Descrição dos sistemas da Manufatura Virtual	81
Tabela 5 – Relação das atividades do Projeto Conceitual com os sistemas da Manufatura Virtual	87
Tabela 6 – Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Conceitual	98
Tabela 7 – Relação das atividades do Projeto Preliminar com os sistemas da Manufatura Virtual	106
Tabela 8 – Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Preliminar	124
Tabela 9 – Relação das atividades do Projeto Detalhado com os sistemas da Manufatura Virtual	129
Tabela 10 – Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Detalhado	147
Tabela 11 – Relação das atividades do PDP com os sistemas da Manufatura Virtual para a Preparação da Produção	151
Tabela 12 – Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Preparação da Produção	161
Tabela 13 – Relação das Atividades do PDP com sistemas da Manufatura Virtual	162
Tabela 14 – Benefícios da Manufatura Virtual para os tipos de revisões de produtos	165
Tabela 15 – Resultados com o uso da Manufatura Virtual	167

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AP	<i>Application Protocol</i>
APQP	<i>Advanced Product and Quality Planning</i>
BOM	<i>Bill of Materials</i>
B-reps	<i>Boundary Representations</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAID	<i>Computer Aided Industrial Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i>
CFL	<i>Cubital Facet List</i>
CMM	<i>Capability Maturity Model</i>
CMMI	<i>Capability Maturity Model Integration</i>
CN	Controle numérico
CNC	Controle numérico computadorizado
CSG	<i>Constructive Solid Geometry</i>
DFA	<i>Design for Assembly</i>
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
DMU	<i>Digital Mockup</i>
DP	Desenvolvimento de Produtos
DXF	<i>Data eXchange Format</i>
EDM	<i>Engineering Data Management</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FEM	<i>Finite Element Modeling</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
MRP	<i>Material Resource Planning</i>
MMC	Máquina de Medição por Coordenada

PDM	<i>Product Data Management</i>
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PR	Prototipagem Rápida
PV	Prototipagem Virtual
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RPI	<i>Rensselaer Polytechnic Institute</i>
RV	Realidade Virtual
SDX	<i>Simulation Data eXchange</i>
STEP	<i>Standard for Exchanging of Product Data</i>
STH	<i>Surface Triangles Hinted</i>
STL	<i>Stereo Lithography</i>
UPR	<i>Universal Product Representation</i>
VRML	<i>Virtual Reality Modeling Language</i>

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto, motivação e justificativa	1
1.2. Objetivo e contribuições	6
1.3. Metodologia de desenvolvimento da pesquisa	7
1.4. Estrutura da tese	10
<b>2. O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS</b>	<b>12</b>
2.1. Caracterização do processo de desenvolvimento de produtos (PDP)	12
2.2. O desempenho do processo de desenvolvimento de produtos	14
2.3. O PDP e a abordagem da Engenharia Simultânea	16
2.4. Modelos de referência para o desenvolvimento de produtos	17
2.4.1. <i>O modelo de PDP adotado como Modelo de Referência para este trabalho</i>	22
2.5. Metodologias e ferramentas de suporte ao PDP	24
<b>3. A ABORDAGEM DA MANUFATURA VIRTUAL</b>	<b>28</b>
3.1. Definição e paradigmas da Manufatura Virtual	28
3.2. A importância da Manufatura Virtual para o PDP	32
3.3. Tecnologias que compõem o ambiente da Manufatura Virtual	35
3.4. A ênfase no uso da Simulação e Realidade Virtual	38
3.5. A questão da interoperabilidade de dados no ambiente da Manufatura Virtual	44
3.5.1. <i>Padrões de formato neutro de arquivos para a troca e compartilhamento de dados</i>	46
<b>4. APRESENTAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO</b>	<b>55</b>
4.1. Estudo de Caso 1: empresa multinacional	56
4.2. Estudo de Caso 2: instituto de pesquisa no exterior	61

<b>5. ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA VIRTUAL NO PDP E DESCRIÇÃO DO MODELO PROPOSTO</b>	<b>76</b>
<b>5.1. O processo de geração do Modelo Proposto</b>	<b>76</b>
<b>5.2. Delimitação do escopo do Modelo de Referência e identificação das atividades do PDP que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual</b>	<b>77</b>
<b>5.3. Identificação dos sistemas da Manufatura Virtual</b>	<b>79</b>
<b>5.4. Apresentação da análise da utilização da Manufatura Virtual nas etapas do PDP e do Modelo Proposto</b>	<b>82</b>
<b>5.4.1. Projeto Conceitual</b>	<b>82</b>
5.4.1.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Projeto Conceitual	83
5.4.1.2. Proposta da Manufatura Virtual para o Projeto Conceitual	85
5.4.1.3. Modelo Proposto para o Projeto Conceitual em Ambiente de Manufatura Virtual	86
5.4.1.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para o Projeto Conceitual	94
5.4.1.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Conceitual	96
5.4.1.6. Resumo da etapa Projeto Conceitual	98
<b>5.4.2. Projeto Preliminar</b>	<b>98</b>
5.4.2.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Projeto Preliminar	99
5.4.2.2. Proposta da Manufatura Virtual para o Projeto Preliminar	103
5.4.2.3. Modelo Proposto para o Projeto Preliminar em Ambiente de Manufatura Virtual	105
5.4.2.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para o Projeto Preliminar	117
5.4.2.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Preliminar	120
5.4.2.6. Resumo da etapa Projeto Preliminar	124
<b>5.4.3. Projeto Detalhado</b>	<b>124</b>
5.4.3.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Projeto Detalhado	125
5.4.3.2. Proposta da Manufatura Virtual para o Projeto Detalhado	126
5.4.3.3. Modelo Proposto para o Projeto Detalhado em Ambiente de Manufatura Virtual	128
5.4.3.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para o Projeto Detalhado	143
5.4.3.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Detalhado	145

5.4.3.6. Resumo da etapa Projeto Detalhado	147
<b>5.4.4. Preparação da Produção</b>	<b>147</b>
5.4.4.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Preparação da Produção	148
5.4.4.2. Proposta da Manufatura Virtual para a Preparação da Produção	150
5.4.4.3. Modelo Proposto para a Preparação da Produção em Ambiente de Manufatura Virtual	150
5.4.4.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para a Preparação da Produção	157
5.4.4.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual na Preparação da Produção	159
5.4.4.6. Resumo da etapa Preparação da Produção	161
<b>5.5. Visão Global do Modelo Proposto</b>	<b>161</b>
<b>5.5.1. Principais benefícios da Manufatura Virtual</b>	<b>164</b>
<b>5.5.2. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual</b>	<b>167</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b>	<b>171</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>178</b>
APÊNDICE A	188
APÊNDICE B	194

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o contexto, a motivação, a justificativa, o objetivo, a metodologia de pesquisa e a estrutura do trabalho.

### 1.1. Contexto, motivação e justificativa

O Desenvolvimento de Produtos tem se revelado um dos mais importantes processos de negócio para as empresas na busca pela vantagem competitiva, devido à crescente necessidade de se lançar produtos que satisfaçam cada vez mais rapidamente as exigências do mercado.

Além da globalização da economia e do conseqüente aumento e profissionalização da concorrência, o ambiente atual é caracterizado por processos geograficamente distribuídos, não apenas dentro de uma mesma companhia, mas também envolvendo companhias fornecedoras, clientes e parceiras. Esse novo contexto dificulta ainda mais a necessidade de reduzir o *time-to-market*, e de introduzir produtos no mercado com qualidade superior a um custo apropriado. Além disso, para muitas indústrias, como, por exemplo, as indústrias aeroespaciais, bélicas, automobilísticas, de periféricos para informática e as de telecomunicações, mais do que nunca, a rápida introdução do produto no mercado e a sua validação sem a necessidade de recorrer aos recursos de produção e protótipos físicos têm sido consideradas requisitos fundamentais para a permanência no mercado.

Nesse ambiente, as empresas se deparam com a necessidade de desenvolver capacitação para rapidamente responder às mudanças no mercado e tomar decisões corretas por meio de avaliações rápidas e eficientes. Torna-se muito importante que as decisões sejam tomadas de maneira eficaz e que sejam antecipadas para as etapas iniciais do processo de desenvolvimento, pois o custo de uma alteração realizada no projeto do produto, decorrente de problemas não previstos no início do desenvolvimento, aumenta à medida que se avança pelas etapas desse processo

(idealização, projeto, protótipo, produção e lançamento). Fornecer ao projetista do produto *feedback* da produção, qualidade e testes o quanto antes, se possível na fase de definição do conceito, pode gerar ótimos resultados quanto à manutenção da integridade da família do produto e continuidade da infra-estrutura, melhorando o projeto e investimentos em manufatura (TSENG et al., 1998).

Dessa forma, dominar eficientemente o processo de desenvolvimento de produtos (PDP) tem se revelado uma tarefa crítica para a competitividade das empresas e tem conduzido à busca por soluções e metodologias de aperfeiçoamento e otimização dos processos. Diversos autores tais como Clark e Fujimoto (1991), Barclay (1992), Toledo (1993), Clausing (1994), Kume (1995), Cusumano e Nobeoka (1998), Thomke e Fujimoto (2000), Lau et al. (2003), Mervyn et al. (2004), Uhlmann e Schaper (2004) mostram em seus estudos que as empresas, cada vez mais, buscam técnicas e maneiras de aperfeiçoar o seu processo de desenvolvimento de produtos com o objetivo de alcançar um melhor desempenho e, assim, satisfazer essas exigências.

O emprego de modelos digitais, ferramentas de software e tecnologias de simulação é um dos caminhos que as empresas têm adotado para alcançar um melhor desempenho no processo de desenvolvimento, visando reduzir o tempo e custo de desenvolvimento e aumentar a qualidade do produto que está sendo desenvolvido. Segundo Uhlmann e Schaper (2004), o tempo de desenvolvimento de novos produtos pode ser significativamente reduzido se o produto e os processos de manufatura forem representados de modo mais realista, por exemplo, com a ajuda de modelos e simulações, sem a necessidade de protótipos físicos. Gallizio e Sembenini (2002), argumentam que os últimos anos têm presenciado uma proliferação de novas e revisadas ferramentas que podem ser usadas no suporte às atividades de projeto. Segundo os autores, um método avançado de projeto deve incorporar diversas dessas ferramentas e obter o máximo em termos de desempenho e qualidade de projeto. Segundo Rozenfeld et al. (2000) uma das tendências atuais é integrar técnicas, métodos, ferramentas e sistemas empregados no desenvolvimento de produtos e customizá-los à realidade da empresa, intensificando o uso integrado de sistemas de engenharia, de realidade virtual e de técnicas de prototipagem.

Dentro dessa tendência, uma das mais recentes e interessantes soluções para suprir as necessidades atuais é a Manufatura Virtual, que propõe a criação de um ambiente sintético e integrado, composto por diversos sistemas e ferramentas de software tais como simulação e realidade virtual. A idéia fundamental é fornecer uma

estratégia para integrar todos os processos, da engenharia à manufatura, visando melhorar todos os níveis de decisão e controle, possibilitando que atividades de desenvolvimento, validação e manufatura do produto sejam realizadas virtualmente antes de serem realizadas no mundo real, independentemente do grau de complexidade da forma e da estrutura de um produto.

O termo Manufatura Virtual passou a ser utilizado no início dos anos 90, como resultado da iniciativa do Departamento de Defesa dos EUA, pois a evolução do ambiente de defesa e as estratégias de aquisição passaram a exigir o desenvolvimento da capacidade de confirmar antecipadamente a manufaturabilidade e a possibilidade de novos sistemas bélicos antes de comprometer recursos de produção. Até metade dessa década, alguns trabalhos pioneiros nesse campo foram realizados nas organizações, principalmente na empresa aeroespacial e na indústria automobilística, além de ser abordado como tema em alguns grupos de pesquisa acadêmica (BANERJEE; ZETU, 2001). Exemplos de aplicações da Manufatura Virtual são apresentados por alguns autores. Um sistema de usinagem e inspeção virtuais foi proposto por Cheung e Lee (2001) com o objetivo de criar um ambiente de Manufatura Virtual representando eletronicamente atividades de projeto ótico, prototipagem, usinagem de ultraprecisão e inspeção. Na Universidade de Bath, a Manufatura Virtual tem como principal papel a aplicação da Realidade Virtual no projeto e manufatura de um produto através da geração gráfica e animação computacional dos processos de manufatura e montagem (BOWYER et al., 1996). Owen (1994) apresentou um ambiente virtual tridimensional para o projeto, avaliação e teste de um sistema robótico de produção, implementado na John Deere Company.

Um dos resultados da Manufatura Virtual é a criação de protótipos virtuais que podem ser manipulados em tempo real, fornecendo capacidade para realizar diversas verificações antes da construção de protótipos físicos. A realização de simulações dos processos de manufatura e montagem deve também ser citada como resultado desse novo ambiente, expandindo o espaço de soluções, pois um maior número de alternativas podem ser testadas rapidamente e pode-se verificar se os planos podem realmente produzir o produto conforme especificado.

Nesse ambiente, torna-se possível também simular os sistemas produtivos para analisar rapidamente o desempenho de uma fábrica, prever os resultados de mudanças no processo antes que a implementação real ocorra no chão-de-fábrica, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento. Além disso, fornece modelos precisos e eficientes para

avaliar e controlar a fábrica e, após o lançamento do produto, o mesmo sistema pode ser uma boa ferramenta de comunicação e treinamento.

O conceito de Manufatura Virtual tem se desenvolvido em escopo, ganhado maior importância e aceitação internacional. Esse interesse por parte do mercado mundial por essa nova proposta pode ser atribuído principalmente às melhorias no desempenho das tecnologias requeridas de hardware e software, cujos respectivos custos estão se tornando mais acessíveis, e aos avanços das tecnologias de modelagem e simulação de sistemas de alta complexidade topológica e funcional.

As principais companhias automobilísticas acreditam que a Manufatura Virtual é o melhor caminho para tratar do grande volume de trabalho envolvido na validação de um produto e dos processos de manufatura associados. Espera-se que 60% das mudanças no projeto relacionadas ao desenvolvimento de veículos possam ser eliminadas simulando os processos, ferramentas, robôs, tarefas operacionais, fábricas e fluxo de materiais. Algumas das empresas que vêm usando a Manufatura Virtual são: a Boeing que desenvolveu seu modelo 777 de forma totalmente virtual; a Chrysler que produziu três veículos recentemente usando a Manufatura Virtual; e a John Deere que tem usado também esse novo ambiente no desenvolvimento de seus produtos (WAVE REPORT, 2002). A Volkswagen na Alemanha anunciou uma revolução no desenvolvimento de veículos com a introdução de novas tecnologias de realidade virtual, inéditas na indústria automotiva, que permitirão à empresa a redução de 30% no custo de desenvolvimento, além do ganho de tempo e de eficiência no processo (USINAGEM BRASIL, 2004).

Os diversos exemplos de aplicação da Manufatura Virtual mostram que ela vem sendo empregada principalmente por grandes empresas internacionais. Apesar de todo o sucesso e promessas associadas à Manufatura Virtual, permanece obscura a forma como as pequenas e médias empresas devem implementar esse ambiente. Mesmo se as questões relacionadas ao investimento necessário forem resolvidas, uma estratégia clara para a adoção da Manufatura Virtual é necessária (OFFODILE; ABDEL-MALEK, 2002). Além disso, segundo Bullinger et al. (2000), apesar de tecnologias como CAD, CAM, Realidade Virtual, Prototipagem Virtual, Simulação serem, nos últimos tempos, enfatizadas pelo meio científico e industrial, o entendimento de como essas novas tecnologias podem ser integradas em uma contínua cadeia de processo tem sido negligenciado.

No caso do Brasil, a Manufatura Virtual ainda é pouco conhecida. O que se tem, na maioria dos casos, é a utilização de algumas tecnologias e ferramentas individualmente e específicas para certas aplicações. No levantamento realizado não foi verificado o uso do ambiente integrado e completo proposto pela Manufatura Virtual. A Embraer pode ser citada como um exemplo de empresa nacional que está caminhando nesta direção. A empresa instalou no ano de 2000 um centro de realidade virtual com o principal objetivo de prover uma ferramenta de integração dos times de desenvolvimento e dos parceiros, possibilitando alcançar uma melhor compreensão do sistema projetado, por meio de simulações e do *mockup* digital, que substitui o protótipo de madeira (REVISTA QUALIDADE EMPRESARIAL, 2001).

Quanto à bibliografia consultada, muitos autores propõem a aplicação da Manufatura Virtual focada em alguma atividade específica do PDP e não no processo como um todo. Não foi encontrado um modelo formalizado para orientar a aplicação da Manufatura Virtual em todas as etapas do PDP. O trabalho de Murphy e Perera (2001) apresenta um modelo para aplicar diferentes tipos de simulações no PDP de uma indústria aeronáutica. Esse trabalho se aproxima do ambiente proposto pela Manufatura Virtual, porém não inclui o uso de outras tecnologias como, por exemplo, os sistemas CAPP, CAM e realidade virtual.

Vale ressaltar que alcançar a abordagem da Manufatura Virtual significa desenvolver um ambiente integrado de soluções que possa apoiar as etapas do processo de desenvolvimento de produtos visando a realização de modelagem, simulação, análises e comunicação. De acordo com Lin et al. (1995), a Manufatura Virtual não é uma única solução ou uma abordagem monolítica de base de dados. É uma coleção de várias e pequenas ferramentas implementáveis de forma incremental. A integração oferece o potencial para aumentar a efetividade do uso dessas ferramentas e levar ao ambiente completamente digital.

A meta da Manufatura Virtual é, portanto, avaliar e selecionar as melhores soluções de software e, então, projetar, desenvolver, validar e implementar interfaces entre elas, analisando mecanismos para a integração de dados. Segundo Ravelli (2003), pelo fato de cada software ter características específicas, pode-se utilizar uma enorme variedade de sistemas e ferramentas de simulação. Contudo, existe uma questão relacionada à falta de integração dos softwares de modelagem, planejamento do processo e simulação que dificulta a colaboração desde a fase inicial do conceito do

produto até a sua introdução no chão-de-fábrica, dentro do ambiente proposto pela Manufatura Virtual.

Dentro deste contexto, observou-se a necessidade de compreender como a Manufatura Virtual pode ser utilizada em todas as etapas do PDP e a necessidade de se configurar um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP e a troca de informações entre os sistemas.

## **1.2. Objetivo e contribuições**

O objetivo deste trabalho é analisar a utilização da Manufatura Virtual no Processo de Desenvolvimento de Produtos. Esta análise será realizada em termos de limitações de PDPs tradicionais que possam ser superadas pela Manufatura Virtual, proposta da Manufatura Virtual e requisitos necessários, benefícios alcançados, e desafios e dificuldades para a sua aplicação.

Para se alcançar o objetivo propõe-se:

- Estudar o PDP e identificar um Modelo de Referência;
- Estudar os conceitos da Manufatura Virtual e tecnologias envolvidas;
- Analisar casos reais de aplicação da Manufatura Virtual;
- Desenvolver um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP, denominado Modelo Proposto, gerado a partir do Modelo de Referência e com base na bibliografia e nos estudos de caso;
- Analisar a utilização da Manufatura Virtual no PDP utilizando o Modelo Proposto como uma base para a discussão.

Essa tese possui um caráter multidisciplinar e aborda temas bastante abrangentes: o PDP, que é um processo já naturalmente complexo, e a Manufatura Virtual, que é um tema relativamente novo e envolve conhecimentos diversos (engenharia e computação, por exemplo) e uma série de ferramentas e tecnologias. Dessa forma, através deste trabalho pretende-se contribuir para o incremento do conhecimento nesta área com:

- a discussão das questões envolvidas na utilização da Manufatura Virtual no PDP, explicitando a sua aplicação em cada etapa do PDP, tomando

como base a bibliografia e os diferentes casos reais de implementação deste ambiente;

- a proposição de um modelo que oriente a aplicação da Manufatura Virtual e que apresente: como cada uma das etapas e atividades do PDP pode ser realizada em um ambiente de Manufatura Virtual; os sistemas de software disponíveis atualmente no mercado que podem ser utilizados e suas funcionalidades; a configuração destes sistemas em fluxo de trabalho; e as alternativas de uso de formatos neutros para o compartilhamento e troca de dados.

### **1.3. Metodologia de desenvolvimento da pesquisa**

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se um método qualitativo de pesquisa exploratória, através da realização de revisão bibliográfica e estudos de caso para explicar, descrever, avaliar, explorar situações e analisar a utilização da Manufatura Virtual através do desenvolvimento de um modelo que oriente a sua aplicação no PDP. A pesquisa é classificada como qualitativa, pois o foco está no entendimento de um determinado fenômeno, produto da interpretação e dos significados a ele atribuídos pelo pesquisador, e não na frequência em que ocorre este fenômeno. De acordo com Richardson (1985), os métodos qualitativos devem ser empregados em situações que requerem maior riqueza de detalhes do que a informação quantitativa é capaz de fornecer.

O estudo de caso caracteriza-se por apresentar um maior foco na compreensão dos fatos do que na sua mensuração. Além disso, pretende-se investigar um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto real para complementar a revisão bibliográfica. A realização do estudo de caso para a coleta de dados teve como objetivo principal conhecer uma determinada realidade, ou seja, verificar em casos reais como a Manufatura Virtual é aplicada, teorizar posteriormente essa realidade e obter elementos e dados para se propor o modelo e analisar a utilização.

Para a coleta de dados, dois estudos de caso foram realizados: o primeiro, em uma empresa multinacional e o segundo, em um instituto de pesquisa no exterior. Os seguintes instrumentos de pesquisa foram utilizados: análise e estudo de documentos e relatórios existentes, entrevistas e discussão com pessoas envolvidas nos projetos e observação direta dos fatos.

Para o desenvolvimento da pesquisa, as seguintes fases foram adotadas (Figura 1):

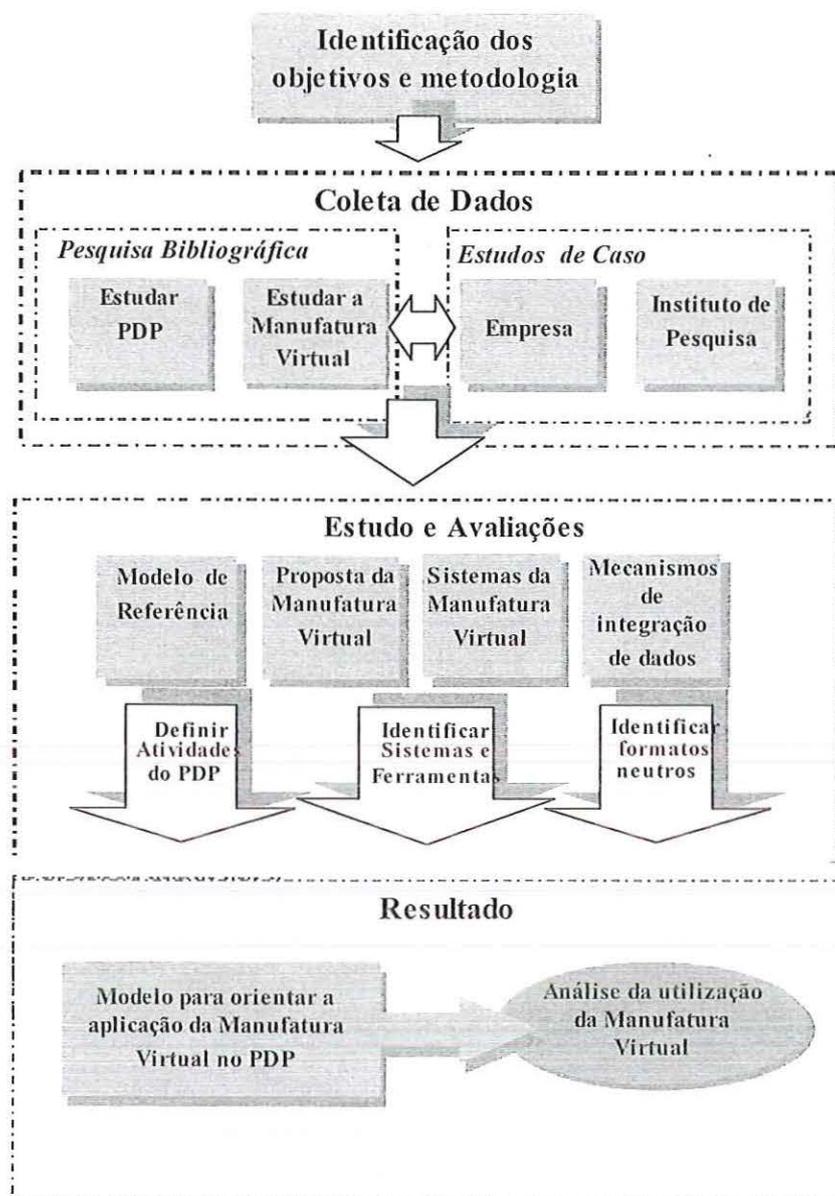


Figura 1 – Metodologia de desenvolvimento da pesquisa

#### *Identificação dos objetivos e metodologia de pesquisa*

Nesta fase, o objetivo, o método de pesquisa e as fases de desenvolvimento do trabalho são definidos.

#### *Pesquisa Bibliográfica*

A pesquisa foi realizada ao longo de todo o trabalho e envolveu, principalmente, o estudo de dois temas: Processo de Desenvolvimento de Produtos (definições,

desempenho, modelos de referência, ferramentas de suporte) e Manufatura Virtual (definições, paradigmas, tecnologias envolvidas, mecanismos de integração de dados).

### *Estudos de Caso*

Para a pesquisa de campo foram realizados dois estudos de caso. O primeiro, com duração de um ano, foi realizado em uma empresa multinacional visando acompanhar o início do programa de implementação da Manufatura Virtual na corporação. A pesquisa de campo foi complementada com a realização de um doutorado sanduíche de seis meses em um instituto de pesquisa no exterior (ITIA – CNR) para acompanhar projetos de desenvolvimento de ambientes virtuais. Através da imersão em casos reais de aplicação de ambientes de Manufatura Virtual, pôde-se caracterizar e avaliar várias questões envolvidas em sua implementação, complementando a revisão bibliográfica e contribuindo com o desenvolvimento da pesquisa.

### *Estudo e Avaliações*

Primeiramente, esta fase da pesquisa teve como objetivo analisar todas as informações obtidas através da pesquisa bibliográfica e dos estudos de caso. Em seguida consistiu em:

#### *a) Adotar um Modelo de Referência para o PDP*

Modelos de referência podem ser usados tanto na formação de estudantes ou na atualização de profissionais quanto como modelo ideal para a implementação de melhorias no processo de desenvolvimento das empresas. Nesse trabalho, um Modelo de Referência para o PDP, que será apresentado no capítulo 2, foi adotado como base para a geração do Modelo Proposto para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP.

#### *b) Identificar as atividades do processo de desenvolvimento de produtos que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual*

Identificado o Modelo de Referência, foi realizada uma análise das atividades que o compõem, com o objetivo de identificar aquelas que podem ser apoiadas e associadas com o uso de sistemas propostos dentro do contexto da Manufatura Virtual.

#### *c) Identificar os sistemas da Manufatura Virtual*

Através da pesquisa bibliográfica, dos estudos de caso realizados (usuários de softwares), e de pesquisa em empresas vendedoras de softwares, os principais sistemas foram identificados, tendo como foco o suporte a todo o processo de desenvolvimento. Juntamente com a identificação dos sistemas, foram definidas também as suas principais funcionalidades e informações de entrada e saída.

*d) Analisar os padrões disponíveis de formato neutro para alcançar a interoperabilidade de dados no ambiente proposto.*

Alguns formatos neutros serão apresentados no capítulo 3 e selecionados para possibilitar a troca de dados no ambiente da Manufatura Virtual.

#### ***Apresentação e Discussão dos Resultados***

Nesta fase, todos os resultados das fases anteriores são utilizados para a geração do Modelo Proposto para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP. Através deste modelo, será apresentada a análise da utilização da Manufatura Virtual em cada uma das etapas do PDP, bem como uma visão global da sua aplicação, abrangendo o PDP como um todo.

#### **1.4. Estrutura da tese**

A tese está estruturada em seis capítulos. O capítulo 1 é a introdução do trabalho. O capítulo 2 apresenta uma caracterização do Processo de Desenvolvimento de Produtos, dos parâmetros que afetam o seu desempenho, uma comparação entre a abordagem tradicional e a Engenharia Simultânea, modelos de referência e as metodologias e ferramentas de suporte. No capítulo 3, as definições e paradigmas da Manufatura Virtual são apresentados. O capítulo prossegue discutindo a importância da Manufatura Virtual para o processo de desenvolvimento, apresenta as tecnologias que compõem o ambiente de Manufatura Virtual e enfatiza o uso da simulação e da realidade virtual. Por fim, aborda a questão da interoperabilidade de dados e apresenta formatos neutros para promover a troca e compartilhamento de dados no ambiente de Manufatura Virtual.

O capítulo 4 apresenta os estudos de caso realizados, verificando a aplicação da Manufatura Virtual em casos reais. No capítulo 5, a análise da utilização da Manufatura Virtual no processo de desenvolvimento e a descrição do Modelo Proposto para aplicar

a Manufatura Virtual são apresentadas. Para tanto, o capítulo apresenta primeiramente: (a) o processo de geração do Modelo Proposto; (b) o escopo e as atividades do Modelo de Referência adotado para o processo de desenvolvimento de produtos; (c) e os sistemas da Manufatura Virtual. Em seguida, o capítulo apresenta a análise da utilização da Manufatura Virtual para cada uma das etapas do processo de desenvolvimento tomando como base para essa discussão o Modelo Proposto e finaliza fornecendo uma visão global da utilização da Manufatura Virtual considerando o PDP como um todo. Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais, conclusões e propõe recomendações para trabalhos futuros.

## 2. O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

O sucesso de uma empresa no mercado depende principalmente da sua habilidade em identificar as necessidades dos clientes e rapidamente introduzir produtos que satisfaçam estas necessidades e que possam ser produzidos com uma qualidade superior e a um custo apropriado. Alcançar essas metas não é apenas um problema do marketing, da engenharia ou da manufatura. É uma questão que deve ser tratada no processo de desenvolvimento de produtos por todas essas áreas funcionais.

Esse capítulo está dividido em 5 itens. Inicialmente, o processo de desenvolvimento de produtos é definido e as características relevantes para este trabalho são apresentadas. No segundo item, discute-se os parâmetros que refletem o desempenho do processo de desenvolvimento de uma empresa. O capítulo prossegue apresentando uma comparação entre a abordagem tradicional de desenvolvimento de produtos e a Engenharia Simultânea. A seguir, apresenta-se modelos de referência para o desenvolvimento de produtos. E, por fim, o capítulo apresenta as metodologias e ferramentas que podem ser utilizadas para suporte.

### 2.1. Caracterização do processo de desenvolvimento de produtos (PDP)

Do ponto de vista interno, as empresas podem ser visualizadas como um conjunto de processos de negócios (*Business Process*). Esses processos, por sua vez, consistem na realização de diferentes atividades, na geração e manipulação de informações, no processamento de materiais, na configuração organizacional, e na definição de recursos, ferramentas, equipamentos, sistemas, métodos e pessoas.

Essa visão da empresa como um conjunto de processos de negócios, e não como um conjunto de departamentos funcionais, fornece a possibilidade de se alcançar uma imagem única da empresa e de todos os elementos - estratégia, organização, recursos e atividades - que a compõem (ROZENFELD, 1999).

Nos últimos anos as empresas têm se empenhado em melhorar o desempenho de diversos processos que compõem o seu negócio, sendo um deles o Processo de Desenvolvimento de Produtos. De acordo com Clark e Fujimoto (1991), o Desenvolvimento de Produtos pode ser definido como uma seqüência interligada de tarefas de processamento de informações, através da qual a empresa transforma as informações de oportunidades de mercado e de possibilidades tecnológicas em dados e informações para a fabricação de um produto comercial. Esta perspectiva do desenvolvimento de produtos como um sistema de informações se estende além do projeto de engenharia, incluindo considerações de todo o ciclo de vida de um produto, e englobando a produção, marketing, serviços pós-venda e o comportamento do consumidor.

Desenvolver um produto envolve um elevado grau de incerteza, um grande número de decisões a serem tomadas e depende de habilidades e conhecimentos de diferentes áreas funcionais, de possibilidades tecnológicas e da capacidade da produção. O seu gerenciamento se torna ainda mais problemático devido à natureza dinâmica da resolução de problemas envolvida em diversas atividades do PDP, à grande interação com as demais atividades da empresa e à grande quantidade de informações geradas e manipuladas durante esse processo. A natureza dinâmica diz respeito principalmente ao ciclo interativo de projetar-construir-testar presente em diversas atividades do PDP, envolvendo constantes identificações e resoluções de problemas no projeto (CLARK; FUJIMOTO, 1991; CLARK; WHEELWRIGHT, 1993).

Diversos autores na área de inovação e gerenciamento do desenvolvimento de produtos vêm a solução de problemas como uma atividade fundamental do processo de desenvolvimento (SENGE, 1996; CLARK; FUJIMOTO, 1989; THOMKE, 1998; VERGANTI, 1997; CLARK; WHEELWRIGHT, 1993; THOMKE; FUJIMOTO, 2000). Segundo Thomke e Fujimoto (2000), a solução de problemas pode ser definida como um processo interativo, direcionado pela realização de experimentos de tentativa e erro, que são guiados pelo conhecimento dos relacionamentos de causa e efeito.

Esses ciclos podem ser pequenos, envolvendo apenas um único projetista como, por exemplo, experimentos individuais de simulação ou podem ser grandes envolvendo grupos de pessoas de desenvolvimento como os ciclos de prototipagem. A medida em que o projeto progride, os ciclos tendem a incluir modelos mais completos e com maior fidelidade para testar efeitos que decisões tomadas podem ter na funcionalidade, encaixe de geometria e manufaturabilidade do produto.

Além destes fatores, algumas tendências atuais acentuam ainda mais a complexidade deste processo. Rozenfeld et al. (2000), considerando algumas destas tendências, fazem algumas recomendações para melhor estruturar o PDP e, assim, lidar com as mudanças que influenciam esse processo. As recomendações são:

- definição dos limites entre o desenvolvimento de tecnologia e o desenvolvimento de produtos;
- utilização de conceitos de plataformas, projetos derivados, reuso de informações e gestão de portfólios;
- formalização do processo de desenvolvimento de produtos em modelos de referência;
- adoção da estrutura organizacional matricial para o PDP e programas de educação e capacitação para incentivar a aprendizagem organizacional;
- utilização de padrões mundiais de formatos neutros de dados como, por exemplo, o STEP (*Standard for Exchanging of Product Data*) para promover a troca de dados entre os diferentes sistemas;
- integração e customização de técnicas, métodos, ferramentas e sistemas utilizados no PDP, destacando o uso integrado de sistemas de engenharia, realidade virtual e técnicas de prototipagem;
- integração de sistemas para o desenvolvimento de produtos empregando objetos distribuídos.

Dessa forma, obter um desempenho superior no desenvolvimento de produtos envolve utilizar, de forma estruturada, competências e capacidades presentes em diferentes áreas funcionais, envolvendo várias noções gerenciais e o uso de uma visão sistêmica e integrada dos negócios da empresa (CLARK; WHEELWRIGHT, 1993).

## **2.2. O desempenho do processo de desenvolvimento de produtos**

De acordo com Clark e Fujimoto (1991), o desempenho do processo de desenvolvimento geralmente pode ser avaliado por três parâmetros – qualidade, tempo e produtividade – que devem ser otimizados para capacitar uma empresa na sua habilidade em atrair e satisfazer seus clientes, aumentando a competitividade do seu produto.

A *qualidade total do produto* refere-se ao grau com que o produto desenvolvido satisfaz as expectativas dos consumidores. A qualidade do produto é afetada tanto por

atributos técnicos do produto quanto por avaliações subjetivas da sua estética, estilo e experiência do cliente ao usá-lo. O desenvolvimento de produtos afeta a qualidade em dois níveis distintos: no nível de projeto (qualidade do projeto) e no nível da capacidade da empresa produzir o produto projetado (qualidade de conformação).

O *tempo de desenvolvimento* é uma medida da rapidez com que a empresa se move do desenvolvimento do conceito para a introdução do produto no mercado, ou seja, refere-se ao tempo necessário para definir, projetar, e introduzir o produto no mercado. Essa dimensão afeta tanto a execução do projeto quanto a aceitação do produto no mercado. O tempo tem se revelado uma variável de grande importância para a capacidade competitiva da empresa, exercendo um efeito impulsionador no desempenho global do PDP.

Segundo Clark e Fujimoto (1991), a única maneira de reduzir o prazo de desenvolvimento, sem adicionar pessoas no processo ou diminuir a qualidade do produto, se dá pela mudança da estrutura básica do desenvolvimento, através da introdução da solução conjunta e integrada de problemas, simplificando o processo de engenharia e melhorando a administração de protótipos.

A *produtividade* refere-se ao nível de recursos necessários para desenvolver o projeto do conceito à introdução no mercado. Recursos incluem horas trabalhadas (horas de engenharia), materiais empregados para a construção de protótipos e equipamentos e serviços usados pela empresa. A produtividade possui um efeito direto no custo unitário de produção e no número de projetos que a empresa pode completar com um certo nível de recursos.

Os três parâmetros descritos desempenham um papel particular no melhoramento global do desempenho e competitividade do desenvolvimento de produtos. Diversas abordagens têm sido adotadas pelas empresas para se alcançar um melhor desempenho tais como a sobreposição de atividades (BROWN; EISENHARDT, 1995; CLARK; FUJIMOTO, 1989; KRISHNAN et al., 1997), a formação de times multifuncionais e trabalho de pré-desenvolvimento (CLARK; FUJIMOTO, 1991), a utilização de plataformas de produtos (CLARK; FUJIMOTO, 1991; CUSUMANO; NOBEOKA, 1998), a resolução de problemas antecipadamente – “*front-load*” - (THOMKE; FUJIMOTO, 2000), o processo de desenvolvimento rápido alcançado principalmente combinando tecnologias inovadoras de prototipagem bem como ferramentas modernas CSCW (*Computer Supported Cooperative Work*) (BULLINGER et al., 2000).

### 2.3. O PDP e a abordagem da Engenharia Simultânea

Tradicionalmente, o desenvolvimento de produtos é realizado por uma seqüência ordenada de etapas e atividades, desempenhadas por diferentes áreas funcionais da empresa. Nessa abordagem, uma etapa só é iniciada quando a etapa anterior tiver sido concluída e aprovada.

De acordo com Gupta et al. (1995), todo o processo, desde a definição do conceito, engenharia detalhada, projeto do processo até chegar em um produto final a ser manufaturado, tem sido caracterizado por diversas interações entre pessoal de marketing, engenheiros de produto e engenheiros de manufatura. O marketing determina as especificações do novo produto, o preço alvo e as metas de desempenho desejadas pelos consumidores. A engenharia de produto recebe as especificações e determina os requisitos técnicos e a documentação do produto. Depois de concluída a engenharia de produto, ocorre o primeiro contato da engenharia de manufatura com o novo produto. Se o pessoal de manufatura identifica problemas relacionados com a manufatura do produto proposto eles avisam os engenheiros de produto e o projeto retorna à sua fase inicial.

Essa abordagem de desenvolvimento seqüencial apresenta algumas desvantagens como: a dificuldade de integração entre os departamentos funcionais, pois estes se preocupam com as suas atividades específicas; a dificuldade de envolvimento de engenheiros de manufatura no início do PDP, resultando em uma alta probabilidade da necessidade de mudanças e modificações no projeto durante as etapas finais do PDP; a pouca flexibilidade e rapidez na realização de mudanças de projeto, aumentando custos e gerando atrasos devido à re-trabalho e reajuste; e a falta de uma visão ampla e integrada do PDP. Além disso, segundo Scheer (1998 apud ZANCUL, 2000) as diferentes visões dos departamentos funcionais envolvidos possuem como consequência o emprego de base de dados, sistemas e plataformas de hardware independentes.

De acordo com Chang et al. (1999) e Zha et al. (1999), no mercado atual não existe mais espaço para as comunicações “por cima do muro” entre o marketing, engenharia do produto e engenharia de manufatura, pois o processo de desenvolvimento de produtos realizado de forma seqüencial resulta em um prolongado tempo de desenvolvimento e em um elevado custo do produto, resultando, conseqüentemente em um desempenho inferior.

Em resposta a estas limitações da abordagem tradicional de PDP surge, no final da década de 80, a abordagem da Engenharia Simultânea, proposta como uma forma de melhorar o desempenho do PDP, reduzindo o tempo de desenvolvimento de produtos através da condução simultânea das atividades do PDP. Segundo Winner et al. (1988 apud CARTER; BAKER, 1992, p.2), a Engenharia Simultânea pode ser definida como “uma abordagem sistemática para o projeto simultâneo e integrado de produtos e seus processos relacionados, incluindo manufatura e suporte”. Porém, segundo Zancul (2000), definições mais abrangentes da Engenharia Simultânea consideram, além da simultaneidade das atividades, aspectos como a cooperação e o consenso entre as pessoas envolvidas e a utilização de metodologias de suporte.

Autores como Carter e Baker (1992), Clausing (1994), Prasad (1997), apresentam os seguintes princípios fundamentais envolvidos na abordagem da Engenharia Simultânea: (a) trabalho mais intenso durante a definição do produto nas etapas iniciais do PDP; (b) uso de técnicas, métodos e ferramentas de suporte; (c) aumento do paralelismo das atividades; (d) maior interação entre as áreas funcionais através do trabalho em equipe, comunicação e acesso às informações; (e) maior coordenação e confiança entre as pessoas e compartilhamento de objetivos.

Entre os benefícios associados à abordagem da Engenharia Simultânea pode-se destacar a redução do ciclo de desenvolvimento por meio do paralelismo das atividades, o aumento da qualidade por meio do foco nos requisitos dos clientes e do uso de ferramenta de suporte (por exemplo, QFD e FMEA), e a diminuição do custo final do produto através da tomada de decisões adequadas nas etapas iniciais do PDP e da redução do número de modificações (ZANCUL, 2000).

#### **2.4. Modelos de referência para o desenvolvimento de produtos**

Segundo Romano (2003), a implementação de melhorias no processo de desenvolvimento de produtos nem sempre é uma tarefa fácil, principalmente quando os processos praticados nas empresas são informais. Nesses casos, é comum a coexistência de diferentes entendimentos sobre como o processo de desenvolvimento ocorre, dificultando a adoção de novas práticas, sobretudo quanto à integração dos princípios da engenharia simultânea.

Para superar essa dificuldade, o processo de desenvolvimento de produtos pode ser representado simbolicamente e formalmente através de um modelo de referência, que

descreve as etapas e atividades, os recursos disponíveis e as informações necessárias ao processo.

Um modelo de referência pode ser usado como base para o desenvolvimento ou avaliação de modelos particulares, para auxiliar no gerenciamento do processo, facilitando o entendimento e o compartilhamento de uma visão única do processo entre as pessoas envolvidas no desenvolvimento, e para facilitar a implantação e integração de métodos, ferramentas e sistemas de suporte ao PDP (ROZENFELD et al., 2000; VERNADAT, 1996).

Segundo Romano (2003), a modelagem do PDP pode contribuir para a adoção de melhorias e novas práticas no PDP, pois permite a caracterização, num primeiro momento, de como se encontra o processo na empresa, ou seja, da situação inicial visando definir como o processo é realizado e, num momento posterior, a definição de como o processo pode ser realizado de forma mais adequada. Além disso, a modelagem permite a formalização do processo e estabelece a base para a aquisição de conhecimentos e para a tomada de decisões no que se refere à melhoria contínua do processo.

Muitas empresas atualmente utilizam um modelo de referência para o desenvolvimento de seus produtos, contendo etapas e atividades bem definidas, como por exemplo, a indústria automotiva que usa o APQP (*Advanced Planning of Quality Product*, 1994). No APQP, a estrutura do PDP é composta pelas seguintes etapas: Planejamento; Desenvolvimento e Projeto do Produto; Desenvolvimento e Projeto do Processo; Validação do Produto e do Processo; e *Feedback*, Avaliação e Ação Corretiva.

Diversos autores propõem uma estrutura formal de etapas e atividades para o processo de desenvolvimento. A tabela 1 apresenta a proposta de alguns destes autores, sendo que as etapas estão agrupadas em duas macro-etapas: a primeira onde são gerados os projetos do produto e do processo de manufatura e a segunda onde os projetos desenvolvidos passam para a etapa de produção.

Deve-se ressaltar que as etapas e atividades do processo de desenvolvimento podem receber diferentes denominações de um autor para outro ou ainda de uma empresa para outra, e o grau de simultaneidade de realização das atividades pode também ser diferente; mas basicamente o desenvolvimento de um novo produto engloba as mesmas atividades, podendo ser realizadas dentro ou fora da empresa.

Tabela 1 - Fases do processo de desenvolvimento de produtos segundo a visão de diversos autores

Autores	Fases						
	Elaboração do projeto				Implementação		
	1	2	3	4	5	6	7
Baxter (1998)	Especificação do projeto	Projeto conceitual	Projeto de configuração	Projeto detalhado	Projeto para fabricação		
Magrab (1997)	Definição do produto	Geração de projetos viáveis	Avaliação dos projetos	Projeto do produto e do processo	Manufatura e montagem		
Pahl e Beitz (1996)	Clarificação da tarefa	Projeto conceitual	Projeto preliminar	Projeto detalhado			
Hubka e Eder (1996)	Definição do problema	Projeto conceitual	Projeto preliminar	Detalhamento	Protótipo e testes		
Ulrich e Eppinger (1995)	Desenvolvimento do conceito		Projeto em nível de sistema	Projeto detalhado	Teste e refinamento	Produção e lançamento	
Schulman (1995)	Estudos preliminares	Criação	Execução de modelos 3D	Realização (refinam. técnico, protótipos e custos)	Industrialização		
APQP (1994)	Planejamento	Desenvolvimento e projeto do produto Desenvolvimento e projeto do processo			Validação do produto e processo		
Ullman (1992)	Planejamento das especificações	Projeto conceitual	Projeto do produto (documentação)		Produção		
Wheelwright e Clark (1992)	Projeto do produto e projeto do processo de manufatura				Produção piloto	lançamento	
Clark e Fujimoto (1991)	Desenvolvimento do conceito		Planej. do produto	Engenharia do produto e do processo	Produção piloto		
Pugh (1991)	Especificação de projeto do produto	Projeto conceitual	Projeto detalhado		Manufatura		
Andreassen e Hein (1987)	Investigação da necessidade	Princípio do produto	Projeto do produto		Preparação da produção	Produção	
Bonsiepe (1984)	Definição do problema	Anteprojeto geração de alternativas	Projeto (avaliação, decisão e escolha)	Realização	Análise final da solução		
Back (1983)	Estudo da viabilidade		Projeto preliminar	Projeto detalhado, revisão e testes	Planejamento da produção	Planejamento de marketing	
Barroso Neto (1982)	Definição do produto	Anteprojeto geração de alternativas	Projeto	Construção de protótipos	Produção experimental		
Bonfim, Nagel e Rossi (1977)	Compreensão da necessidade	Processos de solução e análise	Desenvolvimento		Implantação		
Archer (1974)	Pesquisa preliminar	Estudos de exequibilidade	Desenv. do desenho do produto	Desenv. dos modelos	Estudos de comercialização	Desenv. da produção	Planej. da produção
Cain (1969)	Investigação	Concepção de projeto	Projeto do produto	Desenv. do produto	Testes	Documentação para produção	

Fonte: Adaptado de ROMANO (2003), p. 22

De acordo com o autor, mesmo apresentando diferenças no número de etapas presentes em cada macro-etapa, na maioria dos modelos, o principal objetivo da primeira etapa é a definição das especificações de projeto do produto. Já a segunda

etapa tem como propósito o desenvolvimento de concepções alternativas que solucionem os problemas identificados. Alguns autores (BACK, 1983; ULRICH; EPPINGER, 1995) apresentam estas duas etapas em uma única fase. A divisão em duas etapas proporciona uma maior visibilidade dos resultados ao longo do processo, facilitando a verificação do atendimento aos objetivos planejados.

A terceira e a quarta etapa, na maioria dos modelos, focam na definição do layout do produto e no seu detalhamento. A divisão dessa macro-etapa em duas fases também pode ser útil para a melhor visualização dos resultados e verificação do alcance dos objetivos.

Além destes modelos, o CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), desenvolvido pelo *Software Engineering Institute* (SEI) da Carnegie Mellon University, como uma evolução do CMM (*Capability Maturity Model*), é um modelo de referência reconhecido mundialmente que fornece à empresa uma orientação para a melhoria de processos e permite organizar processos de administração e engenharia utilizados no desenvolvimento, aquisição e manutenção de produtos ou serviços.

Desde de 1991, diversos modelos CMMs têm sido desenvolvidos para várias áreas de conhecimento ou disciplinas, incluindo engenharia de sistemas, engenharia de software, aquisição de software, gerenciamento e desenvolvimento da força de trabalho, desenvolvimento integrado do produto e do processo (SEI, 2002). Esses modelos definem as características de um processo maduro e capaz, identificando as práticas básicas e avançadas para implementar efetivamente os processos. Também atribui a estas práticas níveis de maturidade e fornece um caminho de recomendação para se alcançar níveis mais elevados de maturidade e melhorar os processos da organização.

Embora o uso destes modelos tenha se mostrado útil para as empresas, diferenças na arquitetura, conteúdo e abordagens limitam a habilidade das organizações na realização bem sucedida das melhorias necessárias. Além do mais, o uso de vários modelos que não são integrados é uma questão crítica, resultando em maiores custos principalmente para treinamento e para a realização das atividades de melhoria.

Para solucionar esses problemas, o SEI desenvolveu o CMMI, combinando três modelos fontes – SW-CMM (*Software Capability Maturity Model*), EIA/IS (*Electronic Industries Alliance Interim Standard*) e o IPDCMM (*Integrated Product Development Capability Maturity Model*) – em uma única estrutura. Os modelos CMMI fornecem uma abordagem integrada por toda a empresa para a realização de melhorias de processos, pois integra áreas de processo ao longo das disciplinas (engenharia de

sistemas, engenharia de software, aquisição de software e desenvolvimento integrado). Além disso, reduzem a redundância, a complexidade e os custos resultantes do uso de vários modelos CMMs.

Um conjunto de áreas de processos é definido (Tabela 2), aplicado a todas as disciplinas e usado como base do modelo. As áreas de processo podem ser classificadas nas seguintes categorias: Gerenciamento de Processo, Gerenciamento de Projeto, Engenharia e Suporte.

Tabela 2 - Áreas de processo do modelo CMMI

<b>Categorias</b>	<b>Áreas de Processo</b>
<b>Gerenciamento de Processo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Foco no Processo Organizacional</li> <li>- Definição do Processo Organizacional</li> <li>- Treinamento Organizacional</li> <li>- Desempenho do Processo Organizacional</li> <li>- Desenvolvimento e Inovação Organizacional</li> </ul>
<b>Gerenciamento de Projeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planejamento de Projeto</li> <li>- Monitoramento e Controle de Projeto</li> <li>- Gerenciamento de Acordos com Fornecedor</li> <li>- Gerenciamento de Projeto Integrado</li> <li>- Gerenciamento de Risco</li> <li>- Gerenciamento Quantitativo de Projeto</li> </ul>
<b>Engenharia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gerenciamento de Requisitos</li> <li>- Solução Técnica</li> <li>- Integração do Produto</li> <li>- Verificação</li> <li>- Validação</li> </ul>
<b>Suporte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gerenciamento da Configuração</li> <li>- Garantia da Qualidade do Produto e Processo</li> <li>- Medição e Análise</li> <li>- Ambiente Organizacional para Integração</li> <li>- Análise de Decisões e Resolução</li> <li>- Análise Causal e Resolução</li> </ul>

Modelos CMMI podem ser gerados na representação por estágios ou na representação contínua. Para as disciplinas selecionadas, os mesmos conceitos, áreas de processo, práticas e orientações são incluídos em cada representação. A diferença entre as representações é principalmente estrutural, com relação à forma como o conteúdo do modelo é configurado.

A representação por estágios é baseada em cinco níveis de maturidade classificados de 1 a 5: inicial, gerenciado, definido, quantitativamente gerenciado e em otimização. Esses níveis fornecem uma recomendação para abordar a melhoria de

processos em estágios. As áreas de processo são organizadas através dos níveis de maturidade. A representação por estágios foca nas melhores práticas que a organização pode usar para melhorar processos em áreas de processo que estão dentro do nível de maturidade desejado pela empresa.

Na representação contínua, as áreas de processo são agrupadas em categorias e níveis de capacidade são determinados para a melhoria de processos dentro de cada área. Este tipo de representação possui foco nas melhores práticas que a organização pode usar para aprimorar processos em áreas desejadas de processo. Em outras palavras, o foco está em desenvolver habilidade necessária para realizar, controlar e melhorar o desempenho da empresa em uma determinada área de processo. Os níveis de capacidade permitem avaliar e demonstrar o progresso da empresa à medida que melhora atividades associadas com uma área de processo. Seis níveis de capacidade podem ser utilizados: incompleto, realizado, gerenciado, definido, quantitativamente gerenciado e em otimização

Os níveis de capacidade são aplicados para o alcance de melhorias de processos para cada área de processo. Os níveis de maturidade são aplicados para avaliar a maturidade global da empresa, sendo que cada nível compreende um conjunto pré-definido de áreas de processo.

#### **2.4.1. O modelo de PDP adotado como Modelo de Referência para este trabalho**

Apesar do modelo CMMI ser reconhecido mundialmente, ele não será adotado como Modelo de Referência, pois é um modelo bastante complexo para os propósitos do trabalho e não detalha os processos em atividades e tarefas.

Neste trabalho, o Modelo de Referência adotado foi desenvolvido por pesquisadores advindos de três instituições distintas no Brasil:

- Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina;
- Grupo de Estudo e Pesquisa em Qualidade – Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos;
- Grupo de Engenharia Integrada / Núcleo de Manufatura Avançada – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Estes pesquisadores iniciaram um esforço de cooperação na área de PDP, criando uma comunidade de pesquisadores e profissionais de empresas que se

preocupam com a gestão do PDP e desenvolveram, assim, um modelo de referência (ROZENFELD et al., 2003).

Nesse modelo, o PDP é dividido em macro-etapas, etapas, atividades e tarefas. A figura 2, apresenta o modelo resumidamente (os níveis de macro-etapas, encontram-se no topo da figura, e abaixo estão as etapas). Cada uma das etapas é ainda subdividida em atividades, as quais, por sua vez, são subdivididas em tarefas. O Apêndice A apresenta uma tabela contendo as macro-etapas, etapas e atividades.

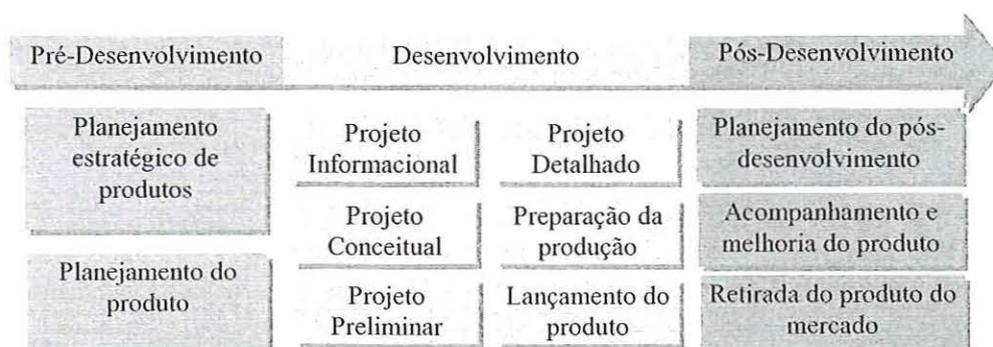


Figura 2 - Visão geral do Modelo de Referência

Fonte: Adaptado de ROZENFELD et al. (2003) p. 6

Como o processo de desenvolvimento de produtos deve estar alinhado com a missão e direcionamento estratégico da empresa, durante a macro-etapa “**Pré-Desenvolvimento**” o trabalho consiste inicialmente na realização do *Planejamento Estratégico de Produtos*. Mais especificamente, nesta etapa do Pré-Desenvolvimento, o objetivo é revisar o planejamento estratégico da empresa e gerar um portfólio de produtos capaz de atingir as metas definidas neste plano. No portfólio devem ser incluídos os produtos a serem desenvolvidos pela empresa, suas características, definição quanto ao tipo de projeto e a data na qual será iniciada a fase de planejamento de cada um dos produtos. A etapa de *Planejamento do Produto* consiste em definir o produto a ser desenvolvido, ou seja, definir o escopo do projeto de desenvolvimento em termos de equipes, resultados esperados e restrições, avaliar economicamente o projeto, avaliar a capacidade e os riscos envolvidos, definir indicadores para monitorar o projeto e definir um plano de negócios.

Concluída a macro-etapa Pré-Desenvolvimento, inicia-se o “**Desenvolvimento**” propriamente dito com o *Projeto Informacional*. As atividades realizadas durante esta etapa são principalmente a aquisição de informações sobre o tema de projeto em

questão e sua interpretação. As necessidades e desejos dos clientes são identificados, analisados e transformados em especificações técnicas a serem seguidas pelo projeto. Na fase de *Projeto Conceitual*, o conceito a ser adotado pelo produto é proposto, tendo como base as informações obtidas na fase anterior. Nesta fase, é realizada uma síntese da estrutura de funções do produto, a proposição de alternativas de concepções e, para concluir, a seleção das alternativas mais adequadas às necessidades dos consumidores. Depois de definidos o conceito e a estrutura funcional do produto, inicia-se o *Projeto Preliminar* que consiste na definição do layout do produto e das interfaces, no refinamento do estilo em termos de cor, aparência e acabamento, no dimensionamento e na seleção de materiais, formas, componentes, processos de fabricação e montagem. No *Projeto Detalhado*, a disposição, a forma, as dimensões e as tolerâncias dos componentes são concluídas, os desenhos de produção são gerados e os processos de fabricação são detalhadamente projetados. A *Preparação da Produção* consiste em planejar e organizar a fábrica para a produção do primeiro lote piloto do produto. Dessa forma, os recursos devem ser recebidos e instalados no local adequado, o lote é produzido e avaliado, ações corretivas são implementadas e a produção é liberada. Com todos os recursos em mãos, o lançamento oficial do produto é finalmente realizado.

Durante o “**Pós-Desenvolvimento**”, além do planejamento do pré-desenvolvimento, são realizadas atividades de acompanhamento e melhoria do produtos tais como auditorias de projeto, avaliações da satisfação dos clientes e gerenciamento de modificações no produto bem como atividades de planejamento de como o produto será retirado do mercado.

## **2.5. Metodologias e ferramentas de suporte ao PDP**

Diversas metodologias e ferramentas podem ser utilizadas para apoiar o processo de desenvolvimento de produtos visando alcançar um desempenho superior. A seguir, apresenta-se uma lista das principais metodologias e ferramentas de suporte ao PDP com base nos autores Clark e Fujimoto (1991), Rozenfeld et al. (2000), Zancul (2000), Ferreira e Toledo (2001), Silva (2002) e Souza Junior (2003).

De acordo com Ferreira e Toledo (2001) as metodologias e ferramentas podem ser divididas em três categorias distintas: Estatísticas, Organizacionais e Outras. Essa classificação permite uma rápida associação entre a função e o uso de uma metodologia

e ferramenta, de forma que, no âmbito de um projeto de desenvolvimento, a escolha passa a ser mais rápida partindo da identificação do tipo de problema que se tem.

Metodologias e ferramentas estatísticas auxiliam no diagnóstico de problemas e falhas que podem surgir durante o processo de desenvolvimento, fazendo descrições, análises e correlacionando dados da produção, mercado e desenvolvimento e auxiliam na busca por soluções já que, muitas vezes, identificam causas e implementam ações visando a correção de falhas. Exemplos de metodologias e ferramentas nesta categoria são:

- FMEA (Failure Mode and Effect Analysis): tem como objetivo detectar e evitar falhas no projeto do produto e do processo, através de uma análise das falhas potenciais e propostas de melhorias.
- DOE (Design of Experiments) / Método Taguchi: utilizam técnicas estatísticas para determinar a função perda do produto e otimizá-la, propondo a realização de projetos robustos.
- Análise de confiabilidade: utiliza técnicas estatísticas com o objetivo de definir o quanto e a partir de quando um produto pode falhar, auxiliando na avaliação de “taxa de falha” e “tempo médio entre as falhas” de um produto.

As metodologias e ferramentas organizacionais são direcionadas à organização do processo de desenvolvimento, auxiliando no gerenciamento de suas atividades e do fluxo de informações. Elas possuem a função de coordenar as etapas com o objetivo de integrar não somente as atividades pertinentes ao desenvolvimento, mas também as pessoas envolvidas no projeto.

- Engenharia Simultânea: abordagem para o projeto simultâneo e integrado de produtos e seus processos relacionados.
- Método de QFD (Quality Function Deployment): possui a finalidade de identificar as necessidades e desejos do cliente e traduzi-los em características técnicas do produto desejado.
- Análise e Engenharia de Valor: aplicação de um conjunto de técnicas com o objetivo de identificar e selecionar alternativas de menor custo para atender os requisitos funcionais dos produtos.
- DFMA (Design for Manufacturing and Assembly): visa avaliar a capacidade da empresa quanto à fabricação e montagem do produto proposto, considerando os limites e as possibilidades da manufatura durante o desenvolvimento do projeto.

- Sete Ferramentas da Administração da Qualidade: conjunto de ferramentas para auxiliar no planejamento, na solução de problemas críticos e no acompanhamento de ações de melhoria.

Outras metodologias e ferramentas, que possuem diversas funções e não se enquadram nas categorias anteriores, são:

- Benchmarking do Produto: consiste em um processo de medição de produtos, serviços e práticas que permite posicionar a capacidade competitiva do produto em relação aos concorrentes.
- Sistemas CAD/CAE/CAM/CAPP (Computer Aided Design / Engineering / Manufacturing / Process Planning): tecnologias auxiliadas por computador adotadas para fornecer suporte e integrar as tarefas de engenharia (cálculo, análises, projeto do produto e processo, prototipagem).
- Sistemas PDM / EDM (Product / Engineering Data Management): utilizados no gerenciamento e controle das informações utilizadas e geradas durante as etapas do desenvolvimento.
- RPT (Rapid Prototyping Technology): técnicas de prototipagem rápida para a construção de protótipos.
- Tecnologia de Grupo: visa a redução de projetos e custos envolvidos no desenvolvimento através do agrupamento de peças similares para economizar atividades de projeto, produção e gerenciamento de fluxos logísticos.
- Sistemas de Apoio ao Trabalho em Grupo, Busca de Conhecimentos e Treinamento: envolvem desde sistemas básicos para a elaboração de textos, planilhas e imagens até os sistemas de apoio ao trabalho em grupo (*groupware*) como correio eletrônico, vídeo conferência, manipulação de documentos em grupo e gerenciamento do fluxo de trabalho.

A escolha e a aplicação apropriada destas metodologias e ferramentas, segundo as necessidades de cada empresa, é uma tarefa complexa por envolver variáveis estratégicas, organizacionais, de tarefa, de integração, de características específicas do produto e das pessoas diretamente envolvidas.

Neste capítulo, buscou-se apresentar uma visão geral do Processo de Desenvolvimento de Produtos, destacando os seguintes aspectos que são relevantes para

este trabalho: os parâmetros que podem afetar o PDP; a evolução do modo como as atividades do PDP são realizadas, passando de um processo seqüencial para um processo mais simultâneo; os modelos de referência que auxiliam a obtenção de uma melhor compreensão do PDP e auxiliam a implementação de melhorias no processo; as ferramentas e tecnologias atualmente utilizadas como suporte ao PDP. A seguir, o capítulo 3 apresenta os principais conceitos, paradigmas e tecnologias presentes dentro do contexto da Manufatura Virtual.

### **3. A ABORDAGEM DA MANUFATURA VIRTUAL**

O termo Manufatura Virtual tem se desenvolvido em escopo, ganhado maior importância e aceitação internacional. Neste capítulo, discute-se os conceitos e os paradigmas da Manufatura Virtual, apresenta-se as tecnologias que compõem esse ambiente, e uma ênfase é dada ao uso da simulação e da realidade virtual. O capítulo finaliza com uma discussão sobre a interoperabilidade de dados no ambiente da Manufatura Virtual e apresenta alternativas de formatos neutros para habilitar a troca e compartilhamento de dados.

#### **3.1. Definição e paradigmas da Manufatura Virtual**

A Manufatura Virtual representa uma nova abordagem que vem sendo utilizada pelas empresas para melhorar seus processos e proporcionar a rápida introdução de produtos no mercado a um custo adequado. Porém, o significado desse termo ainda está se desenvolvendo e algumas divergências com relação à sua definição e características são encontradas na literatura.

De acordo com Webster e Sugden (2003), a Manufatura Virtual é definida como a manufatura de um produto tangível usando uma rede de parceiros independentes e dispersos geograficamente. A Manufatura Virtual tem sido também definida como a modelagem e simulação de sistemas de manufatura (LIN; FU, 2001), a modelagem e simulação dos processos de manufatura (OFFODILE; ABDEL-MALEK, 2002; MOORE et al., 2003) e a modelagem e simulação da manufatura de protótipos (WALLER, 1999). Shukla et al. (1996) e Fassi et al. (1999) definem a Manufatura Virtual como um ambiente que visa integrar um conjunto de tecnologias e ferramentas da manufatura, usando inclusive a tecnologia da Realidade Virtual.

Segundo Crain (1996), a Manufatura Virtual possui diversas facetas, mas como um todo ela pode ser vista como uma revolução na área de manufatura, envolvendo o

uso de um computador para simular não apenas um produto mas os processos envolvidos na sua fabricação.

Banerjee e Zetu (2001), argumentam que a Manufatura Virtual pode ser usada em uma grande variedade de contextos, porém, refere-se, principalmente, a modelagem de sistemas e componentes da manufatura com o uso efetivo de computadores e de dispositivos audiovisuais e/ou sensoriais para simular ou projetar alternativas para um ambiente real de manufatura visando prever potenciais problemas e ineficiências na funcionalidade e manufaturabilidade do produto antes que a manufatura real ocorra.

A Manufatura Virtual pode também ser definida, conforme Lawrence Associates Inc. (1994), como um ambiente integrado e sintético da manufatura exercido para melhorar todos os níveis de controle e decisão no projeto do produto e processos, planejamento de processos, planejamento da produção e controle de chão-de-fábrica, onde:

- Ambiente: consiste no suporte para a construção e uso da simulação da manufatura distribuída, pela sinergia provinda de uma coleção de ferramentas de análise, de simulação, de implementação, de controle, modelos (produto, processo, recurso), equipamentos, metodologias e princípios organizacionais.
- Sintético: refere-se a uma mistura do real com objetos, atividades e processos simulados.
- Exercido: significa executar a simulação da manufatura utilizando o ambiente.
- Melhorar: consiste em aumentar o valor, precisão e validade.
- Níveis: do conceito do produto à sua disponibilidade no mercado, do chão-de-fábrica ao nível executivo, do equipamento de fábrica ao empreendimento e da transformação de material à transformação de conhecimento.
- Controle: consiste em prever os efeitos reais.

Neste trabalho, a visão de Manufatura Virtual é a de um ambiente sintético e integrado da manufatura, composto por um conjunto de ferramentas e sistemas, que permite à empresa desenvolver, testar e manufaturar um produto virtualmente antes de fazê-lo fisicamente (Figura 3). Um dos principais papéis da Manufatura Virtual é servir como um mecanismo para a implementação das práticas de desenvolvimento integrado do produto e do processo.

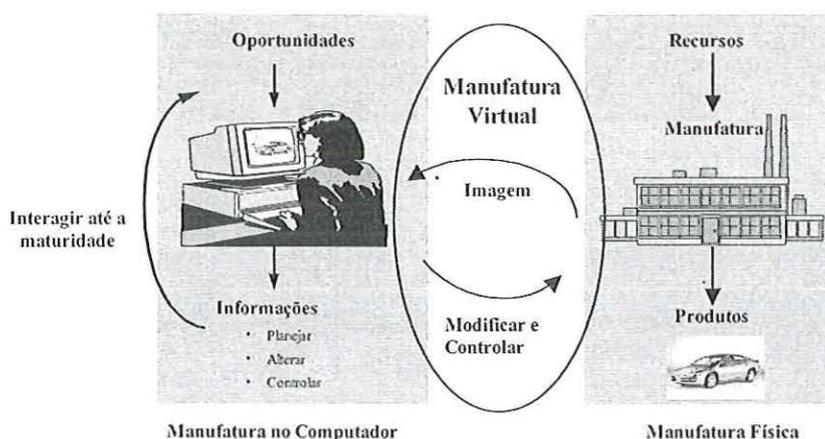


Figura 3 - Visão da Manufatura Virtual

Fonte: LAWRENCE ASSOCIATES INC. (1994), p.5

Nessa visão, a Manufatura Virtual visa fornecer um ambiente integrado para um conjunto de tecnologias isoladas de manufatura tais como CAD, CAM, CAPP, simulação, realidade virtual permitindo que diversos usuários simultaneamente realizem suas funções sem a necessidade de estarem fisicamente co-localizados.

O escopo pode variar da integração de sub-funções de projeto como desenho, análise de elementos finitos e prototipagem à integração de todas as funções dentro de uma empresa de manufatura como planejamento, operação e controle.

O desenvolvimento da definição de algo tão complexo quanto a Manufatura Virtual é sempre uma tarefa difícil, pois tal definição raramente pode capturar completamente essa complexidade. Assim, conforme Lawrence Associates Inc. (1994), a Manufatura Virtual é mais adequadamente definida dentro de três paradigmas (Figura 4):

- **Manufatura Virtual orientada para o Projeto:** fornece informações sobre a manufatura ao processo de desenvolvimento, permitindo a simulação de alternativas de manufatura e a criação de protótipos “soft” pela manufatura no computador. Consiste no uso de simulações baseadas na manufatura para otimizar o projeto do produto e dos processos para uma meta específica da manufatura como DFA (*Design for Assembly*), qualidade ou flexibilidade.
- **Manufatura Virtual orientada para a Produção:** fornece capacidade de simulação aos modelos dos processos de manufatura com o propósito de permitir avaliações mais rápidas e econômicas de diversas alternativas de processamento.

Consiste na conversão do processo de desenvolvimento nos planos de produção, otimizando os processos de manufatura.

- **Manufatura Virtual orientada para o Controle:** consiste na simulação dos modelos de controle e processos atuais, permitindo a otimização dos processos durante o ciclo de produção existente.

O termo “manufatura” deve incluir não apenas a produção, mas também fornecedores, clientes e outros processos que influenciam a produção, pois atividades significativas fora do chão-de-fábrica devem ser incluídas em modelos, dados e simulações.

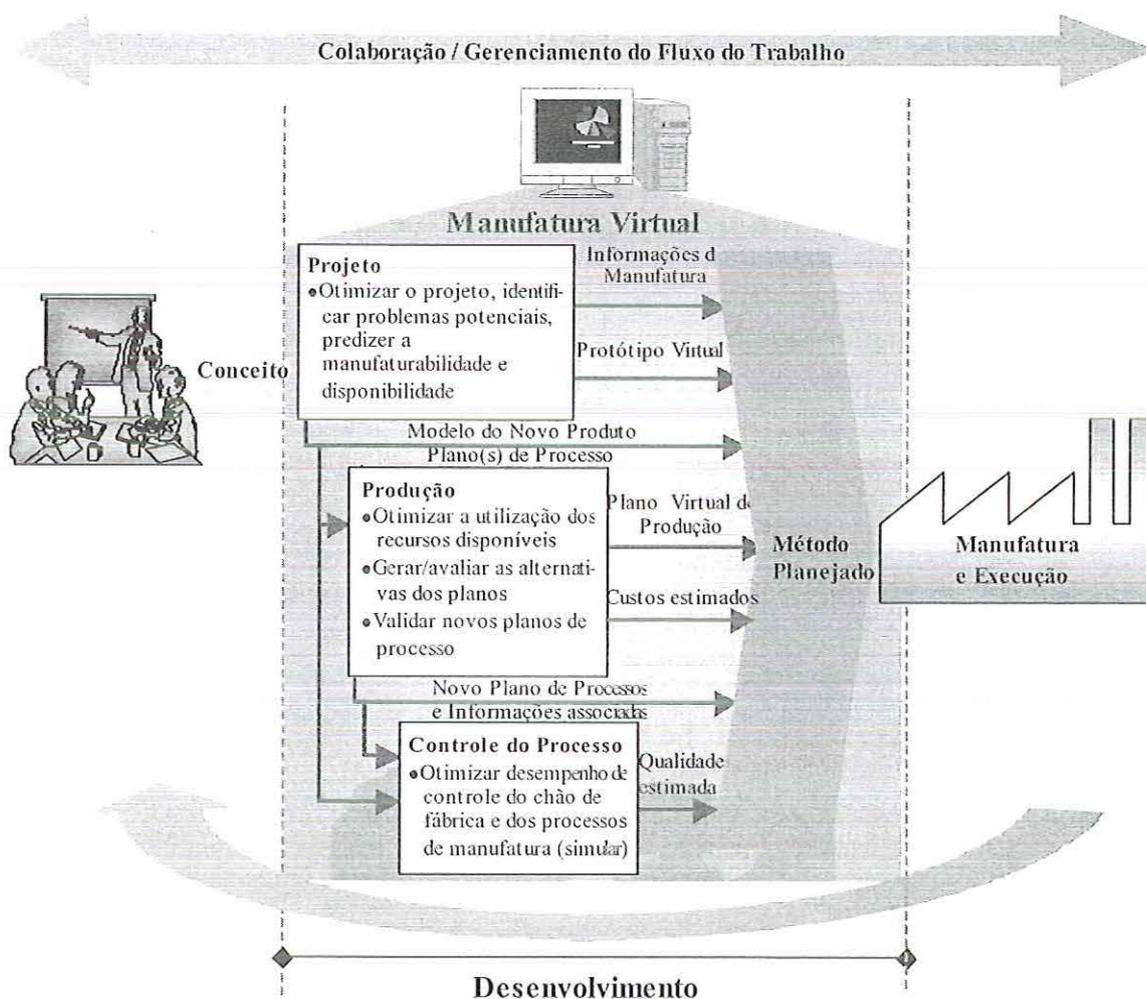


Figura 4 - Os paradigmas da Manufatura Virtual

Fonte: PORTO e PALMA, (2000), p. 90

Desta forma, a Manufatura Virtual orientada para o projeto fornece um ambiente para que os projetistas projetem os produtos, avaliem sua manufaturabilidade e viabilidade e otimizem o produto quanto à robustez. Os resultados deste paradigma incluem basicamente informações sobre a manufatura, modelo do produto e estimativas de custo. Visando manter a competência da manufatura sem construir produtos reais, a Manufatura Virtual orientada para a produção fornece um ambiente para a geração de planos de processo e de produção, para o planejamento de recursos necessários e para a avaliação destes planos. Fornecendo capacidade para simular os sistemas produtivos existentes, a Manufatura Virtual orientada para o controle oferece um ambiente para avaliação de projetos de produtos novos ou revisados com relação às atividades de chão-de-fábrica.

### **3.2. A importância da Manufatura Virtual para o PDP**

Um dos papéis da Manufatura Virtual no PDP é fazer com que as informações de desenvolvimento de produtos, incluindo manufatura, fabricação e montagem, e informações de suporte, estejam disponíveis durante o projeto (LAWRENCE ASSOCIATES INC, 1994). Isto significa que a implementação da Manufatura Virtual deve não apenas deixar o projetista informado sobre as questões de desenvolvimento, mas também fornecer um mecanismo confiável de relacionar o produto final ou custo de componentes às características específicas de projeto e tolerâncias. A Manufatura Virtual propõe analisar a manufaturabilidade de um produto (não apenas seu desempenho) antes do PDP caminhar para a produção, pois ela possibilita o fornecimento, durante o projeto do produto, de informações sobre a manufatura (capacidade de processo, fabricação, ferramental, montagem) que influenciam as características de um dado projeto.

A figura 5 apresenta como as atividades de Projeto do Produto, Projeto do Processo, e Manufatura e Execução podem ser realizadas em um ambiente tradicional de PDP. Na abordagem tradicional, caracterizada pela realização das atividades de modo seqüencial, pode-se observar que as atividades de Projeto do Processo iniciam-se somente quando o Projeto do Produto é concluído. Nesse caso, há grande possibilidade da necessidade de realizar alterações técnicas de engenharia identificadas somente na fase de Projeto do Processo. As atividades de Manufatura, por sua vez, iniciam-se após o plano de processo ser finalizado, onde alterações técnicas no processo poderão ser

requeridas. Existe também a possibilidade da identificação, na fase de manufatura, da necessidade de alterações técnicas de engenharia.

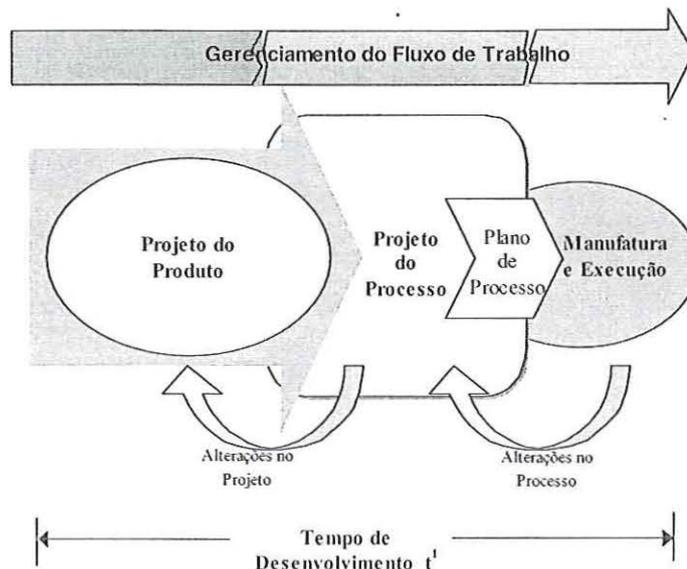


Figura 5 - Abordagem tradicional de PDP

Nessa abordagem, uma das falhas básicas é a falta de integração entre as áreas funcionais envolvidas no processo de desenvolvimento, resultando em atrasos no cronograma, implementação inadequada da manufaturabilidade, confiabilidade, manutenibilidade e aumento nos custos e no tempo do ciclo de vida do projeto.

Em uma abordagem mais atual de PDP, como a abordagem da Engenharia Simultânea, as atividades de Projeto do Produto são realizadas em paralelo às atividades de Projeto do Processo, reduzindo-se a probabilidade da necessidade de realização de alterações técnicas no produto decorrentes de problemas encontrados na etapa de Projeto do Processo (Figura 6).

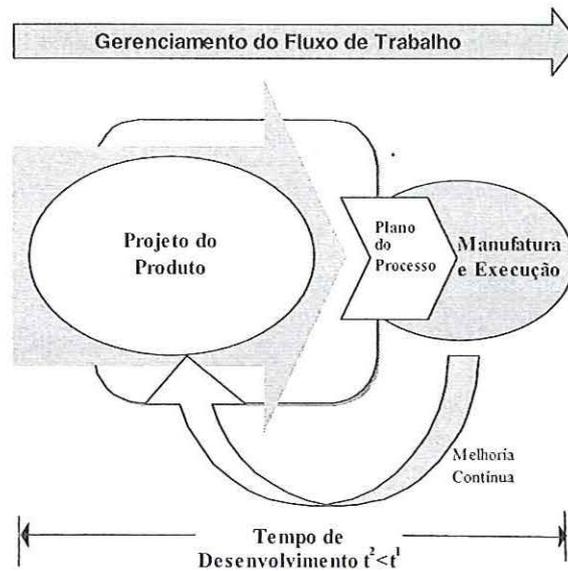


Figura 6 – Abordagem atual de PDP

Em um ambiente de Manufatura Virtual, a proposta é que haja grande integração entre o Projeto do Produto e o Projeto do Processo, e que as necessidades de manufatura sejam identificadas nas etapas iniciais do PDP, gerando o plano de processo o mais próximo possível da realidade do chão-de-fábrica (Figura 7). A Manufatura Virtual, propõe a realização de melhorias contínuas dentro das etapas de projeto e antes de chegar no chão-de-fábrica através da rápida e antecipada validação do produto e dos processos.

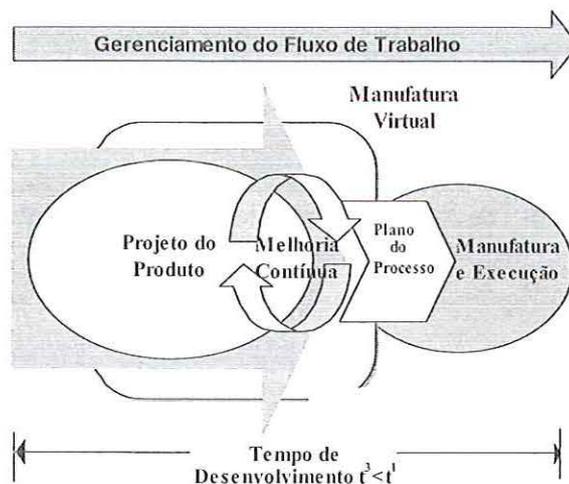


Figura 7 – PDP em ambiente de Manufatura Virtual

Um ambiente de Manufatura Virtual pode acelerar os ciclos projetar-construir-testar presentes em todas as fases do PDP, através da construção e validação de modelos virtuais antes que protótipos físicos sejam criados, e mover a identificação e solução de problemas para as etapas iniciais do processo (abordagem do *front-loading*). Segundo Thomke e Fujimoto (2000) a abordagem de solução de problemas no “*front-loading*” pode ser vista como uma estratégia para melhorar o desempenho do PDP, que pode ser alcançada usando diferentes métodos e técnicas.

### 3.3. Tecnologias que compõem o ambiente da Manufatura Virtual

A proposta da Manufatura Virtual é promover uma estratégia para integrar todos os processos, da engenharia à manufatura, através do uso integrado de sistemas e ferramentas computacionais de simulação, manufatura, projeto e realidade virtual.

Com base na *North American Technology and Industrial Base Organization* (NATIBO) (1996), as tecnologias utilizadas dentro do contexto da Manufatura Virtual podem ser classificadas de acordo com as seguintes categorias: interação, aplicação, criação de dados, integração, gerenciamento de dados, e redes e sistemas computacionais (Figura 8).

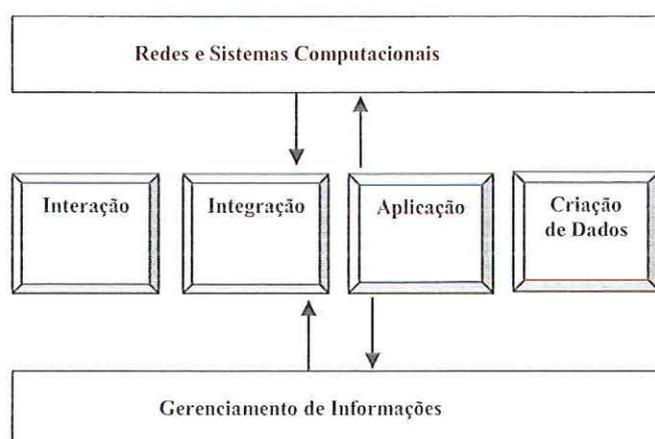


Figura 8 – Categorias de tecnologias da Manufatura Virtual

Fonte: Adaptado de NATIBO (1996)

### **Interação**

Refere-se ao uso de ferramentas que permitem ao usuário interagir com um produto ou processo e realizar análises em tempo real como, por exemplo, a Realidade Virtual e tecnologias de imersão. Essas ferramentas são usadas principalmente quando a interação ou envolvimento do usuário no ambiente é requerido para avaliar o desempenho ou operação de um produto ou sistema.

Um requisito crítico para as tecnologias de interação é a necessidade de sistemas computacionais de alto desempenho para suportar a apresentação visual e a atualização das informações gráficas em tempo real. Espera-se que o poder computacional avance cada vez mais para tornar as ferramentas de interação mais eficazes para análises em tempo real.

### **Aplicação**

Essa categoria engloba ferramentas de análise que possibilitam ao projetista entender melhor as características e funcionalidades de um projeto, tais como ferramentas CAE e de simulação, que normalmente não requerem execução em tempo real. Essas ferramentas modelam e simulam as características do produto, funcionalidade do projeto e processos de manufatura.

Em geral, as tecnologias desta categoria estão bem desenvolvidas. Ferramentas CAE estão disponíveis para uma ampla variedade de atividades de análise e são utilizadas para apoiar principalmente as etapas de projeto preliminar e detalhado. Uma das tecnologias incluídas nestes sistemas é a análise de elementos finitos com suas várias aplicações (análise de tensões e deformações, análise de vibrações, estudo de transmissão de calor, e de campos magnéticos e elétricos).

Ferramentas de simulação de processos e sistemas da manufatura como sistemas de simulação do chão-de-fábrica estão também disponíveis no mercado. O principal desafio desta categoria é entender melhor novos produtos e processos e extrair essas informações das ferramentas que modelam o comportamento dos produtos e processos e a integração das aplicações.

### **Criação de Dados**

São tecnologias que possibilitam ao projetista criar dados que são usados pelas ferramentas de interação e aplicação e que são compartilhados por meio das ferramentas de integração. As principais ferramentas desta categoria de tecnologia são os sistemas

CAD para criação de dados do produto, CAM para criação de dados do processo e CAPP para desenvolvimento dos planos de processo. Além desses, a simulação pode também ser considerada uma tecnologia de criação de dados lógicos como, por exemplo, na simulação de robô, onde os dados gerados são exportados para o robô.

Sistemas CAD são ferramentas para a criação, análise e modificação de modelos geométricos dos produtos. Esses modelos podem ser bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Estes sistemas podem ser genéricos ou específicos em uma determinada área de aplicação tais como projeto mecânico, projeto de circuitos impressos, projeto de instalações eletro-hidráulicas.

Sistemas CAM geralmente referem-se aos sistemas que apóiam as atividades de programação de controle numérico. Estes sistemas calculam o caminho da ferramenta a partir da representação da peça, simulam o programa de controle numérico obtido, estimam os tempos de processamento e, sistemas mais completos, permitem o cálculo das condições de usinagem. Os sistemas CAPP são responsáveis pela elaboração de planos de processo de fabricação e montagem consultando informações técnicas de engenharia e fabricação.

### **Integração**

Tecnologias desta categoria permitem a integração de sistemas e dados, possibilitando a interoperação de tecnologias das categorias interação, aplicação e criação de dados. Padrões de formatos para a integração se encontram na fase de pesquisa e desenvolvimento com atividades de teste e prototipagem sendo executadas. O que se tem observado atualmente é que as companhias constroem suas próprias interfaces que permitem integrações específicas entre as ferramentas.

Os vários padrões existentes podem ser classificados em duas sub-categorias: padrões de suporte às infra-estruturas, arquiteturas e linguagens como o padrão CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) e padrões para a troca e compartilhamento de dados como o STEP (*Standard for Product data Exchange*) e IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*).

### **Gerenciamento de Informações**

Envolve tecnologias que dão suporte à armazenagem, gerenciamento e manutenção dos dados que definem um projeto como, por exemplo, bases de dados, bases de conhecimento e sistemas EDM (*Electronic Document Management*), PDM

(*Product Data Management*) e *Workflow*. O conhecimento requerido para projetar, testar e manufaturar um produto deve ser armazenado em uma base de conhecimentos. Geralmente, esses conhecimentos existem dentro da empresa, mas na maioria das vezes não são armazenados em um único lugar ou em uma base.

Segundo Dickerson (1996 apud Zancul, 2000), os sistemas PDM contribuem na organização e controle de todos os dados do produto e no gerenciamento do ciclo de vida do produto. Normalmente, esses sistemas são compostos por: um “cofre eletrônico” (*vault*), utilizado como um repositório para o armazenamento das informações do produto; uma base de dados, que mantém os dados sobre as informações armazenadas no *vault*; e um conjunto de funcionalidades.

Já os sistemas EDM controlam o ciclo de vida de documentos eletrônicos e de imagens de documentos, gerenciando a documentação técnica dos produtos em produção, normas, procedimentos internos e controlando publicações técnicas (ZANCUL, 2000).

### **Redes e sistemas computacionais**

Essa categoria inclui a infra-estrutura física que permite o compartilhamento de informações e dados entre as categorias aplicações, interação e criação de dados. Inclui também o poder computacional necessário para a implantação de um ambiente de Manufatura Virtual e de todas as ferramentas e operações associadas.

#### **3.4. A ênfase no uso da Simulação e Realidade Virtual**

Diversas verificações e validações de projeto podem ser realizadas com o uso de softwares de Simulação e Realidade Virtual (RV). Segundo Ravelli (2003), a simulação e a realidade virtual são componentes em diferentes áreas, incluindo a Manufatura Virtual, mas há diferenças entre elas. Tanto a simulação quanto a realidade virtual são ferramentas que podem ser usadas para análise e teste de materiais, treinamento de pessoas, e o projeto e implementação de novas idéias e conceitos.

A forma como os usuários operam a tecnologia é uma das diferenças entre a realidade virtual e a simulação. A realidade virtual freqüentemente requer mais interação física da parte do usuário, enquanto a simulação normalmente é mais passiva. A realidade virtual é um processo tátil, incorporando luvas, controle "*joysticks*", capacetes, óculos estéreos 3D, e telas para projeção de vídeo. Simulação envolve

software de visualização com gráficos de alta resolução, usando modelos CAD 3D, operando em estações gráficas de alto desempenho. Segundo a National Aeronautics and Space Administration (2001), ambas podem ser usadas em conjunto por projetistas e engenheiros para criar praticamente qualquer tipo de mundo artificial.

- **Simulação**

A simulação, em todas as abrangências do seu significado, está envolvida em todos os paradigmas da Manufatura Virtual (projeto, produção e controle). Esse fato condiz com a tendência citada por Jain (1999) de que a simulação será intensamente utilizada através de todos os estágios de desenvolvimento e operação de uma organização. Segundo o autor, os modelos de simulação serão construídos com os conceitos do desenvolvimento do sistema real, crescerá tal como um projeto cresce em detalhes, apoiará a atividade de validação e de integração de sistemas e fornecerá suporte à decisão durante o estágio de operação do sistema real. A simulação se tornará a forma de fazer negócios no futuro, na qual todas as decisões serão avaliadas usando esta tecnologia em todos os aspectos das operações. O uso da simulação se estenderá de aplicações tradicionais na manufatura e logística para processos de negócios às aplicações interativas de simulação no treinamento e vendas

Os sistemas de simulação para suporte às atividades de Manufatura Virtual podem ser distribuídos em 4 grandes grupos (SOUZA et al., 2002):

- Simulação de Sistemas de Manufatura
- Simulação de Processos de Manufatura
- Simulação de Sistemas Mecânicos
- Simulação de Elementos Mecânicos

Os *softwares* de simulação de sistemas de manufatura incluem: processo de fabricação e montagem, os quais provêm um método sistemático para o projeto de fábrica (criação, análise e apresentação visual do modelo), habilitando a engenharia simultânea de toda a fábrica; análise de fluxo de material e *layout* de fábrica, integrando desenhos de fábrica e caminhos do fluxo de material com dados de produção e manuseio de material, possibilitando prever o desempenho e entender o impacto de mudanças nos sistemas de manufatura; eventos discretos, que permite modelar questões de manuseio complexo de material e manufatura, provendo animações em escala real 3D enquanto o modelo está sendo executado.

Os sistemas de processos de manufatura e sistemas mecânicos englobam a programação de controle numérico, que simula interativamente o processo de remoção de material de um caminho de ferramenta de CN (controle numérico), o movimento total da ferramenta na máquina, detecção automática de colisões de ferramentas, interferência entre peças e condições de corte inadequadas; a programação de robôs, para o desenvolvimento, programação e otimização de aplicações em pintura, MMC (máquina de medição por coordenada), solda e células de manufatura.

A simulação de elementos mecânicos utiliza principalmente o método de elementos finitos para verificar se as alterações nas condições de usinagem não resultarão em esforços que comprometerão a qualidade de forma e de acabamento da peça.

Uma limitação dos softwares de simulação da MV é que, para a grande maioria dos casos, diferentes tipos de ferramentas de simulação – eventos discretos, fluxo de material, célula de trabalho – operam independentemente um dos outros.

- *Realidade Virtual (RV)*

Enquanto a Manufatura Virtual é verdadeiramente um paradigma multidisciplinar, um dos seus temas centrais é o uso efetivo da tecnologia da Realidade Virtual, que é uma tecnologia emergente com potencial aplicação no desenvolvimento de produto e na manufatura, mais especificamente em áreas como projeto e modelagem do produto, simulação dos processos, planejamento das operações e controles de chão-de-fábrica em tempo real.

Banerjee e Zetu (2001) definem a Realidade Virtual como a habilidade para criar e interagir no espaço cibernético, ou seja, um espaço representando um ambiente que possui uma grande similaridade com o ambiente ao nosso redor. Realidade Virtual é associada com um ambiente comumente conhecido como Ambiente Virtual. Segundo os autores, Ambientes Virtuais diferem-se daqueles sistemas baseados em computador previamente desenvolvidos a medida em que a interação em tempo real é possibilitada. Além disso, ambientes virtuais são diferentes em termos das seguintes características: o ambiente virtual se caracteriza por ser 3D enquanto sistemas computacionais são 2D, a interface homem-máquina é multi-modal, e o usuário pode imergir no ambiente gerado pelo computador.

De acordo com Barnes (1996), Realidade Virtual pode ser descrita como avançados métodos de envolvimento e interação para humanos com um ambiente

gráfico 3D gerado no computador. Em termos de simulação, a Realidade Virtual pode ser vista como uma avançada interface com usuário para modelos 3D de simulação. As diferenças básicas entre a RV e a simulação são: a forma na qual o humano experimenta o modelo de simulação, o grau com que a experiência parece ser real e a forma como o humano interage com o modelo.

O uso da RV pode ser atribuído a uma vasta gama de tópicos: projetar produtos que precisam ser avaliados e testados quanto a manufaturabilidade, incluindo funcionalidade ergonômica, sem ter que construir modelos em escala real; projetar produtos para que a estética encontre as preferências do consumidor; assegurar cumprimento aos padrões de instalações e equipamentos; facilitar operações e controle remotos de equipamentos; desenvolver planos e programação da produção e simulá-los; educar operadores em técnicas avançadas de manufatura com ênfase na segurança.

Vários pesquisadores têm empregado técnicas de RV para tratar diferentes aspectos e questões no projeto e manufatura. Dani e Gadh (1997) propõem uma abordagem para o projeto da forma conceitual via interface de RV. Jayaram et al. (1997) desenvolveram um ambiente virtual de projeto da montagem que permite analisar aspectos de sistemas mecânicos antecipadamente no processo de desenvolvimento. Peng et al. (2000) desenvolvem um sistema CAPP virtual que permite a criação de modelos 3D dos componentes de um projeto original, simular o processo de usinagem baseado em código CN existente e passar o código para a máquina no chão de fábrica. Valério Neto (1998) desenvolveu um protótipo virtual de um torno CNC enfatizando o sistema de intertravamento (funcionalidade) e o modelo geométrico do torno.

Um dos campos e aplicações da realidade virtual na engenharia é a prototipagem virtual (PV) que consiste na análise e simulação realizadas em um modelo computacional completamente desenvolvido, realizando os mesmos testes daqueles em protótipos físicos. A PV consiste na combinação da Realidade Virtual com técnicas avançadas de modelagem, simulação e interface para usuário, envolvendo uma síntese de metodologia de engenharia e tecnologia de visualização imersiva 3D. Idealmente, é um processo no qual modelos computacionais são usados no lugar de modelos físicos no desenvolvimento de um novo produto ou conceito de projeto.

### *Características Básicas de um Sistema de Realidade Virtual*

A interação em tempo real e a sensação de presença (que juntos com a sofisticação do modelo – são os três elementos chave de um ambiente virtual) ao invés

de puramente a qualidade dos gráficos, distinguem os ambientes virtuais de sistemas CAD e outros sistemas de modelagem sólida 3D.

Dependendo dos resultados esperados, é possível utilizar diferentes tecnologias e tipos de equipamentos hardware e software. Porém, segundo Sacco et al. (2000) um sistema de Realidade Virtual deve conter os seguintes elementos básicos: modelos 3D, sons, dispositivos de interface, regras do mundo que definem as respostas do ambiente para a interação e renderização em tempo real (Figura 9).

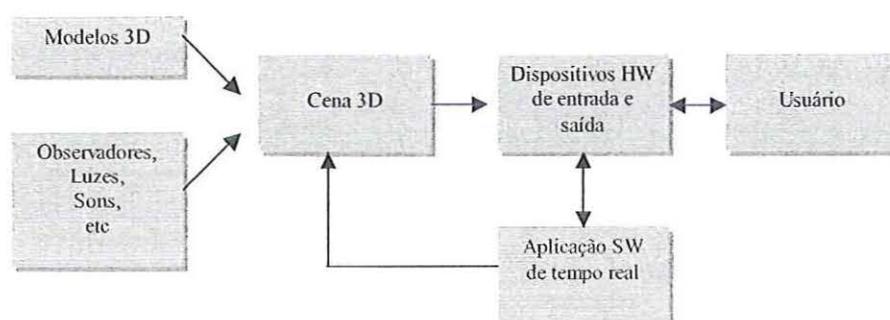


Figura 9 - Elementos básicos de uma aplicação de Realidade Virtual

Fonte: SACCO et al. (2000), p.6

Primeiramente, uma cena 3D composta por objetos deve ser configurada. Os objetos que compõem a cena são modelos geométricos projetados com um modelador sólido, contendo suas propriedades como cores, texturas, tipo de material, e eventuais sub-partes que podem ser movidas.

Normalmente a cena 3D é uma descrição dos objetos com uma certa posição e orientação, com as luzes que incidem nos objetos, parâmetros específicos, etc. É necessário também especificar os dispositivos que serão usados para a interação do usuário: mouse, luvas, sensores, óculos, capacetes, etc. Uma outra entidade importante é o observador que representa os olhos do usuário no ambiente 3D. É necessário descrever o modelo de movimentação e o campo de visão do observador no ambiente virtual. Todos esses objetos e entidades são elementos definindo as condições iniciais do ambiente e são definidos por ferramentas de software específicas.

Uma segunda fase muito importante para o desenvolvimento de uma aplicação de realidade virtual é a interação em tempo real do usuário com o ambiente. Por exemplo, o usuário pode navegar no espaço, pode pegar ou manipular objetos, movê-

los, apagá-los e realizar outros tipos de interação mudando a cena. Para tanto, um software deve ser desenvolvido: a aplicação de realidade virtual. É essa aplicação que fornece o dinamismo ao ambiente e à relação entre usuário-ambiente. Essa aplicação também trata do fluxo de dados dos dispositivos hardware para interface e o comportamento das entidades da cena 3D para que o usuário receba o *feedback* do sistema.

Uma outra capacidade computacional necessária para a utilização de um ambiente de realidade virtual está relacionada às dinâmicas dos objetos, detecção de colisão e consideração da força do contato. Muitas vezes, torna-se necessário utilizar vários computadores ligados em rede, cada um tendo algumas funções nesse ambiente.

O usuário pode “entrar” no mundo virtual através dos dispositivos de saída de dados. Os dispositivos de entrada de dados, por outro lado, permitem a movimentação e a interação do usuário com o mundo virtual. Sem o dispositivo de entrada de dados o usuário participa da experiência em RV apenas de forma passiva.

Os dispositivos de saída de dados são:

- Dispositivos visuais: como visores Desktop, capacetes ou *Head-Mounted Displays* (HMDs), visores de telas simples e múltiplas, CAVEs (Caverna Digital);
- Dispositivos auditivos: fornecem maior realismo ao sistema de RV quando utilizados de maneira 3D;
- Dispositivos físicos: procuram estimular as sensações físicas, como o tato, tensão muscular e temperatura.

Tão importante quanto a recepção de informações é também a interação do usuário com o mundo virtual. Dispositivos de entrada de dados (mouses, teclados, luvas) permitem ao usuário mudar de posição e orientação no mundo virtual. Existe também a capacidade de interagir com o mundo virtual obtendo informações e fazendo mudanças instantâneas no mundo virtual.

Ferramentas de software “*ready-to-run*” como, por exemplo, EON Studio e d-VISE, fornecem suporte à criação de ambientes virtuais. Alguns programadores de aplicações preferem usar bibliotecas gráficas como OpenGL e Performer, ao invés dessas ferramentas especializadas.

### 3.5. A questão da interoperabilidade de dados no ambiente da Manufatura Virtual

Uma das questões fundamentais na implementação de um ambiente de Manufatura Virtual é a interoperabilidade entre ferramentas, sistemas e dados que farão parte da arquitetura tecnológica. Nesse ambiente, existe a necessidade de compartilhamento de dados de engenharia do produto e do processo entre os diversos sistemas de softwares.

O principal problema de interoperabilidade está na transferência de informações do produto de um sistema para outro. Nesse processo, muitas vezes, as informações precisam ser convertidas ou reformuladas, dados podem ser perdidos entre os softwares e tudo isso acarreta elevados custos para as empresas. De acordo com um estudo realizado no setor automotivo essa falta de habilidade para a troca eficiente de dados do produto na cadeia de fornecimento tem resultado em um custo anual para a indústria de \$1 bilhão de dólares (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 1999).

Os problemas de integração são causados por diversos fatores. Tradicionalmente, empresas desenvolvedoras de software consideram as representações proprietárias dos dados como parte de suas vantagens competitivas. Na realidade, as representações proprietárias consistem em uma das fontes dos problemas de interoperabilidade. A eliminação de barreiras para a interoperabilidade é vista pelos desenvolvedoras de software como algo que proporciona às empresas clientes comprar e usar um produto da concorrência ao invés daqueles fornecidos por eles. Esse fato não incentiva esses fornecedores a tratarem de problemas de interoperabilidade. Esse é um dos motivos pelos quais os esforços de organizações e centros de pesquisa, para integrar padrões de troca de dados em gerações existentes de software, encontram resistência dos desenvolvedores, apesar das solicitações das empresas da indústria automotiva (SZYKMAN et al., 2001).

A incompatibilidade ocorre também pois, na maioria das empresas, engenheiros e gerentes buscam no mercado a melhor solução, para cada aplicação específica ou, então, quando estas soluções não estão disponíveis comercialmente desenvolvem *in house* pelo próprio usuário. Como resultado, as organizações não podem ter suas ferramentas trabalhando de forma integrada. O objetivo de melhorar o desempenho e eficiência de produtos e processos individuais encoraja a proliferação de novas

ferramentas e, conseqüentemente, resulta na falta de interoperabilidade entre elas (ADVANCED, 1999).

Um outro fator que dificulta a integração de ferramentas, sistemas e dados é que, além de integrar seus processos internos, as empresas devem considerar toda a cadeia de fornecimento bem como o envolvimento de fornecedores no processo de desenvolvimento do produto e processo. Assim, interfaces externas estão se tornando tão críticas quanto interfaces internas, e sistemas de engenharia e projeto devem ser integrados além dos limites organizacionais.

Desenvolver uma estrutura tecnológica para o ambiente da Manufatura Virtual é uma tarefa bastante complexa, pois falta uma avaliação sistemática das implicações dos diferentes caminhos em direção a esse novo ambiente. Para alcançar uma estrutura tecnológica as empresas podem escolher entre diferentes caminhos (figura 10).

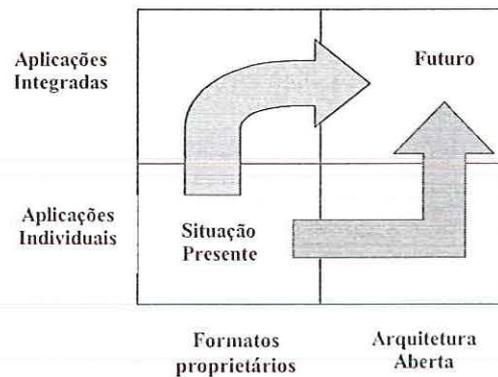


Figura 10 - Caminhos alternativos para a estrutura tecnológica

Fonte: NATIONAL COALITION FOR ADVANCED MANUFACTURING (2001), p.8

A situação presente é caracterizada por aplicações de softwares individuais que freqüentemente são incompatíveis com outros softwares. Aplicações integradas estão surgindo, oferecendo a mais simples solução para os problemas de troca de dados pois não possuem problemas de interoperabilidade sendo que seus módulos são interoperáveis entre si. Infelizmente, essa solução integrada dificilmente é a alternativa para a Manufatura Virtual, pois as empresas podem continuar encontrando problemas de compartilhamento de informações e dados com parceiros que não usam o mesmo pacote integrado (por exemplo, fornecedores e clientes). Ao contrário, um sistema baseado em uma arquitetura aberta pode facilitar trocas entre aplicações individuais ou integradas pois compartilham uma “base” na qual a diferença de produtos pode prosperar. A

Internet com seu protocolo TCP/IP é um exemplo das possibilidades de tal modelo (NACFAM, 2001).

Além disso, muito tem sido escrito sobre o XML (*eXtensible Markup Language*) como uma solução para o problema da interoperabilidade, pois é uma poderosa ferramenta que pode facilitar a troca de informações, mas mesmo o XML requer um acordo para uma base (conjunto de definições bem definidas e aceitas de modo comum) de informações para operar efetivamente.

### 3.5.1. Padrões de formato neutro de arquivos para a troca e compartilhamento de dados

Os sistemas de software utilizados em um ambiente de Manufatura Virtual geralmente não utilizam o mesmo formato para a entrada e saída de dados. A necessidade de que aplicativos compartilhem eficientemente dados de engenharia (produto e processo) tem conduzido ao desenvolvimento de padrões para um formato neutro intermediário. Segundo Goldstein et al. (1998) adotar padrões de formato neutro evita o desenvolvimento e manutenção de diversas interfaces entre sistemas específicos e possibilita que aplicações sejam dirigidas diretamente a um arquivo compartilhado.

Um formato neutro pode ser definido como um arquivo com formato independente de um sistema específico que serve como um meio para conectar sistemas computacionais diferentes que normalmente não se comunicam (LAU; JIANG, 1998). Um formato neutro normalmente é usado como um formato intermediário, sendo que ambos os sistemas que estão enviando e recebendo possuem seus próprios formatos internos nativos. A figura 11 apresenta o princípio de troca de dados utilizando formatos neutros.

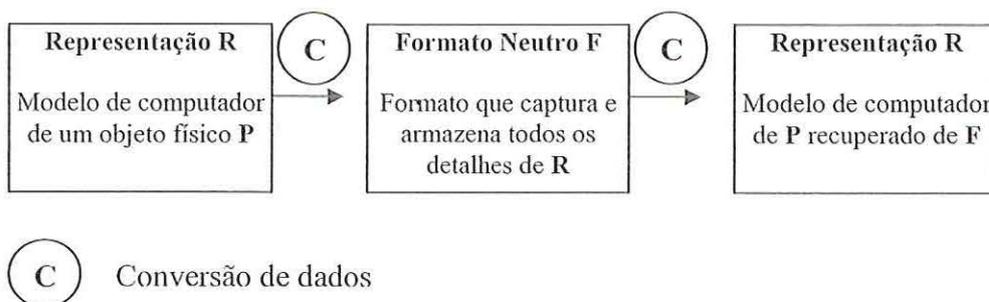


Figura 11 – Transferência de dados entre dois sistemas usando formato neutro

Fonte: MARSAN et al. (1998)

Alguns dos principais formatos neutros (proprietários e não proprietários) e suas principais características foram identificados por Ravelli (2003), e são apresentados a seguir.

### **STEP (*STandard for Product data Exchange*)**

Um padrão de interesse para a Manufatura Virtual é o ISO 10303 (STEP) que visa permitir a troca de dados do modelo do produto entre os diferentes módulos de um sistema de desenvolvimento, ou compartilhar esses dados pelos diferentes módulos com o uso de uma base de dados comum.

O STEP está organizado em uma série de partes: métodos de descrição, recursos de integração, protocolos de aplicação (APs – *Application Protocols*), conjunto de textos, métodos de implementação, e teste de conformação. As primeiras partes foram publicadas em 1994 e outras têm sido publicadas desde então. O formato STEP usa uma linguagem formal de especificação denominada EXPRESS, para especificar a informação do produto que será representada. O uso de uma linguagem comum permite precisão e consistência de representação e facilita a implementação do sistema.

Os protocolos de aplicação são usados para especificar a representação da informação do produto para uma ou mais aplicações. Espera-se que diversas centenas de APs sejam desenvolvidas para suportar diversas aplicações industriais. APs estão disponíveis para aplicações mecânicas e elétricas e estão em desenvolvimento para construção de materiais compostos, para matrizes de chapas metálicas, projeto e manufatura automotiva e plantas de processo (Zhao et al., 2001).

Um dos protocolos de aplicação STEP mais relevante para sistemas CAD tradicionais é chamado AP203 e intitulado "Projetos 3D de configuração controlada de peças e conjuntos mecânicos". O foco do AP203 está na descrição de formas e dados da configuração do produto e engloba as seguintes informações (PROSTEP, 2004a):

- Produtos (componentes e conjuntos mecânicos);
- Identificação da peça (versão, gerenciamento de mudança e peça fornecida)
- 5 tipos de representação dos formatos geométricos: *wireframe* e superfície sem topologia, *wireframe* com topologia, superfície com topologia, limites facetados e B-reps (*Boundary Representation*);
- Representações alternativas (diferentes vistas da peça no processo de manufatura durante o ciclo de vida do produto);

- Montagens e lista de materiais (estrutura do produto, posicionamento, peças alternativas);
- Controle de alterações técnicas;
- Informações do projeto (material, processos, especificações de superfície);
- Dados de teste e análise do projeto.

Como resultado, os processos suportados são o desenvolvimento e a troca de dados de projeto com outras fases do ciclo de vida do produto, o desenvolvimento do projeto (conceito e detalhamento), alterações técnicas, aprovações e contratos nos quais o desenvolvimento está baseado.

O STEP AP203 não suporta as seguintes informações: dados de configuração e do produto durante o ciclo de vida completo, que não estão relacionados com a fase de projeto; dados de negócio para o gerenciamento de um projeto; representações alternativas que não estão relacionadas à fase de projeto (por exemplo, manufatura); representações geométricas CSG (*Constructive Solid Geometry*).

Outro protocolo de interesse é o AP214 – “Dados principais para os processos de desenvolvimento mecânico automotivo”, que foi desenvolvido pelos principais fabricantes de automóveis e já vem sendo utilizado como padrão na troca de dados CAD 3D pelas principais empresas automobilísticas situadas na Europa, Estados Unidos e Japão (HENRIQUES; SCHUTZER, 2003). Esse protocolo provê as seguintes informações (PROSTEP, 2004b):

- Componentes e ferramentas, bem como montagens de peças e ferramentas;
- Plano de processo para o gerenciamento de relações entre componentes e ferramentas;
- Informações do produto e dados de configuração;
- Gerenciamento dos processos de projeto e alteração técnica;
- Representações alternativas (diferentes vistas dos processos de manufatura);
- 8 tipos de descrições geométricas (*wireframe* 2D e 3D, superfície geometricamente limitada, superfície topologicamente limitada, limites facetados, B-reps, formato composto, CSG);
- Representações geométricas híbridas;
- Dados que pertencem à representação visual de superfícies (cor, largura de linhas, sombreamento);
- *Features* de forma;
- Documentação do produto através de desenhos explícitos e associativos;

- Dados de simulação para a descrição de estruturas cinemáticas;
- Propriedades de componentes e ferramentas;
- Condições de superfície e tolerâncias.

Assim, os processos suportados pelo AP214 são: definição do produto, definição do estilo, projeto, prototipagem, planejamento do processo, projeto de ferramentas e dispositivos, produção de ferramentas e dispositivos e controle da qualidade.

As seguintes informações estão fora do escopo do AP214: informações de dados financeiros e de negócio para o gerenciamento do projeto; representações paramétricas; simulações cinemáticas contínuas e análise de elementos finitos.

Um exemplo de aplicação do STEP foi o desenvolvimento dos modelos 767 e 777 da Boeing, que registrou uma economia de 75% no tempo para o processamento de projetos dos fornecedores de motores usando STEP, e o programa C-17 com redução no tempo para transferência de dados da lista de materiais de semanas para minutos usando STEP (PDES, 1999).

### **IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*)**

O IGES é um padrão do *American National Standards Institute* (ANSI) para a troca de desenhos do produto, sendo o primeiro padrão amplamente usado como formato de troca de dados CAD pelos setores automotivo e máquinas rodoviárias. O IGES fornece uma definição e um formato neutro para a troca de dados específicos. Usando esse formato, torna-se possível a troca de modelos do produto na forma de representações em *wireframe*, superfícies ou sólidos. As aplicações suportadas pelo IGES incluem desenhos de engenharia tradicionais, modelos para análise e várias funções de manufatura.

A primeira versão do IGES foi adotada como um Padrão Nacional Americano (ANS Y14.26M-1981) em 1981. A versão atual, IGES 5.3, foi aprovada pelo ANSI sob as normas da U.S. Product Data Association (US Pro) em setembro de 1996. A versão 6.0 é a próxima e última versão programada deste padrão, pois assim que as melhorias no STEP se tornarem disponíveis, usuários IGES serão habilitados a migrarem para o STEP (RAVELLI, 2003).

Como os dados IGES estão no formato texto ASCII, diversos meios para a transferência do arquivo IGES podem ser usados (disquetes, Internet). Além da transferência de dados entre sistemas CAD (ou CAM), o destino pode ser um visualizador gráfico.

### **UPR (*Universal Product Representation*)**

O UPR, é um formato neutro para a troca de dados CAD, disponibilizado no mercado em 2001 pela empresa *Proficiency Inc.* Com o UPR, a empresa oferece uma solução para a interoperabilidade CAD baseada em *feature* que permite o compartilhamento da inteligência do projeto incluindo *features*, dimensões, história, restrições de montagem e outras informações (PROFICIENCY, 2004). Durante a transferência de dados entre sistemas CAD, utilizando o UPR, o conteúdo de *feature* é preservado e a inteligência de projeto é passada de um sistema para o outro. A meta do UPR é fornecer a quantidade máxima de informações do produto entre sistemas CAD.

O UPR armazena todos os níveis de dados que são gerados pelos sistemas CAD (limites facetados, B-rep, CSG). Em particular, esse formato armazena uma representação completa dos limites equivalente ao nível de geometria sólida 3D do padrão STEP. O UPR armazena também uma descrição completa dos *features* paramétricos do modelo sólido, informações de tolerâncias e dimensionamento geométrico.

O foco da empresa é permitir que as pessoas, ao longo do PDP, foquem nas suas tarefas de projeto sem se preocupar com os formatos de dados e sem perder tempo com o re-trabalho de dados. Existe também a oportunidade de criar um formato de arquivo neutro independente do sistema CAD que pode preservar dados para o uso futuro e fornecer flexibilidade em mover dados aos processos seguintes e aplicações do PDP (MACKRELL, 2004).

Esse formato também é o núcleo do portal de colaboração na Web da empresa Proficiency. O portal inclui um histórico de trabalho para todas as traduções realizadas. Informação em nível de *feature* e propriedades físicas são gravadas para a importação e exportação. Dessa forma, torna-se possível verificar a qualidade da conversão. Através do portal, a empresa fornece uma solução para a tradução de arquivos CAD, que suporta a tradução de arquivos através de quatro aplicações CAD: CATIA, I-DEAS, Pro/Engineer e Unigraphics (RAVELLI, 2003).

Além do portal, a empresa oferece também o software UPRViewer, que permite que todos os membros do time de desenvolvimento visualizem a inteligência do projeto extraída para o UPR, mesmo sem ter acesso ao software CAD. O visualizador UPR mostra a árvore completa de histórico de *features* e permite aos usuários navegar pelo modelo obtendo informações de como foi criado (PROFICIENCY, 2004).

### **Visualização do produto – formatos de representação por limites triangulares**

Formatos neutros de visualização de imagens 3D (representação por limites triangulares) podem ser bastante úteis na integração de sistemas que requerem somente a “carcaça” do modelo do produto, sem a necessidade de informações adicionais tais como atributos e parâmetros de manufatura. Esses formatos podem ser aplicados na interface de software de gerenciamento de dados em ambiente Web, para rápida identificação das características morfológicas do produto bem como na interface não associativa com aplicativos de diferentes fornecedores (RAVELLI, 2003).

Várias alternativas estão disponíveis no mercado. Dentre elas, o formato STL (*Stereo Lithography*) que foi desenvolvido pela Albert Consulting Group for 3D Systems, em 1987, e tinha como foco inicial a transferência de dados de componentes para os sistemas de planejamento do processo de prototipagem rápida (estereolitografia).

O formato STL representa um modelo 3D por meio de limites triangulares do objeto, sendo que o triângulo é a forma poligonal convexa mais simples. As vantagens associadas ao uso desse formato são (MARSAN et al., 1998): facilidade de conversão de um modelo CAD 3D para o formato STL; e a maioria das representações 3D pode ser convertida em um formato de limites triangular.

Segundo Ravelli (2003), por essas vantagens, o STL é freqüentemente usado como um formato para armazenamento de informações internamente no sistema de Planejamento de Processos, juntamente ao uso para transferência do modelo. Por outro lado, algumas desvantagens podem ser associadas ao uso destes formatos: problemas causados pela aproximação por limites triangulares; problemas relacionados ao formato em si; e problemas relacionados ao algoritmo de transferência e conversão de dados.

Outros exemplos de formatos que se enquadram nesta categoria são: STH (*Surface Triangles Hinted*), CFL (*Cubital Facet List*) e RPI (*Rensselaer Polytechnic Institute*).

Apesar dos formatos de visualização simplificada 3D terem sido desenvolvidos inicialmente para servir como formato de troca de dados para o processo de estereolitografia eles têm servido bem a indústria, pois o princípio de representação triangular tem sido razoavelmente compatível com as representações usadas pela maioria dos sistemas CAD (MARSAN et al., 1998).

### **SDX (*Simulation Data eXchange*)**

O padrão SDX permite o intercâmbio de dados entre pacotes de software relacionados à simulação. O SDX foi criado pela empresa *Engineering Animation Inc* (EAI), subsidiária da UGS, visando proporcionar uma maneira para os usuários CAD enviarem informações de layout de fábrica diretamente aos sistemas de simulação, sem ter que recriar esta informação manualmente. O propósito básico deste formato é desenvolver um método automatizado e consistente de geração de modelos de simulação e animações de modelos 3D diretamente de desenhos CAD (MOORTHY, 1999).

O formato de arquivo SDX foi originalmente desenvolvido como um formato de dados comum para gerar modelos de simulação de eventos discretos e animações 3D diretamente de desenhos CAD. Em SDX, atributos de arquivos ou propriedades de objetos ou categorias de informações são definidas entre *tags* de início e fim. O arquivo SDX é um bom início de formato neutro de arquivo para dados de simulação, mas também tem limitações e problemas de compatibilidade. Uma abordagem mais promissora parece ser o XML que está começando a mostrar sucesso (MCLEAN et al., 2003)

O padrão SDX inclui um número de objetos CAD inteligentes para o projeto de layout de fábricas (esteiras, prateleiras, pontes rolantes, mesas, caçambas e mezaninos) que contêm dados relevantes de simulação, tais como tempo de falha, tempo para reparos, taxas de refugo, velocidades de esteiras, junções de esteiras, veículos automáticos, entre outros. Uma rotina de extração inteligente exporta detalhes do objeto, como o tipo do objeto (máquina, esteiras, área de armazenamento, por exemplo), a localização do objeto, e outros parâmetros físicos, assim como dados relevantes de simulação descritos anteriormente, para um arquivo texto no formato XML. Este arquivo elimina a necessidade de fisicamente recriar e executar informações de controle no pacote de simulação dinâmica.

Além disso, o conceito do SDX não requer a troca de dados gráficos para o sistema de simulação. Os objetos SDX podem ser representados nas ferramentas de simulação com suas capacidades gráficas nativas, de maneira a sincronizar gráficos correspondentes obtidos através de tabelas de mapeamento. outra aplicação importante desse formato é a troca de dados entre softwares de simulação de eventos discretos e softwares de visualização.

### **VRML (*Virtual Reality Modeling Language*)**

A VRML é uma linguagem orientada a objeto, estruturada através de um número de arquivos, cada um contendo uma coleção de objetos VRML (Banerjee & Zetu, 2001). É o formato padrão internacional de arquivo para descrever as multimídias 3D interativas na Internet, Intranet e sistemas locais. O formato VRML é capaz de representar objetos multimídia e 3D estáticos e dinâmicos com “hyperlinks” para outros objetos tais como texto, som, filmes e imagens.

O VRML tem sido adotado desde outubro de 1994, passando desde então por várias atualizações (VRML 1.0, VRML 2.0, VRML97 e mais recentemente a primeira versão *draft* da Especificação X3D) para permitir que conteúdos mais complexos e interativos sejam representados. O formato VRML pode ser usado em forma de texto, que pode ser lido pelo homem.

O consórcio Web3D, uma associação sem fins lucrativos, que foi fundado para criar e desenvolver padrões que permitam a comunicação 3D em tempo real entre aplicações, redes e serviços web liderou o desenvolvimento das especificações VRML e está incluindo as especificações X3D (*Extensible 3D*), que é a nova versão do VRML, usando a XML (WEB3D CONSORTIUM, 2002). O X3D tende a ser o novo formato ou linguagem que será usada e requerida por mundos interativos 3D na web, substituindo o VRML97. O arquivo é codificado em XML, e assim ele pode ser estendido, tornando o X3D mais flexível que os seus predecessores.

### **DXF (*Data eXchange Format*)**

O DXF é um padrão originalmente desenvolvido pela Autodesk Inc., sendo bastante utilizado para trocar dados 2D/3D *wireframe*. Segundo Ravelli (2003), um arquivo DXF é uma representação completa da base de dados extraída do AutoCAD e, dessa forma, algumas características não podem ser usadas por outros sistemas CAD. O DXF suporta *wireframe*, superfície e representações sólidas.

Arquivos DXF são arquivos textos simples que podem ser lidos ou modificados na maioria dos processadores de textos. Apesar do formato DXF ser bastante utilizado para *layouts* de fábricas, esse formato não atende aos requisitos da troca de dados da Manufatura Virtual. Além disso, a especificação é de propriedade da Autodesk e não está disponível no domínio público. Sendo assim, o DXF não será considerado no capítulo 5 como alternativa de formato para a troca de dados no ambiente de Manufatura Virtual que será proposto.

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos envolvidos na utilização da Manufatura Virtual, destacando os paradigmas Projeto, Produção e Controle que definem o escopo deste trabalho para a realização da análise da utilização da Manufatura Virtual e para o desenvolvimento do Modelo Proposto. Ressaltou-se também um dos maiores desafios para a implementação da Manufatura Virtual que é o uso integrado das tecnologias da Manufatura Virtual e a troca de informações neste ambiente, questão esta que também será abordada no capítulo 5.

#### 4. APRESENTAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

A metodologia de pesquisa utilizada para a realização desta tese é o estudo exploratório de caráter qualitativo pois o trabalho contribui para tornar mais explícito a utilização da Manufatura Virtual no PDP. Para tanto, através da revisão bibliográfica e da realização de estudos de caso, um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP é proposto (denominado Modelo Proposto), e é utilizado como base para a análise da utilização da Manufatura Virtual.

O estudo de caso é utilizado pois, segundo Yin (1989), esse método permite investigar fenômenos contemporâneos dentro do contexto da vida real quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são muito claras. Além disso, é um método adequado no caso da realização de generalizações em termos de proposições teóricas quando o objetivo do pesquisador é expandir e generalizar teorias e não enumerar frequências.

Como a Manufatura Virtual é ainda uma abordagem nova o estudo de caso foi o método adotado com o objetivo de averiguar e compreender como ela tem sido aplicada em casos reais, analisando a relação entre a Manufatura Virtual e o PDP e, assim, obter informações adicionais para a proposição do modelo e para a análise da sua utilização. Os casos escolhidos para o estudo envolvem empresas que buscam novas abordagens para suprir deficiências e alcançar melhorias nos seus PDPs para reduzir *lead times* de desenvolvimento, custos e elevar a qualidade dos produtos.

Dessa forma, foram realizados dois estudos de caso, que permitiram presenciar a implementação da Manufatura Virtual nas empresas:

- *Estudo de caso 1* em uma empresa multinacional para o acompanhamento do início de um programa de implementação da Manufatura Virtual;
- *Estudo de caso 2* em um instituto de pesquisa no exterior para o acompanhamento de projetos de implementação da Manufatura Virtual em diferentes empresas.

Esses estudos estão descritos a seguir.

#### **4.1. Estudo de Caso 1: empresa multinacional**

A primeira etapa da pesquisa de campo foi realizada dentro do convênio Universidade – Empresa, através do estudo realizado durante o período de um ano, que teve como principal objetivo o acompanhamento da fase inicial de um programa de implementação da Manufatura Virtual em uma empresa multinacional do setor automobilístico.

O escopo deste estudo de caso foi basicamente o acompanhamento, como convidada, das reuniões dos times envolvidos na implementação da Manufatura Virtual possibilitando, dessa forma, verificar o andamento do projeto, como estava sendo realizada a sua implementação, quais eram os requisitos iniciais identificados e as dificuldades encontradas.

Para a coleta de dados, vários instrumentos de pesquisa foram utilizados. Além da observação dos fatos, o acompanhamento do projeto foi também possível através de análises de documentos, discussão com pessoas envolvidas no projeto e uso de uma rede de conhecimentos - *knowledge network* - via Intranet para a obtenção e troca de informações sobre as atividades e testes pilotos que estavam sendo realizadas em nível corporativo, ou seja, em outras unidades estrangeiras da empresa.

##### **Caracterização do PDP existente na empresa e necessidades identificadas**

O processo de desenvolvimento de produtos na empresa era caracterizado por um modelo de referência denominado “Processo de Introdução de um Novo Produto”. As atividades de desenvolvimento eram subdivididas em três grandes etapas:

- Definição do Conceito;
- Desenvolvimento;
- Produção e Suporte.

O principal problema identificado no PDP da empresa estava relacionado à comunicação ineficiente e pouca integração entre projeto do produto, definição dos processos de manufatura e produção. Esse fato resultava em um grande número de mudanças no projeto verificadas somente nas fases finais do PDP (planejamento do processo e produção), o que, por sua vez, estava elevando os custos de desenvolvimento e o *time to market* da empresa.

A causa principal dessa falha de comunicação e integração entre as atividades do PDP estava relacionada ao fato de que a maioria destas atividades caracterizava-se por ser manual e suportada por uma variedade de sistemas de software tanto corporativos quanto desenvolvidos localmente e que não atuavam de modo integrado. Além da falta de integração dos softwares, os sistemas existentes na empresa não apresentavam outras funcionalidades necessárias como: simulação e visualização dos produtos e dos processos; suporte às rotinas alternativas para o planejamento da manufatura e do chão-de-fábrica; programação baseada em *feature* e seleção de ferramentas baseadas em *feature*; gerenciamento de ferramentas de máquina; *workflow* global e contínuo; e colaboração eletrônica. Além disso, alguns dos sistemas existentes encontravam-se em risco de desativação por serem obsoletos ou pela dificuldade de suporte, principalmente no caso dos sistemas proprietários.

#### **Motivos para a implementação da Manufatura Virtual na empresa**

A implementação da Manufatura Virtual consistia em um projeto de âmbito corporativo que era visto pela companhia como um item de ação para alcançar o desenvolvimento integrado do produto e do processo. A estratégia deste projeto era desenvolver e fabricar um produto eletronicamente antes de construí-lo fisicamente na fábrica, por meio de um ambiente composto por um conjunto integrado de soluções.

Para tanto, o objetivo principal do projeto de implementação da Manufatura Virtual era substituir os sistemas corporativos e os sistemas locais utilizados pelos processos de engenharia e de manufatura por um novo ambiente composto por vários sistemas integrados e que oferecessem as funcionalidades necessárias.

Esse novo ambiente permitiria a visualização e a simulação dos produtos e dos processos e possibilitaria que os planos de processos fossem criados corretamente na primeira vez. Além disso, proporcionaria a colaboração eletrônica por toda a empresa estendida (fornecedores, clientes e vendedores).

Para a configuração deste ambiente, foi realizada uma análise de diversos softwares comerciais e selecionados os melhores softwares encontrados para cada área específica de aplicação. Depois de selecionados, a empresa deveria projetar, desenvolver, validar e implementar interfaces entre os softwares. Isso permitiria às pessoas de todas as áreas da empresa a transferência e o compartilhamento de informações de vários sistemas de software com relação ao projeto e manufatura.

### **PDP em ambiente de Manufatura Virtual**

Como mencionado anteriormente, o foco principal do projeto de implementação da Manufatura Virtual era fornecer uma estratégia corporativa para integrar os vários processos de engenharia e de manufatura que produzem um método planejado.

Dessa forma, o ambiente de Manufatura Virtual consistia na utilização de sistemas para a realização das seguintes atividades: elaboração dos planos de processos macro e detalhado, tanto de processos de fabricação como de montagem; identificação de recursos de máquinas, ferramentas, dispositivos; programação de controle numérico de máquinas de usinagem, robôs, máquinas de medição; validações através de simulação e realidade virtual.

A companhia dividiu o projeto de implementação da Manufatura Virtual em quatro grandes áreas de aplicação que deveriam estar integradas entre si e integradas com o sistema de projeto do modelo sólido do produto. São elas:

#### ***1. Planejamento dos Processos***

Esta área era responsável pela elaboração de um processo completo de manufatura e identificação dos componentes que definem o produto, ou seja, consistia na descrição de como os produtos devem ser fabricados usando os recursos disponíveis e de quais elementos eram compostos. Um sistema de Planejamento do Processo integrado a outras aplicações deve permitir ao usuário elaborar as instruções de trabalho para um processo específico e deve ter capacidade para: criar a lista de materiais - BOM (*Bill of Materials*); definir a seqüência de operações a serem realizadas; definir as máquinas ou estações de trabalho; definir tempo de ciclo das operações; elaborar instruções de trabalho para processos de fabricação, processos de montagem, entre outras.

#### ***2. Gerenciamento de Recursos***

A principal tarefa da área gerenciamento de recursos era avaliar os recursos de chão-de-fábrica visando determinar se eram suficientes para atender aos requisitos dos planos de processos. Além disso, essa área envolvia atividades como elaborar o layout das células de trabalho; catalogar, selecionar, armazenar e gerenciar ferramentas, dispositivos e calibradores existentes; projetar ferramentas e dispositivos necessários; elaborar ordens de serviço para realização de atividades de chão-de-fábrica.

### 3. *Programação de Controle Numérico*

Esta área era responsável pela programação de máquinas de controle numérico (por exemplo, centros de usinagem, tornos), programação de robôs, programação de máquinas de medição e desenvolvimento de pós-processadores.

### 4. *Simulação e Visualização*

O objetivo principal desta área de aplicação era fornecer suporte às demais áreas. Para tanto, diversos tipos de simulação foram incluídos como, por exemplo, simulação de processos de fabricação, de montagem, do layout, do fluxo de material, de robôs, de programas de controle numérico, da trajetória de ferramentas de usinagem, de eventos discretos e da ergonomia. A visualização do produto e da fábrica também estava inserida nesta área.

### **Arquitetura do ambiente de Manufatura Virtual**

A implementação do projeto de Manufatura Virtual previa o uso de um ambiente flexível baseado na web que permitisse comunicações multi-direcionais entre os usuários da empresa e a empresa estendida. O sistema compartilharia uma interface comum intuitiva e poderia fornecer a integração requerida para a Manufatura Virtual.

Os seguintes aplicativos de software estavam sendo analisados para a composição do ambiente: projeto do produto, configuração do produto, planejamento dos processos, gerenciamento de recursos, programação de controle numérico, verificação e validação CN, simulação de robô, layout de fábrica, análise do fluxo de materiais e simulação ergonômica. Estes aplicativos forneceriam suporte às áreas de aplicação mencionadas anteriormente. Grande parte destes aplicativos foi selecionada do mercado comercial de softwares e outros estavam sendo customizados para alcançar os requisitos e necessidades da empresa.

Esse ambiente colaborativo teria como base um sistema PDM (*Product Data Management*) que ajudaria no gerenciamento de todos os processos, aplicações e informações necessárias para o projeto e manufatura de um produto. O sistema PDM deveria agir reduzindo a duplicação de dados, auxiliando na distribuição de dados, no controle de revisões e no acesso aos dados, auxiliando a construção e a modificação da lista de materiais, o gerenciamento dos processos e dos procedimentos e facilitando a integração com o sistema ERP. O sistema também poderia ser usado para gerenciar

arquivos de projeto do produto, estrutura do produto, *workflow*, configuração e para permitir a visualização.

Um dos sistemas que estava sendo desenvolvido era o aplicativo de planejamento dos processos de manufatura e de montagem. Este aplicativo estava sendo visto como uma extensão integrada do sistema PDM e possibilitaria a visualização integrada do produto, operações, área de trabalho e ferramentas. Clicando em uma peça na montagem, por exemplo, ela se destacaria na lista de materiais (BOM). O inverso também aconteceria, ou seja, ao clicar em uma peça na lista de materiais essa seria destacada na montagem do produto. O sistema deveria alocar cada ferramenta, área de trabalho e montagem em um objeto que poderia ser usado como ambiente visual para a realização de simulações como, por exemplo, simulação ergonômica.

Todo esse ambiente seria utilizado através de um portal do PDM contendo todos estes aplicativos necessários para realizar as atividades de engenharia e manufatura. Através deste ambiente, as aplicações poderiam interagir entre si e atuarem de forma integrada. A versão web estaria disponível para facilitar o acesso de todos os colaboradores da empresa. E ainda todo esse ambiente estaria integrado com o projeto do modelo sólido.

### Como a Manufatura Virtual estava sendo implementada

A implantação de um ambiente integrado, como o proposto pela Manufatura Virtual, foi uma decisão estratégica da corporação e o plano global de desenvolvimento do projeto na corporação consistia em realizar:

- Definição de itens de ação por cada unidade da empresa;
- Educação, treinamento, demonstração, suporte e recomendações às unidades da empresa;
- Testes e implementações piloto em unidades escolhidas pelos líderes do projeto com o objetivo de analisar aplicativos comerciais, suas funcionalidades e dificuldades de implementação;
- Trabalho com vendedores de software para melhorar o ambiente e para o desenvolvimento conjunto de um plano de implementação contendo todos os aplicativos de softwares que seriam utilizados no ambiente proposto;
- Transferência de tecnologia para o departamento responsável pelos sistemas de informações da corporação;
- Transferência de tecnologia e de pessoas para as unidades.

Os itens de ação que foram definidos por cada unidade da corporação consistiam em:

- (a) identificar os benefícios proporcionados pela aplicação da Manufatura Virtual para cada unidade da empresa (valor agregado, redução de custos, custos que seriam evitados);
- (b) definir os times de trabalho para cada uma das áreas de aplicação: planejamento dos processos e da montagem, gerenciamento de recursos, programação de controle numérico e simulação;
- (c) identificar os requisitos e necessidades de cada uma dessas áreas para cada unidade da empresa.

Os times de trabalho de cada unidade da empresa realizaram uma análise inicial para identificar o modelo de PDP existente na unidade incluindo atividades desde o entendimento da peça até a sua produção. Dessa forma, foi possível identificar o fluxo de informações de entrada e saída entre as atividades e os sistemas de softwares utilizados. Um modelo desejado para esse processo, dentro do contexto da Manufatura Virtual, foi definido e cada unidade deveria avaliar o “gap” existente entre os modelos (existente e desejado com o Manufatura Virtual) e identificar as ações necessárias para atingir o modelo objetivo.

Além disso, a natureza e o tamanho do projeto de implementação da Manufatura Virtual fez com que empresa subdividisse o projeto da Manufatura Virtual em sub-projetos (projetos menores) criados a partir de requisitos específicos mais detalhados. Dessa forma, pôde-se, mais apropriadamente, estimar os recursos necessários, definir cronogramas de implementação e entregar o projeto em tempos menores, com melhor desempenho e a um custo mais baixo.

#### **4.2. Estudo de Caso 2: instituto de pesquisa no exterior**

A segunda parte da pesquisa de campo foi realizada através do doutorado sanduíche, realizado no exterior durante o período de março à agosto de 2003, no instituto italiano de pesquisa “*Istituto di Tecnologie Industriali e Automazione (ITIA)*” que faz parte do “*Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)*”, localizado em Milão.

O instituto divide-se em quatro grupos de pesquisa: *Parallel Kinematic Machines (PKM)*, *Virtual Manufacturing Environment (VME)*, *Evolving Extended Enterprise (EEE)* e *Virtual Engineering Design (VDE)*. O foco principal dos projetos de

pesquisa desenvolvidos pelo grupo VME é a aplicação da Realidade Virtual no desenvolvimento de produtos e de processos produtivos e na educação e treinamento de pessoas. Além disso, o grupo desenvolve ambientes integrados de simulação para planejamento e projeto de fábrica. Esses projetos são realizados por meio de cooperações com universidades e indústrias em nível nacional e internacional.

O estudo de caso teve como propósito acompanhar diferentes projetos de desenvolvimento e aplicação de ambientes de Manufatura Virtual no processo de desenvolvimento de produtos e processos produtivos, com a finalidade de vivenciar e compreender o uso da Manufatura Virtual em casos reais de aplicação e, assim, complementar a pesquisa de doutorado.

Para alcançar esse objetivo, dois projetos foram acompanhados mais detalhadamente:

- **Projeto A** - Desenvolvimento de uma solução integrada e virtual para suporte às atividades de criação, projeto e marketing do produto – que estava sendo desenvolvido pelo instituto em parceria com uma empresa desenvolvedora de motocicletas.
- **Projeto B** - Desenvolvimento de produtos através da integração de tecnologias de prototipação rápida e modelagem virtual – que fazia parte de programa internacional de pesquisa envolvendo institutos de pesquisa, universidades e empresas do setor de eletrodoméstico.

Os projetos A e B estão descritos a seguir.

*Projeto A: Desenvolvimento de uma solução integrada e virtual para o suporte às atividades de criação, projeto e marketing de produtos*

O Projeto A estava sendo desenvolvido pelo instituto em parceria com uma empresa desenvolvedora de motocicletas e no momento em que foi iniciado o estudo de caso no instituto, encontrava-se em uma fase inicial de suas atividades, mais especificamente na fase de planejamento, análise e definição dos requisitos da empresa. O propósito foi o acompanhamento de um projeto desde o seu início e desde a identificação e levantamento das necessidades da empresa para a adoção da Manufatura Virtual. Dessa forma, tornou-se possível compreender como é feita a tomada de decisão em direção à implantação de um ambiente virtual, a identificação das necessidades para a implantação da Manufatura Virtual, as dificuldades iniciais e benefícios esperados.

Porém, os projetos desenvolvidos pelo instituto são realizados em um prazo de aproximadamente de 3 a 4 anos e, dessa forma, não foi possível participar do projeto até a sua conclusão.

O acompanhamento deste projeto foi realizado através da participação nas reuniões com os profissionais da empresa, da participação na definição das atividades de planejamento, análise e desenvolvimento do projeto e de visitas à empresa para compreender o PDP existente e identificar as necessidades iniciais.

### **Objetivo do Projeto**

O Projeto A tinha como objetivo fornecer à empresa uma solução integrada e dedicada às suas necessidades para o suporte à decisão durante, principalmente, as atividades de criação, projeto e marketing dos produtos, permitindo a visualização eficaz dos dados do produto. Essa solução seria composta de um conjunto de ferramentas tais como CAD, simulação e realidade virtual, proporcionando, assim, um ambiente de desenvolvimento de produtos mais confiável para a tomada de decisões.

O primeiro passo para o desenvolvimento desse projeto foi o seu planejamento. Após algumas reuniões com os responsáveis da empresa e a definição dos objetivos do projeto, foi feito um planejamento das atividades que deveriam ser realizadas para atingir os objetivos e um cronograma de realização destas atividades foi definido. Dessa forma, as atividades que compõem o projeto se articulam em duas principais fases: (a) Análise e Planejamento; e (b) Desenvolvimento. Essas atividades estão descritas a seguir.

#### **(a) Análise e Planejamento**

A fase de análise e planejamento consistia na realização de quatro atividades:

- *Análise do ambiente de desenvolvimento de produtos existente na empresa:* modelagem do PDP existente na empresa através da metodologia IDEF0 (*Integration Definition for Function Modeling*); identificação das ferramentas de suporte utilizadas nesse processo; levantamento dos pontos críticos encontrados no PDP; identificação das atividades de desenvolvimento que podem ser otimizadas com o uso de novas tecnologias.
- *Análise do mercado de ferramentas e aplicativos de software:* identificação e análise das ferramentas e aplicativos oferecidos pelo mercado, que poderiam ser usados no contexto da empresa; análise das suas funcionalidades, benefícios e restrições.

- *Análise das empresas concorrentes*: identificação dos principais concorrentes da empresa nos diversos segmentos de mercado; análise das relações existentes entre a empresa e seus concorrentes, identificando a existência de relacionamentos de parceria no desenvolvimento de produto ou de troca de informações; identificação das ferramentas e tecnologias utilizadas pelos concorrentes como suporte ao processo de desenvolvimento.

- *Planejamento das atividades de desenvolvimento*: definição de um plano detalhado das atividades da fase de Desenvolvimento; desenvolvimento de um gráfico de Gantt, apresentando a seqüência das atividades, as relações existentes e a programação das atividades ao longo do tempo.

### **(b) Desenvolvimento**

A fase de desenvolvimento consistia na configuração e implementação da solução identificada para atender as necessidades da empresa. Uma das premissas adotadas foi que a solução proposta deveria ser implementada gradualmente. Esta fase consistia na realização das seguintes atividades:

- *Definição do novo ambiente de desenvolvimento*: definição do ambiente de PDP que faria uso de ferramentas e aplicativos de simulação, realidade virtual e experimentação. Esse ambiente deveria ser dedicado ao produto e processos da empresa.

- *Definição da arquitetura*: criação de uma infra-estrutura que permitisse a interoperabilidade de dados entre as ferramentas e aplicativos que formariam o novo ambiente de desenvolvimento proposto pela metodologia; integração do ambiente com a infra-estrutura existente na empresa ou em fase de implantação, como, por exemplo, o sistema PDM que a empresa estava implantando.

- *Customização das ferramentas e aplicativos*: no caso de usar ferramentas de softwares comerciais no novo ambiente de desenvolvimento, a definição e a implementação de customizações destas ferramentas seria necessário.

- *Desenvolvimento “ad hoc” do ambiente de realidade virtual*: projeto, implementação e validação do ambiente de realidade virtual desenvolvido para fornecer suporte às atividades críticas do processo de desenvolvimento.

- *Treinamento dos funcionários da empresa*: preparação e treinamento dos usuários da empresa na utilização das tecnologias e ferramentas.

Durante o estágio, foi possível acompanhar o início das atividades da fase de Análise e Planejamento. A seguir, apresenta-se o resultado inicial que foi obtido durante a realização do estágio.

### **Caracterização do PDP na empresa**

A atividade de análise do ambiente de desenvolvimento de produtos da empresa foi realizada através de visitas à empresa e reuniões com funcionários envolvidos no processo de desenvolvimento de produtos visando conhecer o modelo do PDP utilizado. Durante esta atividade, pôde-se verificar que não existia na empresa um modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produto contendo etapas e atividades formalmente definidas.

Porém, pôde-se caracterizar o PDP em três etapas principais:

- Definição do estilo do produto
- Projeto CAD / CAM
- Verificação e validação

Dentre estas três etapas, o principal foco para a aplicação de ambientes virtuais era a definição do estilo do produto. Esta etapa, iniciava-se com a geração de uma nova idéia para o produto. Depois de consolidada essa idéia, algumas alternativas de esboços 2D eram desenvolvidos. Reuniões eram feitas para discutir os esboços, na qual o time técnico analisava o que estava sendo proposto e discutia com o projetista questões sobre onde posicionar os principais sistemas do produto como, por exemplo, o motor e a bateria. Depois de ter escolhido o esboço que continuaria a ser desenvolvido, iniciava-se a atividade de construção da maquete. Para construir a maquete, fazer verificações, analisar e fazer modificações o time gastava de 5 a 6 meses. Depois da maquete pronta, ela era digitalizada através de fotografia e o projeto do produto passava por um maior detalhadamente.

### **Necessidades iniciais identificadas no PDP existente**

Como mencionado, o principal foco para o uso da Manufatura Virtual na empresa é a etapa de definição do estilo do produto. Durante esta etapa, os seguintes pontos críticos foram identificados: (a) a atividade de definição do estilo do produto era crítica e de grande potencial para o uso de ambientes virtuais; (b) o processo de construção da maquete era longo, não era confiável e não possibilitava a análise de muitas variáveis; (c) o projeto do estilo não era integrado com a etapa de projeto

detalhado, pois somente após a finalização da maquete e a sua aprovação, que era dado início ao projeto detalhado; (d) a avaliação eficaz do projeto não era possível, pois faltavam ferramentas eficazes de suporte à decisão e apresentação do produto.

Além destes pontos críticos identificados durante a definição do estilo, pôde-se identificar outras duas atividades de grande potencial para a aplicação da Manufatura Virtual: a simulação computacional do comportamento dinâmico do produto pois vários problemas eram encontrados no projeto pelo fato da empresa não simular apropriadamente a funcionalidade do produto; e a simulação da aerodinâmica sendo que, em muitos casos, após testes com o protótipo físico do produto verificava-se que a motocicleta não apresentava uma estabilidade adequada.

### **Resultados inicialmente pretendidos com a Manufatura Virtual**

Dentre os vários benefícios, pretendia-se alcançar uma solução que permitisse à empresa: construir rapidamente um modelo 3D do produto que fosse confiável e permitisse análises mais eficazes durante a tomada de decisões; minimizar as falhas e erros de projeto através do uso de um ambiente virtual para a apresentação, a análise e a validação do estilo do produto; integrar a simulação da funcionalidade e da aerodinâmica do produto nesse ambiente proposto.

Um dos benefícios esperados com o uso desse ambiente era utilizar protótipos virtuais para proporcionar aos projetistas, engenheiros, gerentes, clientes, e demais pessoas envolvidas no PDP a habilidade de “entrar” no projeto, mover-se entre os seus elementos e interagir com o produto, manipulando-o da mesma forma como seria explorado o *mockup* físico no mundo real.

### ***Projeto B - Desenvolvimento de produtos através da integração de tecnologias de prototipação rápida e modelagem virtual***

No momento da realização do estudo de caso no exterior, este projeto encontrava-se na sua fase de conclusão e, dessa forma, pôde-se verificar em todas as suas fases quais as necessidades identificadas, quais as limitações e dificuldades encontradas e os principais benefícios identificados.

Para a análise deste projeto, muitas informações tiveram que ser recuperadas e analisadas através de relatórios, artigos e discussão com pessoas envolvidas.

### **Objetivo do Projeto**

O objetivo principal deste projeto foi o desenvolvimento de uma solução integrada usando realidade virtual e prototipagem rápida para o projeto de produtos do setor industrial de eletrodomésticos, possibilitando a integração das atividades de: *definição das características estéticas e funcionais* do produto, com base nas informações de mercado; *prototipagem* do produto em um objeto com características mais próximas possíveis do produto final; e *realização de testes estético e funcional* para medir o desempenho do produto em diversas condições de operação.

Para alcançar este objetivo, o projeto consistia principalmente na realização das seguintes atividades:

- Desenvolvimento de um ambiente de realidade virtual para a validação da estética e da funcionalidade do produto com relação ao usuário (acessibilidade, manutenibilidade, simplicidade de uso);
- Definição de um ambiente integrado de PDP dentro do qual seria possível tratar diferentes problemas relacionados à funcionalidade, fabricabilidade, resistência e rumor utilizando análises computacionais;
- Integração do ambiente acima com o software de controle eletrônico do eletrodoméstico;
- Desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão para a escolha das tecnologias de prototipagem rápida para a construção de protótipos;
- Desenvolvimento de modelos de comportamento dos materiais poliméricos que fossem submetidos a solicitações estáticas e dinâmicas.

O principal papel do ITIA – CNR nesse projeto foi desenvolver o ambiente de realidade virtual para suporte à validação da estética, ergonomia e funcionalidade do eletrodoméstico.

### **Caracterização do PDP na empresa**

O PDP da empresa era definido através de um processo formal denominado Processo Integrado de Desenvolvimento de Produtos e era composto de três etapas:

- a.) Especificação do projeto e pré-engenharia;
- b.) Industrialização do projeto;
- c.) Produção.

Estas etapas eram, por sua vez, subdivididas em atividades. A *especificação do projeto e pré-engenharia* era caracterizada por um processo interativo composto de três

atividades: planejamento do projeto, definição do plano de negócios e do conceito do produto e verificação do conceito.

Durante a *industrialização do projeto*, o processo era mais seqüencial e composto de três atividades: engenharia do produto e do processo, verificação do processo e início da produção e lançamento do produto no mercado.

Por fim, a *produção* consistia na realização das seguintes atividades: verificação do andamento e êxito das atividades precedentes e análise dos desvios das metas previstas e certificação de que o processo produtivo está apto para entrar em um regime completo de produção.

### **Principais necessidades identificadas no PDP existente**

Depois de analisar o PDP da empresa, foram identificadas algumas áreas principais de interesse para a imersão em ambientes virtuais como, por exemplo, a fase de definição do conceito do produto, a realização de verificações de projeto e a apresentação do produto ao mercado, gerentes e diretores. Além destas fases, o uso de um ambiente integrado de Manufatura Virtual também seria útil à empresa na realização das atividades de prototipação do produto.

Além dessas fases potenciais para aplicar a Manufatura Virtual, um dos principais problemas no PDP da empresa era a atividade de prototipação rápida. Após a fase de projeto, o protótipo era construído, através da técnica de estereolitografia, usando um material polimérico com propriedades diferentes das propriedades do material que seria usado na produção real ou, ainda, era construído usando material final através das tecnologias tradicionais de processo (normalmente estampagem do produto).

No primeiro caso, o protótipo não podia ser submetido a testes de solicitação mecânica em condições reais de uso pois as propriedades do polímero eram diferentes das propriedades do material real e, dessa forma, não era possível a extrapolação através de modelos físicos. No segundo caso, era possível avaliar a funcionalidade do protótipo mas os custos da estampagem e o longo tempo de construção faziam com que o projetista limitasse ao mínimo necessário as propostas de modificações para melhorias estruturais. Em ambos os casos, as características funcionais obtidas dos componentes raramente permitiam montá-los no produto final para ser testado em condições de uso real.

Isso tudo resultava em elevados custos de prototipação, longo tempo para a introdução de novos produtos, baixa eficiência de projeto, pelo fato de não ter um

rápido *feedback* de controle e não contar com a otimização das possibilidades (em relação às propriedades do material e à potencialidade dos instrumentos de cálculo) e a grande variação entre o projeto e o produto final, o que dificultava o controle da qualidade.

### **PDP em ambiente de Manufatura Virtual**

Considerando o PDP existente na empresa, seus pontos críticos e resultados esperados, o objetivo do projeto era desenvolver um ambiente integrado e virtual para o desenvolvimento de eletrodomésticos. Esse ambiente foi alcançado com a implementação de uma metodologia para o uso da nova abordagem de desenvolvimento de produtos (figura 12). A metodologia está detalhadamente descrita a seguir.

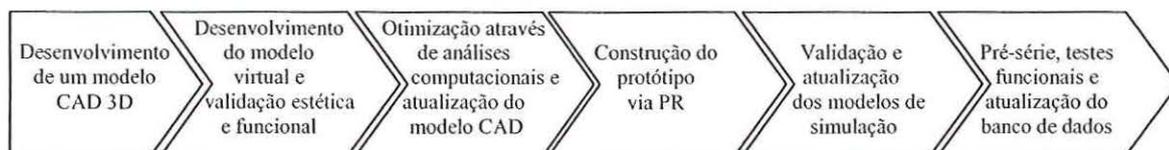


Figura 12 – Metodologia para a nova abordagem de desenvolvimento de produtos

- ***Desenvolvimento de um modelo CAD 3D.***

Um dos primeiros passos para o desenvolvimento de produtos no ambiente proposto é a modelagem do produto com base nas características estéticas e funcionais desejadas. Para tanto, o seguinte procedimento foi definido:

- Desenvolvimento do modelo do produto por meio de um software CAD 3D, que permitisse a representação de todos os elementos estéticos do eletrodoméstico;
- Inclusão de uma base de dados anexada ao modelo, contendo os requisitos funcionais dos componentes e sistemas;
- Desenvolvimento dos modelos nos quais seriam definidas as funções dos subsistemas (hidráulico, elétrico e mecânico) e as características de todos os componentes e sub-componentes mecânicos que compõem o produto;
- Divisão dos componentes mecânicos em duas classes: componentes de produção corrente, que já existem e não requerem modificação e componentes novos a serem desenvolvidos;
- Para os componentes novos seria desenvolvido um projeto com base nos critérios estéticos e funcionais requeridos.

- ***Desenvolvimento do modelo virtual e avaliação das características estéticas e funcionais.***

Durante esta fase da metodologia o modelo virtual (representação 3D do produto e/ou de seus componentes) deve ser definido tendo como base o modelo CAD 3D desenvolvido na atividade anterior. As seguintes tarefas devem ser realizadas:

- Definição das interfaces do modelo com os sistemas para a realidade virtual imersiva como, por exemplo, capacetes e luvas;
- Desenvolvimento do modelo virtual empregando códigos de cálculo existentes.
- Validação estética e funcional do modelo no ambiente virtual.

- ***Otimização do produto através de análises computacionais e atualização do modelo CAD.***

Após a validação da estética e funcionalidade do produto por meio da RV, o sistema pode ser otimizado através do uso de diversos tipos de análises computacionais. Durante esta atividade, torna-se importante compreender os fenômenos físicos envolvidos e avaliar as soluções alternativas até alcançar uma solução ótima que satisfaça os requisitos do ponto de vista funcional e econômico. Assim, torna-se necessário executar as seguintes tarefas:

- Compreensão dos fenômenos físicos envolvidos;
- Seleção das ferramentas mais adequadas para cada tipo de análise;
- Definição de modelos para o estudo e otimização do comportamento físico a partir do modelo CAD 3D. Em particular, usando métodos numéricos como, por exemplo, FEM (*Finite Element Modeling*), CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e *multi-body dynamics*, pode-se simular as solicitações estruturais, o comportamento vibracional e a dinâmica térmico-fluída.
- Integração das análises dos diversos fenômenos envolvidos em um processo interativo;
- Utilização de representações gráficas padrões (incluindo animação) para a visualização dos resultados;
- Validação experimental dos modelos de simulação para que as previsões sobre o comportamento do sistema sejam baseadas em modelos robustos e confiáveis.
- Modificação do projeto inicial e atualização do modelo CAD.

A validação dos modelos de simulação pode ser feita de duas formas: através do desenvolvimento do modelo de um produto já existente visando à realização de testes experimentais; e através da prototipagem rápida.

O segundo procedimento foi utilizado nesta metodologia visando acelerar o processo de validação.

- ***Construção do protótipo via PR***

Protótipos do produto podem ser construídos através de técnicas de prototipagem rápida, escolhidas com base nos modelos descritivos de desempenho funcional obtidos dos componentes dos produtos com as tecnologias. Para tanto, o seguinte procedimento é utilizado:

- Construção dos protótipos dos componentes novos a serem desenvolvidos. Deve-se escolher o método de prototipagem rápida mais adequado com base nos critérios tecnológicos (tolerância, superfície, resistência, dureza) e econômicos (custo e tempo de prototipação). Os possíveis métodos de prototipagem rápida podem ser agrupados nas categorias:

*Prototipagem rápida direta de componentes (PR)*: pode ser usada para componentes que se manterão idôneos para análise se obtidos diretamente com uma ou mais técnicas de prototipagem rápida;

*Prototipagem rápida do molde (rapid tooling)*: pode ser usada para realizar um protótipo do molde, que permitiria obter uma pequena série de certos tipos de componentes usando materiais diferentes ou o mesmo material que será usado na produção.

*Construção de componentes em chapas metálicas ou plásticas* através do uso de uma estação a laser integrada.

- Para componentes em materiais poliméricos deve-se avaliar até que ponto um método de prototipagem consegue usar um material com características mais próximas possíveis daquele que se pretende usar na produção.

A escolha da técnica de prototipagem rápida deve também considerar os problemas de montagem dos componentes no produto final. Quando a construção dos novos componentes for concluída, ocorre a montagem do protótipo do produto que será constituído de novos componentes obtidos com as técnicas citadas e de componentes existentes provenientes da produção em curso.

- *Validação e atualização dos modelos de simulação*

Como mencionado anteriormente, os modelos de simulação devem ser validados com base nos resultados de teste experimental e, para tanto, o protótipo construído através da PR pode ser usado e submetido a testes de funcionamento em condições reais.

Com base nos resultados experimentais obtidos modificam-se os parâmetros dos modelos de simulação através do software para tornar a resposta condizente com as características do produto em teste.

No modelo integrado, submetido à validação experimental, modificam-se as propriedades dos materiais usados com as diversas técnicas de prototipagem rápida com aquelas dos materiais que serão realmente empregados na produção. A alteração é feita com base nos modelos reológicos (MR) de simulação e no confronto entre o comportamento mecânico de diferentes materiais poliméricos, em condições de solicitações estáticas e dinâmicas e de choque.

- *Realização da pré-série, testes funcionais e atualização do banco de dados*

Com base no modelo CAD 3D define-se as especificações para a pré-série e a produção limitada de produtos é realizada visando verificar o produto e os processos de produção. Após a pré-série, o funcionamento do produto é testado em condições reais de uso para avaliar o comportamento em termos de rumor e quebra dos principais elementos novos. Os dados obtidos dos testes são inseridos no banco de dados para atualização contínua.

Como mencionado anteriormente, o instituto foi o responsável pelo desenvolvimento do ambiente virtual para a validação da estética e funcionalidade do produto. Dessa forma, apresenta-se a seguir a arquitetura hardware e software do ambiente proposto.

### Arquitetura da aplicação de Realidade Virtual

A aplicação de Realidade Virtual tinha como base o emprego de diversos módulos integrados possibilitando ao usuário viver uma experiência em um ambiente virtual interativo. O sistema construído para a empresa em questão era composto pelos modelos 3D do eletrodoméstico, pelo modelo 3D do local no qual o eletrodoméstico seria utilizado, pelas texturas, pelo som, pela posição dos sensores e pelo software que

proporcionava a interação em tempo real do usuário com o ambiente. A conexão entre os módulos foi feita como na figura 13.

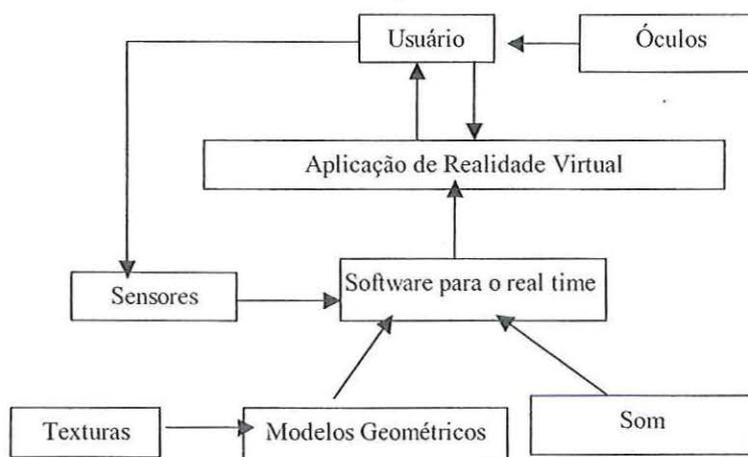


Figura 13 – Estrutura da aplicação de RV

Fonte: SACCO et al., 2000, p.6

Os componentes hardware deste ambiente consistiam em uma Silicon Graphics (SGI) Onyx2 Infinity Reality Engine, um projetor BARCO que permitia a projeção RGB estereoscópica da cena em uma tela 3x2 m e a interação do usuário era garantida pelos sensores de posição e campo magnético (Fastrak II, Polhemus). Estes sensores interagiam com um campo magnético gerado por um transmissor esférico e eram enviados ao controle hardware que retornava as coordenadas cartesianas e as rotações em torno dos eixos. O ambiente de RV podia ser visualizado em modalidade estereoscópica por meio do uso de óculos especiais. A arquitetura hardware pode ser visualizada na figura 14.

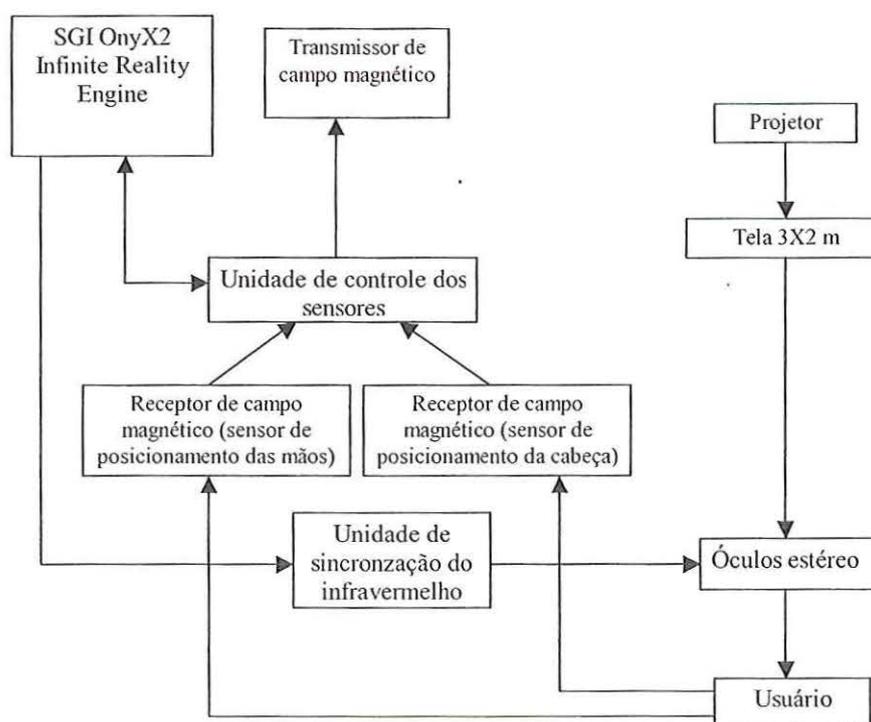


Figura 14 – Arquitetura hardware do sistema

Fonte: SACCO et al. (2000), p.8

Muitas ferramentas de software foram usadas para o desenvolvimento da aplicação de realidade virtual (figura 15). Dentre elas, pode-se citar: Rhino, 3DMax e GameGenII para a modelagem 3D das geometrias; LynX (Multigen-Paradigm) para a configuração e *set-up* do ambiente virtual; e para a interação em tempo real foram desenvolvidos softwares específicos com bibliotecas Vega (Multigen-Paradigm), Performer (SGI) e ANSI.

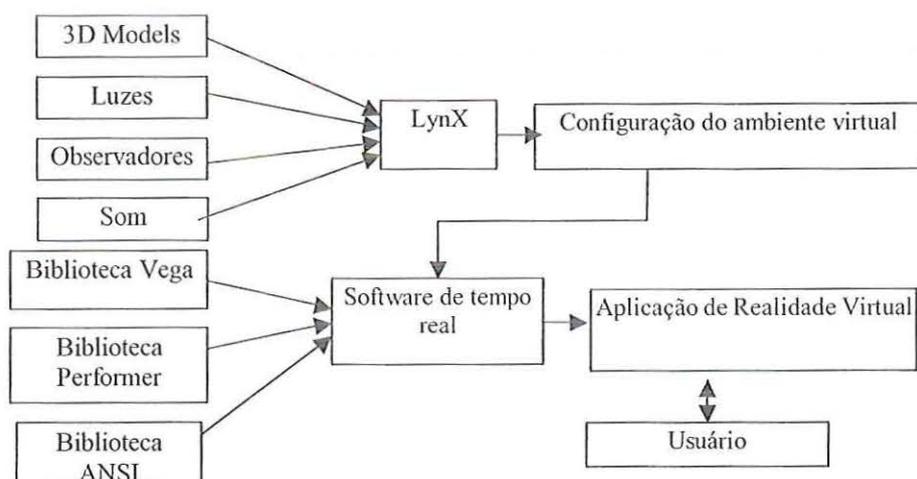


Figura 15 - Arquitetura software do ambiente

Fonte: SACCO et al. (2000), p.7

Os modelos geométricos do ambiente virtual, que faziam parte do produto e do local de uso do produto, foram criados com um modelador sólido e convertidos em formatos OpenFlight (FLT) para o inserimento no ambiente virtual. Além dos modelos geométricos, a aplicação de RV era composta também pelo software que possibilitava a interação em tempo real do usuário com o ambiente, ou seja, que proporcionava a navegação, interação com a interface do produto e visualização do *feedback* tanto visual quanto sonoro.

Para que o usuário pudesse navegar e interagir com o ambiente (em particular com o eletrodoméstico), tornou-se necessário proporcioná-lo a habilidade para mover-se nesse ambiente, olhar em torno tendo diferentes vistas e interagir com os botões de funcionamento do produto. Para alcançar estes resultados, foram usados dois sensores para o rastreamento de posição, com 6 graus de liberdade; o primeiro foi montado sob a cabeça do usuário; o segundo foi montado sob a luva. Através do sensor posicionado sob a cabeça pôde-se computar a posição do observador no ambiente 3D dependendo diretamente da posição do usuário na sala. Foi possível, assim, reorientar a vista com relação ao movimento realizado. O segundo sensor permitiu a interação com a lavadora e sua interface. No ambiente virtual foi inserido um modelo 3D de uma mão que era comandada diretamente pelo usuário através do sensor.

Toda a programação da lógica de funcionamento da interface foi feita em linguagem de programação C. Para cada botão do eletrodoméstico foi associada uma função e isso resultou em uma certa dificuldade pois cada botão da interface realizava funções diferentes que mudavam também em relação ao ciclo de lavagem programado.

Depois de programada a lógica de funcionamento alguns aspectos visuais foram considerados como, por exemplo, otimização da imagem para renderização o mais real possível, melhoria das texturas relativas ao display e inserimento das luzes. Outro ponto importante foi à programação dos rastreadores de movimento e posição que constituem uma parte fundamental nesse processo de programação.

Este capítulo teve como principal objetivo apresentar os estudos de caso realizados durante a pesquisa, ressaltando a principal motivação em cada caso que levou as empresas a adotarem a Manufatura Virtual, discutindo também como a Manufatura Virtual estava sendo implementada. Esses estudos contribuíram para o desenvolvimento do Modelo Proposto – modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP – e foram também utilizados para a análise da utilização da Manufatura Virtual que será apresentada no capítulo 5.

## 5. ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA VIRTUAL NO PDP E DESCRIÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O principal objetivo deste trabalho é analisar a utilização da Manufatura Virtual no PDP, enfatizando as limitações de processos de desenvolvimento tradicionais que a Manufatura Virtual pode ajudar a superar, a proposta da Manufatura Virtual, requisitos necessários, benefícios que podem ser alcançados e os principais desafios e dificuldades para a sua aplicação. Para a apresentação da análise, foi desenvolvido, a partir do **Modelo de Referência** apresentado no capítulo 2, um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP, denominado neste trabalho **Modelo Proposto**

Dessa forma, neste capítulo, primeiramente será apresentado o processo de geração do Modelo Proposto. Em seguida, apresenta-se a análise da utilização da Manufatura Virtual em cada etapa do PDP e o Modelo Proposto. Por fim, o capítulo apresentará uma visão global do Modelo Proposto, englobando a inter-relação entre as etapas e os impactos globais da Manufatura Virtual.

### 5.1. O processo de geração do Modelo Proposto

O Modelo Proposto apresenta como as atividades de desenvolvimento de produtos podem ser realizadas em um ambiente de Manufatura Virtual. Para cada etapa do processo de desenvolvimento está sendo proposto um ambiente integrado para a utilização de sistemas de software da Manufatura Virtual. Esse modelo foi desenvolvido com base na revisão bibliográfica e nos estudos de caso realizados.

Para a geração do Modelo Proposto, as seguintes tarefas foram realizadas:

1. Identificação de um Modelo de Referência de PDP, delimitação do seu escopo conforme o foco deste trabalho e identificação das etapas e atividades presentes no modelo que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual;
2. Identificação dos sistemas de software propostos pela Manufatura Virtual e suas funcionalidades;

3. Para cada etapa do PDP, definição de uma proposta de como os sistemas podem ser utilizados e sistematizados para alcançar as vantagens da Manufatura Virtual;
4. Análise das alternativas de uso de arquivos de formatos neutros para permitir a interoperabilidade de dados neste ambiente. Os formatos que serão considerados na análise são: STEP, IGES, UPR, STL, SDX e VRML. O formato DXF não será considerado nesta análise conforme motivos mencionados no capítulo 3.

## **5.2. Delimitação do escopo do Modelo de Referência e identificação das atividades do PDP que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual**

O Processo de Desenvolvimento de Produtos é essencialmente composto por etapas que podem ser detalhadas em atividades. Essas atividades podem ser realizadas concorrentemente e interagem entre si formando o ciclo de vida do produto. Diversas atividades do processo de desenvolvimento podem ser associadas e apoiadas com o uso de sistemas de software propostos pela Manufatura Virtual como, por exemplo, a simulação e a realidade virtual.

Nesse trabalho, o modelo de desenvolvimento de produtos apresentado no capítulo 2, item 2.4.1, é adotado como Modelo de Referência para a identificação das etapas e atividades que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual. As etapas e atividades das macro-etapas Pré-Desenvolvimento e Pós-Desenvolvimento não fazem parte do escopo do trabalho, pois a Manufatura Virtual, como apresentado no capítulo três, foca em três paradigmas: Manufatura Virtual orientada para o projeto, orientada para a produção e orientada para o controle.

Pelo mesmo motivo, as etapas Projeto Informacional e Lançamento do Produto que compõem a macro-etapa Desenvolvimento, não fazem parte do escopo deste trabalho. Portanto, o foco do trabalho está nas seguintes etapas: Projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado e Preparação da Produção. A tabela 3 apresenta a relação de atividades que compõem estas etapas que podem ser apoiadas pelo uso de sistemas da Manufatura Virtual.

Tabela 3 - Atividades que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual

<b>Etapas</b>	<b>Atividades</b>	<b>Descrição</b>
<b>Projeto Conceitual</b>	<b>Desenvolver alternativas de concepção</b>	Desenvolver princípios de solução para as funções; desenvolver e representar as alternativas de concepção.
	<b>Selecionar e determinar concepções alternativas</b>	Analisar as concepções alternativas; valorar concepções; selecionar concepções viáveis.
<b>Projeto Preliminar</b>	<b>Refinar a arquitetura do produto</b>	Identificar os sistemas, sub-sistemas e componentes; definir <i>layout</i> preliminar e interfaces do produto; refinar o estilo do produto.
	<b>Detalhar preliminarmente os Sistemas, Sub-sistemas e Componentes (SSCs)</b>	Identificar aspectos críticos do produto; definir forma, dimensões, modelos geométricos dos SSCs; selecionar materiais; identificar possíveis processos de fabricação e montagem.
	<b>Planejar o processo de manufatura macro</b>	Planejar o processo de fabricação macro; planejar o processo de montagem macro.
	<b>Desenvolver testes</b>	Planejar testes de produto e processos; desenvolver modelos (modelos matemáticos, protótipos); executar testes, avaliar resultados e planejar ações.
	<b>Detalhar documentação do produto</b>	Especificar tolerâncias dos parâmetros críticos dos SSCs; especificar cotas e tolerâncias dos desenhos; finalizar desenhos do conjunto; identificar e classificar documentos; completar a lista de materiais.
	<b>Avaliar documentação do produto</b>	Avaliar parâmetros críticos; analisar tolerância analiticamente e empiricamente; avaliar consonância dos desenhos com as normas.
	<b>Otimizar produto</b>	Finalizar aplicação DFX; ajustar tolerâncias dos SSCs.
<b>Projeto Detalhado</b>	<b>Detalhar planos de processo de fabricação e montagem</b>	Desdobrar parâmetros críticos dos componentes fabricados; reutilizar planos de processo existentes; definir componente em bruto; definir e sequenciar operações; selecionar máquinas e equipamentos; selecionar pessoal e habilidades; especificar fixação e inspeção; selecionar métodos e ferramentas; calcular sobremetal; calcular parâmetros de trabalho; definir instruções de trabalho; ilustrar operações; obter programas CN; criar documentos de apoio ao operador; calcular tempos de processo; simular processos; atualizar lista de materiais.
	<b>Projetar recursos de fabricação</b>	Projetar ferramentas, dispositivos, máquinas, equipamentos, fábrica; avaliar projeto.
<b>Preparação da Produção</b>	<b>Planejar Produção Piloto</b>	Desenvolver plano de medição; definir e otimizar <i>layout</i> do processo de manufatura; programar lote piloto.
	<b>Otimizar produção</b>	Implementar ações corretivas; ajustar <i>layout</i> ; ajustar planos de processo.
	<b>Ensinar pessoal</b>	Mapear competências necessárias; definir e desenvolver cursos e treinamento; contratar e desenvolver instrutores; treinar pessoal; avaliar pessoal; montar cursos contínuos.

### 5.3. Identificação dos sistemas da Manufatura Virtual

Sistemas referem-se às ferramentas, tecnologias e aplicativos de software utilizados para compor o ambiente da Manufatura Virtual tais como modeladores CAD, softwares de simulação e tecnologia de realidade virtual. Os sistemas foram selecionados com o suporte da pesquisa de campo, contato direto com alguns softwares, pesquisa bibliográfica e pesquisa em empresas vendedoras de softwares comerciais.

Ravelli (2003), tendo como foco os paradigmas da Manufatura Virtual orientada para a produção e para o controle, classifica os sistemas da Manufatura Virtual de acordo com os seguintes grupos de tarefas: Projeto de Processos; Gerenciamento de Recursos; Programação de CN e Validações. Como o escopo deste trabalho envolve os três paradigmas da Manufatura Virtual (projeto, produção e controle), o grupo de tarefas Projeto do Produto é incluído (Figura 16).

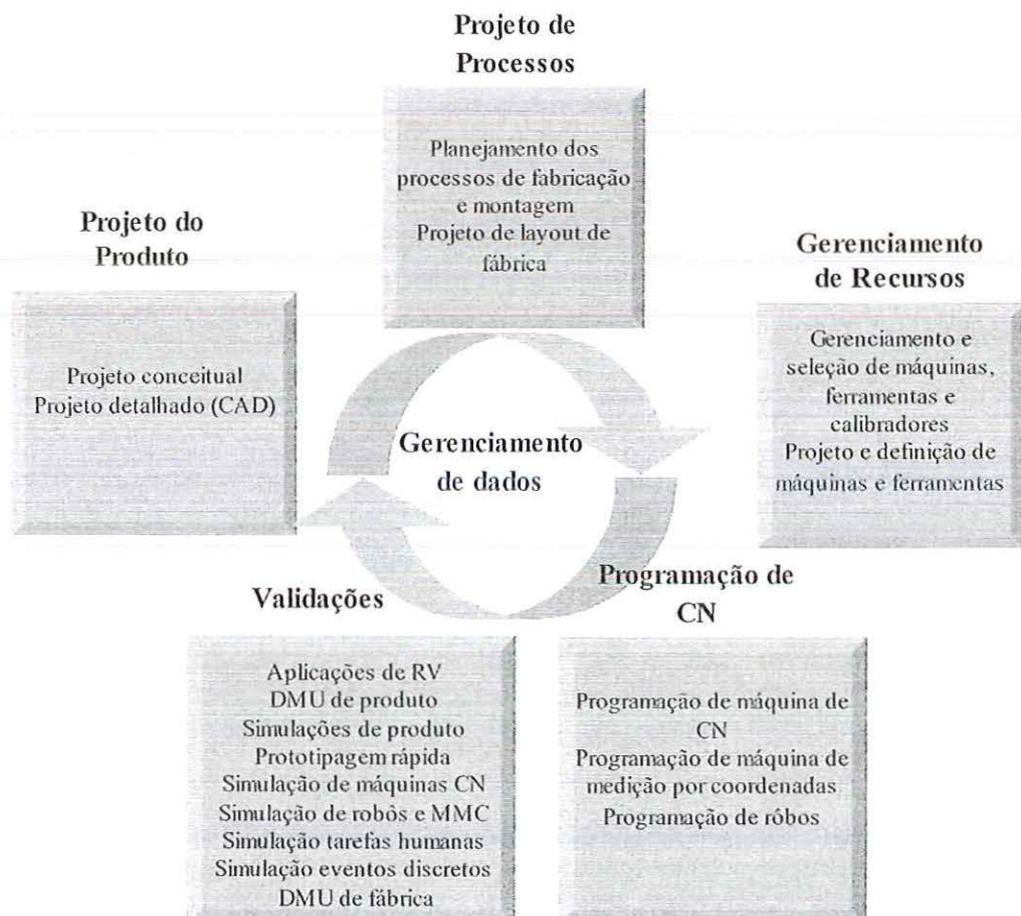


Figura 16 – Grupos de tarefas e sistemas da Manufatura Virtual

Fonte: Adaptado de RAVELLI (2003), p.22

A tabela 4 apresenta uma breve descrição desses sistemas. Maiores detalhes como funcionalidades dos sistemas, informações de entrada e saída e exemplos de softwares comerciais podem ser encontrados no Apêndice B.

Tabela 4 – Descrição dos sistemas da Manufatura Virtual

Sistemas	Descrição
Sistema de projeto conceitual	Ferramenta para esboço 2D e modelagem 3D integrados para a definição digital do conceito e estilo do produto.
Sistema CAD de projeto do produto	Ferramenta para a criação de modelos CAD 3D que representem as peças e o produto.
Sistema de <i>mockup</i> digital (DMU)	Ferramenta de visualização 3D da montagem completa do produto com toda a complexidade interna para o encaixe interno e análises de interferência da montagem final.
Sistema de Simulação ergonômica do produto	Ferramenta que permite a inserção de modelos humanos para análise ergonômica do produto e avaliação dos atributos físicos e comportamentais do homem quanto ao produto.
Sistema de Simulação do comportamento mecânico estático	Ferramenta de simulação e análise de problemas no comportamento estático de sistemas mecânicos (estruturais, térmicos, campo elétrico e magnético, fluxo de fluido)
Sistema de Simulação do comportamento mecânico dinâmico	Ferramenta de modelagem, simulação, análise e visualização do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos.
Sistema de Simulação de tolerância	Ferramenta para análise da tolerância de encaixe das sub-montagens para a montagem e manufatura de componentes.
Sistema de prototipagem rápida	Sistema que possibilita a produção de artefatos físicos diretamente do modelo CAD.
Sistema de desenvolvimento de aplicações de RV	Ferramenta para o desenvolvimento de aplicativos 3D interativos para visualização, interação, colaboração e simulação do produto e processos produtivos.
Sistema de planejamento de processos	Ferramenta para elaboração de planos de processo macro e detalhados tanto para processos de fabricação quanto montagem.
Sistema de gerenciamento de recursos	Ferramenta de gerenciamento de recursos como máquinas de CN e de manuseio manual, equipamentos, ferramentas, dispositivos, calibradores, células de manufatura, e espaço no chão-de-fábrica.
Sistema de programação de CN	Ferramenta para o desenvolvimento de programas para máquinas de CN, MMC e robôs.
Sistema de simulação de máquina CN	Ferramenta para simulação, validação e otimização de processos de máquina de CN como um todo.
Sistema de simulação do caminho da ferramenta	Ferramenta para simulação 3D e análise da funcionalidade da ferramenta de máquina, controlador CN e remoção de material.
Sistema de simulação de robô	Ferramenta de simulação 3D para projetar, analisar e programar off-line células robóticas.
Sistema de simulação de MMC	Ferramenta para simulação 3D e otimização de programas de medição de partes e montagens de máquinas MMC.
Sistema de simulação das operações humanas	Ferramenta para simulação dos movimentos humanos, análise das tarefas e avaliação das estações de trabalho para as operações de manufatura.
Sistema de projeto de layout	Ferramenta para criação do layout de fábrica, permitindo análise espacial das instalações de manufatura e avaliação de interferências entre objetos de manufatura.
Sistema de simulação de eventos discretos	Ferramenta gráfica de simulação 3D de eventos discretos para modelar e analisar sistemas de manufatura.
Sistema de <i>mockup</i> digital da fábrica	Ferramenta para visualização, análise e comunicação do projeto de fábrica.

#### **5.4. Apresentação da análise da utilização da Manufatura Virtual nas etapas do PDP e do Modelo Proposto**

Como mencionado anteriormente, o Modelo Proposto apresenta como a Manufatura Virtual pode ser aplicada ao processo de desenvolvimento de produtos e é empregado aqui para a análise da utilização da Manufatura Virtual. Neste item, juntamente à apresentação do Modelo Proposto, uma análise detalhada é realizada para cada uma das quatro etapas do PDP conforme os seguintes sub-itens:

5.4.1. Projeto Conceitual	pg. 82
5.4.2. Projeto Preliminar	pg. 98
5.4.3. Projeto Detalhado	pg. 124
5.4.4. Preparação da Produção	pg. 147

Cada uma destas etapas, por sua vez, será apresentada conforme a estrutura abaixo:

1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa, que podem ser superadas em um ambiente de Manufatura Virtual
2. Proposta da Manufatura Virtual para a etapa
3. Modelo Proposto para a etapa em ambiente de Manufatura Virtual
  - Atividades que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual
  - Sistemas da Manufatura Virtual na etapa
  - Proposta para a realização da etapa
  - Apresentação de alternativas de uso de formatos neutros para a troca de dados no ambiente;
4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para a etapa
5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual na etapa
6. Resumo da etapa

Dessa forma, os resultados estão apresentados a seguir.

##### **5.4.1. Projeto Conceitual**

Em geral, o conceito do produto é uma descrição e representação inicial do produto em termos de funções básicas, características e estrutura, tendo como resultado um modelo conceitual composto de um conjunto de informações que servirá como base para as etapas posteriores. O projeto conceitual foca, principalmente, nas idéias do novo

produto, na maioria dos casos, representadas em esboços manuais, contendo a forma do produto. Esta etapa engloba também a definição inicial da estética do produto (aparência externa, cores, texturas, superfícies), da ergonomia (interface com o usuário) e da funcionalidade do produto como um todo sem considerar suas dimensões exatas. Em outras palavras, o conceito do produto não se preocupa com os detalhes que não são relevantes para se entender a solução que está sendo proposta.

Durante esta etapa, protótipos preliminares (não são produtos completos) podem ser criados, principalmente para: validar a idéia do novo produto, demonstrar suas funções básicas visando analisar a viabilidade técnica do produto, validar o projeto junto aos projetistas industriais, verificar, inicialmente, a manufacturabilidade do produto e validar os propósitos de marketing, por meio da apresentação do conceito aos clientes e verificação do produto inserido no seu ambiente de uso.

#### ***5.4.1.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Projeto Conceitual***

Algumas práticas tradicionais de PDP resultam em limitações na realização desse processo. Muitas vezes, uma idéia inicia-se com um esboço manual, seguido da construção de um modelo de argila, por exemplo. Para projetistas do conceito do produto, a mensagem é mais importante do que a ferramenta utilizada para expressá-la. Normalmente, projetistas usam um conjunto de diferentes ferramentas e técnicas (esboço em papel, modelos de argila ou espuma, aplicativo de software para *layout* e modelagem 3D) até alcançar o conceito do produto. Desenvolver o conceito do produto utilizando mais de um tipo de ferramenta resulta na dificuldade de unir as idéias representadas por estas ferramentas em um único modelo conceitual do produto e mantê-las sempre atualizadas (PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, 2003).

De acordo com Corbo et al. (2004), muitos projetistas preferem criar, desde o início do processo de desenvolvimento, um *mockup* físico construído manualmente e em escala que permite a percepção sensorial das características do objeto. Quando esse *mockup* físico é concluído, diferentes fases do processo de engenharia reversa iniciam-se para converter o modelo físico em um modelo CAD 3D a fim de dar início à engenharia do produto e definição dos processos de produção. Um fator crítico neste processo de engenharia reversa é que, em muitos casos, o *mockup* do projetista não considera restrições de engenharia relacionadas ao processo produtivo, como

manufaturabilidade e montabilidade do produto, que serão incluídas no modelo CAD. Além disso, a reconstrução das superfícies quase sempre é necessária.

Como resultado, pode-se ter um modelo CAD com propriedades estéticas diferentes daquelas originalmente contidas no *mockup* que necessitará ser submetido novamente ao projetista para aceitar ou rejeitar as modificações na forma feitas pelo engenheiro. Essa interação representa, hoje em dia, uma fase crítica do PDP, sendo que para o projetista, que é habituado a trabalhar com modelos físicos, validar a forma em um modelo digital CAD não é uma tarefa simples. Se o projetista falha nessa análise, erros no estilo do produto serão encontrados nos protótipos físicos.

Outras pesquisas também enfatizam a dificuldade de transferir o conhecimento do projetista do conceito de um modelo de argila ou esboço manual para um modelo digital CAD e a dificuldade de embutir a intenção de design no modelo digital devido principalmente à natureza visual e estética do conhecimento envolvido (VINCENTI, 1990; FERGUSON, 1993; HENDERSON, 1995).

Além do mais, diversos autores (LIN et al., 1995; JAYARAM et al., 1997; DANI; GADH, 1997; SCHELKLE; ELSENHANS, 2001; OH; STUERZLINGER, 2004) mencionam que a maioria das tecnologias CAD utilizadas pelas empresas durante o desenvolvimento de produtos é, principalmente, focada no suporte às atividades de projeto mecânico do produto, sendo ainda pequena a presença de ferramentas que realmente fornecem suporte ao projetista durante a definição do conceito. A maioria desses sistemas CAD de auxílio ao projeto fornece sofisticados meios de manipular formas representadas no computador, porém não são muito eficientes na representação de informações críticas para a fase de desenvolvimento do conceito. Normalmente, essas ferramentas requerem a especificação exata da forma e dimensões para criar modelos de produtos sendo que na etapa de definição do conceito essas características não são necessárias, podendo limitar a liberdade do projetista em experimentar várias formas conceituais em um pequeno período de tempo.

Segundo pesquisa realizada por Wieggers e Vergeest (2001), mesmo com os avanços de sistemas CAD tradicionais, a etapa de Projeto Conceitual ainda sofre com a falta de utilização, por parte das empresas, de ferramentas de suporte mais apropriadas e flexíveis. Novas ferramentas de software dedicadas ao design industrial (CAID) e ao projeto conceitual (CACD) estão sendo disponibilizadas no mercado comercial de software e estão se tornando indispensáveis para esta etapa. A pesquisa aponta a

necessidade de se ter um modelo baseado em computador como saída da etapa de Projeto Conceitual para facilitar a integração das atividades de design e engenharia.

A pesquisa revelou também que um denominador comum entre as empresas era a necessidade de ferramentas de suporte baseada em computador para validar e analisar as alternativas de conceito do produto o quanto antes possível no PDP.

Em muitos casos como, por exemplo, o Projeto A do estudo de caso realizado no ITIA-CNR (capítulo 4), a verificação e a análise de modo efetivo do projeto conceitual não eram possíveis na empresa, principalmente, devido à falta de ferramentas eficazes de suporte à decisão, apresentação e validação das idéias iniciais do produto junto aos membros do time de desenvolvimento, gerentes bem como aos próprios consumidores. A empresa estudada realizava a verificação do conceito e estilo do produto através da construção de maquetes físicas, o que demandava longos períodos de tempo, não era um processo confiável e não permitia a análise de diversas variáveis e soluções. Existia também uma certa dificuldade em integrar as atividades de definição do estilo do produto, que tinha como resultado um modelo físico, com a engenharia detalhada do produto, que tinha que incluir as idéias do projetista no modelo CAD a ser desenvolvido.

#### *5.4.1.2. Proposta da Manufatura Virtual para o Projeto Conceitual*

Para a Manufatura Virtual apresentar impacto nessa etapa do processo de desenvolvimento, ferramentas de definição e análise do projeto conceitual (esboço, modelos físicos, modelos 3D) devem ser integradas em alguma forma de sistema de projeto do conceito e estilo auxiliado por computador. Essas ferramentas poderão efetivamente auxiliar criadores de conceito no desenvolvimento da função e na criação e gerenciamento de idéias que resultarão em formas a serem manufaturadas.

Para tanto, propõe-se o uso de um Sistema de Projeto Conceitual que é uma ferramenta capaz de capturar as idéias iniciais do conceito, explorar rapidamente suas capacidades e proporcionar um ambiente de modelagem mais intuitivo, não limitando o trabalho em termos de criatividade. A ferramenta proporciona um ambiente unificado para esboço 2D e modelagem conceitual 3D para a construção de curvas e modelos 3D de forma livre, com superfícies precisas para a manufatura e para a definição do modelo conceitual do produto. A solução atende todas as necessidades do projeto conceitual, eliminando problemas de integração de idéias dispersas entre várias ferramentas.

Enquanto explorando as idéias, o sistema permite que o projetista trabalhe através das atividades do Projeto Conceitual usando a ferramenta que necessita (esboço 2D, *layout* curvo, modelagem 3D, esboço 3D em modelos, superfície precisa, visualização foto-realista e em tempo real) sendo que todas elas se encontram disponíveis em um único ambiente, o qual também permite a reutilização de estruturas de produtos e componentes semelhantes existentes em base de dados.

Além da integração das ferramentas em um ambiente unificado, trabalhar em 3D já no projeto conceitual pode resultar em algumas vantagens como validar a idéia inicial já em 3D e manter as idéias de design do projetista quando o projeto move-se para o modelo de engenharia, facilitando, assim, a integração entre o conceito e o detalhamento do projeto.

As idéias, representadas em um modelo conceitual do produto, podem então ser verificadas e validadas no início do PDP através do uso de técnicas de prototipagem virtual e prototipagem rápida. Essas ferramentas, juntamente com o Sistema de Projeto Conceitual do produto, proporcionam uma maior colaboração em projeto entre colegas de trabalho, clientes e parceiros e a avaliação de um maior número de alternativas de projetos antecipadamente para melhorar a qualidade e manufaturabilidade do produto.

Portanto, a finalidade nesta etapa é oferecer aos projetistas um ambiente unificado para esboço 2D e modelagem 3D e facilitar a tradução e a transferência do conhecimento dos designers industriais de modelos sólidos de argila e esboços em papel ou computador para um Modelo Conceitual 3D. Este modelo é criado através da combinação da funcionalidade mecânica, dos requisitos de marketing e do estilo da empresa, e, depois de validado através de PV e PR, representa a principal saída da etapa de Projeto Conceitual.

#### *5.4.1.3. Modelo Proposto para o Projeto Conceitual em Ambiente de Manufatura Virtual*

As atividades do Projeto Conceitual que podem ser apoiadas com o uso de sistemas da Manufatura Virtual são: a geração de várias alternativas de concepção do produto, a avaliação destas alternativas e a seleção da alternativa mais adequada (Figura 17).



O Modelo Proposto para a realização do Projeto Conceitual em um ambiente de Manufatura Virtual pode ser visualizado na figura 18.

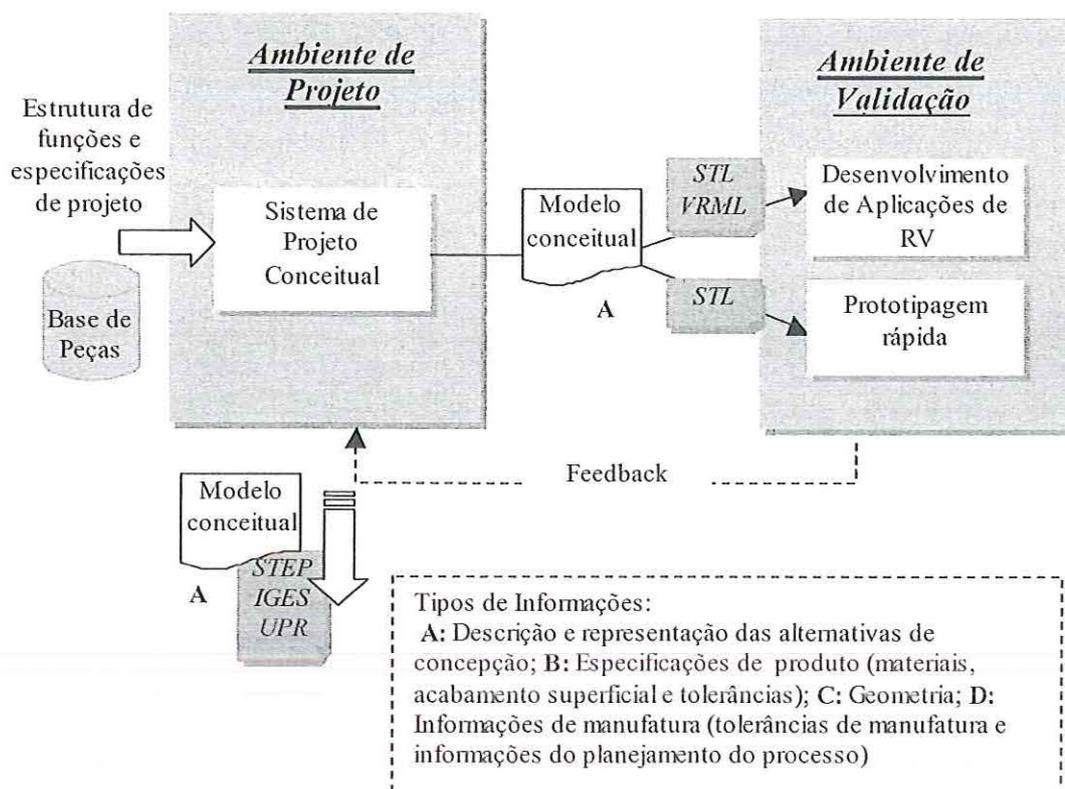


Figura 18 – Modelo Proposto para o Projeto Conceitual em ambiente de Manufatura Virtual

A metodologia de trabalho para esta etapa consiste em:

- Buscar arquiteturas e módulos existentes;
- Desenvolver modelos digitais de alternativas de concepção do produto através do uso de aplicativos de software de projeto conceitual e do reuso de peças e arquitetura do produto;
- Verificar as alternativas de concepção através da prototipagem virtual;
- Atualizar o modelo digital no ambiente de projeto;
- Validar o conceito final através da prototipagem rápida;
- Se necessário, atualizar o modelo no ambiente de projeto.

A seguir, os Ambientes de Projeto e de Validação da etapa de Projeto Conceitual estão descritos.

### *Ambiente de Projeto*

Como apresentado na figura 18, o ambiente de projeto para esta etapa do PDP é composto pelo Sistema de Projeto Conceitual. Esse ambiente permite a criação de modelos conceituais em vários níveis de abstração, promove o reuso de peças e arquiteturas existentes e adiciona consistência às práticas de projeto.

### *Sistema de Projeto Conceitual*

O Sistema de Projeto Conceitual consiste em um aplicativo de software completo para a definição e a comunicação das alternativas de conceito do produto, integrando, em um ambiente unificado, ferramentas para a criação de esboços 2D, ilustrações, renderização foto-realista, animações, modelos digitais 3D, modelos de forma livre, modelos de superfícies e curvas de mais alta qualidade e detalhes de acabamento.

O sistema permite o uso de esboços no espaço 3D como referência para a modelagem e avaliação da forma. Superado o “*gap*” entre 2D e 3D, o fluxo de trabalho do projeto conceitual pode ser acelerado, reduzindo-se o tempo requerido para converter esboços em modelos 3D para o estudo da forma, teste de soluções de projeto e suporte a tomada de decisões.

O sistema também fornece suporte mais efetivo à criatividade do projetista, pois é um sistema mais flexível e focado nas necessidades desta etapa de desenvolvimento, produzindo resultados finais de mais alta qualidade, independente se o resultado é um esboço, um modelo 3D, uma renderização, animação ou superfície para produção.

Mais do que um modelador, o sistema inclui funcionalidades necessárias para o desenvolvimento e a comunicação do projeto como, por exemplo, a possibilidade de manipulação de imagens e a troca da forma e cor de esboços e imagens sem ter que trocar de aplicativo. Pode-se ainda citar as seguintes funcionalidades:

- Visualização em tempo real de modelos 3D com texturas, transparência e sombras, fornecendo *feedback* visual imediato na avaliação da qualidade da superfície e da forma do produto;
- Criação de renderizações foto-realistas para apresentações;

- Engenharia reversa para criação de modelos usando dados 3D escaneados como referência.

Os dados gerados pelo Sistema de Projeto Conceitual são armazenados e gerenciados na base de dados nos seus formatos fonte proprietário, bem como em formatos neutros. Por exemplo, arquivos STL podem ser usados para a criação de protótipos em máquinas de estereolitografia e para as aplicações de RV. Nesse último caso, uma alternativa ao formato STL pode ser o VRML para o compartilhamento de modelos geométricos com o sistema de desenvolvimento de aplicações de RV e os formatos STEP, IGES e UPR, visando o compartilhamento de dados com a próxima etapa do PDP (sistema CAD).

### *Ambiente de Validação*

O ambiente de validação engloba o Sistema de Desenvolvimento de Aplicações de Realidade Virtual para a criação de protótipos virtuais e o Sistema de Prototipagem Rápida. Estes sistemas estão descritos a seguir.

### *Sistema de Desenvolvimento de Aplicações de Realidade Virtual*

Durante o Projeto Conceitual, diversas alternativas de concepção do produto podem ser verificadas através da criação de um ambiente de Realidade Virtual no qual o usuário vive uma experiência para verificar as idéias do produto e sua viabilidade.

Esses Sistemas de Desenvolvimento de Aplicações de Realidade Virtual possuem diversas utilidades na fase conceitual, durante a qual um dos mais críticos desafios é a avaliação econômica inicial e a revisão dos conceitos e das configurações em alto nível. Dois objetivos principais podem ser destacados para esta etapa: a avaliação de diversas configurações para tomar decisões de custo-benefício e a comunicação clara do projeto e suas funcionalidades. As considerações de custo-benefício normalmente incluem comparações de preço, estética, ergonomia, manufaturabilidade, enquanto a discussão da funcionalidade enfatiza tornar claro aos executivos, clientes e outras áreas departamentais envolvidas no projeto, a utilidade do produto visando obter um *feedback* mais efetivo.

Sendo assim, aplicações de Realidade Virtual podem focar na:

- Interação com o protótipo virtual para verificar e validar as funções básicas do novo produto;
- Apresentação da nova idéia para gerentes, engenheiros de produto e de manufatura;

- Comparação das alternativas de concepção quanto aos requisitos e metas do projeto;
- Apresentação do produto inserido no seu contexto natural de uso em grupos de foco com clientes potenciais para coletar *feedback* sobre preferências.

Um ambiente virtual que representa o contexto natural de uso do produto pode possibilitar a navegação do usuário pelo ambiente, a visualização das alternativas de concepção do produto nesse ambiente e a alteração rápida de algumas características básicas do produto como cor e textura.

Para a criação de um ambiente virtual, duas tarefas são especialmente importantes: a *definição da cena virtual*, composta por objetos 3D, a qual representa o contexto no qual o produto será inserido e usado, e a *definição das regras* para a interação em tempo real com o produto. As regras definem aquilo que o usuário pode fazer no ambiente e como o ambiente reagirá à interação. Por exemplo, o usuário pode navegar no espaço, pode pegar ou manipular objetos, movê-los, apagá-los e realizar outros tipos de interação mudando a cena. Para tanto, uma aplicação deve ser definida para permitir o dinamismo do ambiente e a relação entre usuário-ambiente. Essa aplicação também trata do fluxo de dados dos dispositivos hardware para a interface e o comportamento das entidades da cena 3D para que o usuário receba o *feedback* do sistema.

Em geral, o procedimento de criação de ambientes virtuais pode ser resumido nos seguintes passos:

- Conversão do Modelo: O Modelo Conceitual 3D do produto desenvolvido no Ambiente de Projeto é convertido em um formato que possa ser utilizado pelo Sistema de Desenvolvimento de Aplicativos de Realidade Virtual. O modelo convertido deve conter todos os dados relevantes para a visualização interativa, incluindo estrutura do produto, cor, material, textura e dados de geometria. Como mencionado, algumas opções de formatos de arquivo para a conversão da geometria são STL e VRML.

Segundo Jayaram et al. (1997), dependendo das características desejadas do ambiente, o formato STL pode ser apropriado sendo que é um dos mais simples de serem gerados e convertidos, fornecendo informações suficientes. IGES, por exemplo, já é um formato mais complexo para uma situação simples onde o principal objetivo é obter uma representação em polígonos.

Durante a conversão, a geometria é preparada e otimizada para ser utilizada em um ambiente virtual. Isso envolve a representação da superfície em termos de sistemas

triangulares, e a sua correção, redução e otimização. A saída do processo de conversão é um arquivo que define o objeto em termos de geometria, material e textura.

- *Preparar a geometria do objeto para visualização*: ferramentas de processamento de geometria são fornecidas pelo Sistema de Desenvolvimento de Aplicações de Realidade Virtual, permitindo o processamento dos arquivos geométricos que são produzidos pela conversão. Essas ferramentas permitem alterar a posição e o tamanho dos objetos, adicionar texturas, luzes, efeitos especiais (chuva, explosões, sombra) e editar e manipular arquivos geométricos.

- *Adicionar características comportamentais, áudio e visual ao objeto*: após carregar o arquivo gerado, pode-se adicionar comportamentos, definindo propriedades físicas aos objetos como interação entre as partes, interação entre objetos e ambiente, restrição de movimento, propriedades de colisão, força de contato, torque, entre outras e definir propriedades de animação.

Pode-se então navegar pela cena virtual que se parece com o contexto natural de uso do produto final, viajar por um completo cenário com vistas de 360° dos arredores e interagir com o produto. Esse ambiente ainda pode apresentar um nível maior de sofisticação usando uma interface homem-computador que permita a interação por meio da voz e gestos naturais (medidos por luvas com sensores) para a modificação da forma (BURDEA, 1999).

Um exemplo de aplicação de Realidade Virtual desenvolvida no Laboratório de Simulação da EESC-USP para fornecer suporte à etapa de definição do conceito é a plataforma virtual agrícola móvel (VALLE, 2005). A plataforma virtual foi criada para a realização de testes preliminares visando prever, de forma aceitável, o comportamento da plataforma agrícola real. Questões iniciais envolvidas nestes testes foram: análise do comportamento da plataforma em terrenos não-estruturados, ou seja, compostos por desníveis, buracos, degraus, rampas, pedras etc.; verificação da inclinação necessária para tombar a plataforma; verificação da capacidade da plataforma ultrapassar diferentes tipos de obstáculos, como pedras de grande, médio e pequeno porte; análise do comportamento da plataforma em diferentes condições de terrenos, como por exemplo, terrenos secos e molhados, para a verificação do grau de derrapagem da plataforma; comparação de dirigibilidade e estabilidade da plataforma, para diferentes posicionamentos das laterais.

Para o desenvolvimento do ambiente virtual para a simulação da plataforma, vários sistemas de desenvolvimento de aplicações de RV disponíveis no Laboratório

foram analisados e testados para selecionar a ferramenta mais apropriada e que apresentasse algumas características, como capacidade de implementação de forças físicas (massa, gravidade, acelerações etc), entre outras. Uma das aplicações foi desenvolvida utilizando EON Studio. Os objetos que compõem o ambiente virtual (plataforma móvel, milharam, terreno regular e terreno com buraco, água, casa) foram modelados utilizando 3D Studio Max e importados no ambiente virtual. Apesar de não exportar cores e texturas, as geometrias dos objetos no formato 3DS se mostraram fíeis quando passadas ao EON Studio. A figura 19, apresenta a plataforma móvel em ambiente do EON Studio.

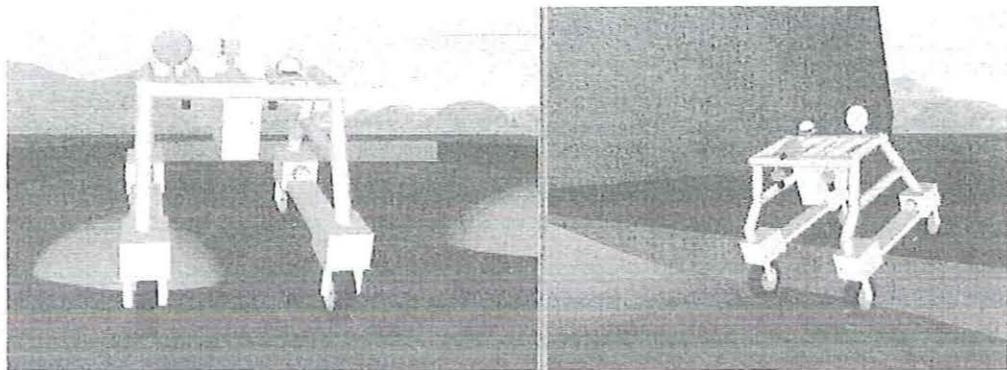


Figura 19 – Plataforma móvel em terreno com obstáculos

Fonte: VALLE (2005)

### *Sistema de Prototipagem Rápida*

A Prototipagem Rápida pode ser caracterizada pela construção de protótipos físicos a partir de um sólido, pó ou líquido em um curto período de tempo quando comparado com métodos tradicionais (CHUA et al., 1999). A produção do modelo físico se dá a partir de um modelo computacional sem a necessidade do uso de dispositivos ou programação CN.

A prototipagem rápida foi criada em 1988, com os seguintes objetivos:

- Diminuir o tempo de desenvolvimento de um produto;
- Minimizar problemas de engenharia como encaixes, montagens, interferências;
- Aumentar a vida do produto criando alterações na fase de criação de design;
- Reduzir o tempo de construção de um protótipo convencional.

Existem diversas técnicas de prototipagem rápida que usam diferentes abordagens ou materiais na produção do protótipo, dentre elas pode-se citar:

estereolitografia (SL); sinterização seletiva a laser (SLS), manufatura laminada em camadas (LLM), manufatura com partículas balísticas (BPM), impressão tridimensional (3DP).

Modelos obtidos através da PR podem ser usados para avaliar o conceito do produto e confirmar a intenção do projeto com os designers industriais (*proof of concept*), validar os propósitos de marketing, verificar o encaixe da forma, checar a ergonomia e checar inicialmente a manufaturabilidade do produto.

No modelo proposto por este trabalho, a prototipagem rápida é usada após a verificação de diversas alternativas de conceito do produto através da prototipagem virtual. Um protótipo do conceito selecionado é construído por essa técnica e é utilizado para a validação final do produto com os membros do time de desenvolvimento.

O procedimento para a construção do protótipo através de técnicas de prototipagem rápida consiste em:

- Criação de um modelo 3D do produto;
- Conversão do modelo para o formato STL, o qual representa uma superfície 3D como uma montagem de triângulos planares (malha triangular). O arquivo contém as coordenadas dos vértices e direção de cada triângulo;
- Pré-processamento do arquivo STL no sistema de prototipagem rápida, com a possibilidade de ajustar o tamanho, a localização e a orientação do modelo. O modelo STL é, então, “fatiado” em finas camadas e enviado para a máquina;
- Construção do modelo físico colocando uma camada sob a outra;
- Limpeza e acabamento final do modelo.

O arquivo STL é o padrão usado pelos sistemas de PR na representação de modelos 3D. Como muitos sistemas comerciais de projeto possuem seus próprios módulos para a conversão de dados em formato STL, a geração do arquivo pode ser facilmente implementada.

#### ***5.4.1.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para o Projeto Conceitual***

O grande objetivo da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Conceitual do produto é prover um ambiente integrado composto por ferramentas para a definição, representação, comunicação e rápida e antecipada validação das alternativas possíveis de concepção do produto que está sendo desenvolvido. Esse ambiente deve permitir que as idéias sejam representadas, verificadas e modificadas através da integração de um sistema de projeto flexível e de técnicas de prototipagem virtual e prototipagem rápida,

sem necessitar construir um grande número de modelos e protótipos físicos, os quais resultam em elevados custos, em maior tempo de desenvolvimento e em um número limitado de soluções a serem verificadas.

Um benefício que pode ser alcançado com o ambiente proposto é a remoção de barreiras entre o projeto conceitual e a engenharia detalhada a medida em que se torna possível compartilhar, através de ferramentas avançadas, as idéias com os membros do time de desenvolvimento e entregar à engenharia um Modelo Conceitual 3D validado que servirá de base para o detalhamento do projeto.

A empresa envolvida no Projeto A do estudo de caso 2, realizado no instituto de pesquisa, apostava no uso de ferramentas avançadas, como a Realidade Virtual, para validar as alternativas de concepções junto ao mercado. O novo produto poderia ser levado às feiras, exposições e grupos de foco através do modelo virtual e apresentado aos clientes através de uma linguagem mais eficaz, podendo possibilitar a modificação, em tempo real, de algumas características do produto como, por exemplo, a cor. O uso do protótipo virtual permitiria, assim, a obtenção de um *feedback* do mercado ainda na etapa de definição do conceito e a oportunidade de consolidar uma imagem de “empresa jovem e moderna”.

A empresa também apostava nesse ambiente como um meio de alcançar várias melhorias no seu PDP, destacando-se: a capacidade de modificar os modelos mais facilmente do que na prática habitual (maquetes físicas), tornando o processo de projeto mais criativo e veloz; a maior confiabilidade e suporte às decisões nesta etapa do PDP; a melhor visualização, comunicação e entendimento do conceito do produto pelos clientes, gerentes e membros do time de desenvolvimento; e, como consequência final, a redução no ciclo de desenvolvimento. Com esse ambiente de Manufatura Virtual, a meta da empresa era valorizar e desfrutar, de forma mais eficaz, as competências e *know-how* existentes na empresa e criar um único *mockup* físico de referência. Todas as sucessivas variações seriam feitas no ambiente virtual.

No caso do Projeto B desenvolvido pelo ITIA-CNR, a criação de um novo ambiente de desenvolvimento de produtos forneceu a empresa uma ferramenta para a realização rápida de alterações, em um modo virtual, das características estéticas do produto como a posição, a cor e os tipos de componentes dos protótipos do eletrodoméstico para a avaliação das alternativas de concepção. Para tanto, projetistas, engenheiros e pessoal de marketing colaboraram no desenvolvimento de um produto

virtual para ser utilizado tanto nas reuniões de marketing envolvendo os clientes como nas revisões da estética do produto junto ao time de desenvolvimento.

Assim como no Projeto A, o uso de um produto virtual se mostrou bastante vantajoso nas reuniões de marketing à medida que forneceram um *feedback* mais efetivo de clientes potenciais, gerando como resultado final a aceitação mais elevada do produto no mercado. O produto virtual também permitiu a empresa alcançar melhores níveis de entendimento da intenção do projeto e de colaboração entre os membros do time de desenvolvimento durante a revisão da estética do produto e a avaliação de diferentes modelos de acordo com discussões de *trade-off* de configuração.

A Prototipagem Virtual possibilita o ajuste do projeto o mais próximo possível da concepção final através de verificações de várias alternativas de projeto e interações com o Sistema de Projeto Conceitual, proporcionando uma maior capacidade de visualização e entendimento do produto e possibilitando que problemas futuros com o produto e sua manufaturabilidade possam ser detectados antes da consolidação definitiva do conceito do produto.

A Prototipagem Rápida, por sua vez, complementa a validação do conceito realizada por meio da PV, principalmente para produtos nos quais a inspeção manual (através do tato) é crítica para o seu desenvolvimento. Com a peça física, torna-se possível checar, mais efetivamente, a ergonomia do produto, desde o encaixe de um dispositivo na palma da mão à inspeção de quinas perigosas, e até mesmo a sensação de tamanho. A vantagem de empregar a técnica de PR está na sua capacidade de produzir protótipos físicos de forma rápida e econômica, e sem necessitar de um grande número de recursos humanos, se comparado às técnicas tradicionais (CHUA et al., 1999).

#### ***5.4.1.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Conceitual***

Com relação ao modelo que está sendo proposto neste trabalho para a realização da etapa de Projeto Conceitual, pode-se destacar alguns desafios e dificuldades que foram observados nos casos analisados e que precisam ainda ser superados para o uso efetivo da Manufatura Virtual.

Um grande desafio nesta etapa está relacionado ao uso da Realidade Virtual. Apesar dos grandes ganhos obtidos com esta tecnologia, no estudo de caso realizado no ITIA-CNR (Projeto B), a etapa de definição do conceito foi a mais crítica para a adoção de ambientes virtuais. Esse fato pode ser atribuído principalmente à complexidade

estrutural e funcional imposta pelo uso de ambientes de Realidade Virtual, sendo que as ferramentas tradicionais de modelagem disponíveis (esboços, renderização, desenhos técnicos, modelos 3D computacionais, modelos de estudo não funcionais, etc) são normalmente gerenciadas diretamente pelo projetista, sem a necessidade de um intermediário. No caso de ambientes de RV, conhecimento específico com relação à tecnologia envolvida é necessário e, muitas vezes, as interfaces do ambiente com o usuário não permitem o trabalho de modo natural.

A experiência do Instituto neste projeto possibilitou a constatação de que uma possibilidade interessante nesta fase do PDP e que apresenta realmente um diferencial, justificando o uso da RV, é o desenvolvimento de um ambiente que permita a manipulação direta e em tempo real dos objetos que fazem parte do produto (sistemas padrões disponíveis em uma base de dados ou sistemas novos) e que permita a modelagem tanto das características geométricas quanto do comportamento do produto em termos de funcionamento.

Outra questão crítica relacionada ao uso de ambientes de Realidade Virtual, que na realidade não é apenas observada nesta etapa do PDP, consiste na conversão, de forma fácil e natural, do Modelo Conceitual 3D para um modelo que seja apropriado às características dos ambientes virtuais.

A importação de objetos criados com outros propósitos se não a sua utilização em ambientes virtuais ainda continua sendo um desafio, primeiramente devido à variedade de formatos com o qual a informação pode ser fornecida pelos sistemas CAID e CAD. O segundo problema de utilizar uma geometria CAD em um ambiente de realidade virtual é o grande número de polígonos na geometria de um componente. Sem a interpretação e edição de um especialista durante a conversão, as descrições dos objetos podem consumir muitos recursos de memória do computador e limitar o número de objetos possíveis de serem manipulados no mundo virtual, pois dependendo do nível de detalhes dos objetos, o sistema pode se tornar lento. Essa questão será abordada com mais detalhes no item 5.4.2.5.

Quanto à prototipagem rápida, apesar das vantagens associadas ao seu uso, essas técnicas ainda se encontram em um estágio de desenvolvimento e não atingiram a maturidade. O seu desempenho é afetado por diversos parâmetros intrínsecos ao próprio processo. A escolha de uma combinação apropriada desses parâmetros para a fabricação ótima de um protótipo não é uma tarefa simples, dependendo de diversos requisitos de qualidade, tais como precisão, robustez, tempo de construção e eficiência de fabricação.

Um significativo nível de conhecimento das técnicas é requerido para produzir protótipos de qualidade consistente (CHOI; CHAN, 2004).

Segundo Bullinger et al. (2000), além de limitações do processo, materiais utilizados na prototipagem rápida têm dificilmente permitido o uso desta técnica para a criação de protótipos funcionais ou técnicos, sendo mais usada para a criação de protótipos voltados para estudos estéticos, ergonômicos e de montagem ou como modelos para processos de fundição e moldagem.

#### 5.4.1.6. Resumo da etapa Projeto Conceitual

A tabela 6 apresenta uma síntese da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Conceitual.

Tabela 6 - Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Conceitual

Atividades do PDP	Limitações atuais	Proposta da Manufatura Virtual	Benefícios	Desafios
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desenvolver alternativas de concepção;</li> <li>- Selecionar e determinar concepções alternantivas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de diversas ferramentas (esboços manuais, modelos de argila, modelagem 3D e de superfície), dificultando a integração das idéias que estão espalhadas entre as ferramentas;</li> <li>- Dificuldade em transmitir a intenção de design para a engenharia do produto;</li> <li>- Maioria das tecnologias CAD usadas pelas empresas são focadas no projeto mecânico;</li> <li>- Verificação e análise das alternativas de concepção através de modelos e protótipos físicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de um Sistema focado no Projeto Conceitual, que oferece um ambiente unificado para esboço 2D, modelagem 3D, de superfície e de forma livre, resultando em um Modelo Conceitual 3D do produto a ser transferido para a etapa seguinte;</li> <li>- Uso de técnicas de Prototipagem Virtual e Prototipagem Rápida para validar as alternativas de concepção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoção de barreiras entre o conceito e engenharia;</li> <li>- Apresentação do protótipo virtual aos clientes para feedback durante projeto conceitual;</li> <li>- Verificação e alteração rápida dos modelos;</li> <li>- Aumento da colaboração através da melhor visualização e comunicação do projeto aos clientes, gerentes e outros;</li> <li>- Redução do ciclo e custo de projeto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ambientes Virtuais requerem conhecimento específico com relação à tecnologia envolvida e envolvem interfaces não usuais;</li> <li>- Conversão de modelos entre sistema de projeto e aplicação de ambiente virtual;</li> <li>- Limitações do processo de prototipagem rápida e materiais utilizados dificilmente permitem o uso desta técnica para a construção de protótipos funcionais.</li> </ul>

#### 5.4.2. Projeto Preliminar

Após a definição e validação do Modelo Conceitual 3D do produto, dá-se início à etapa de Projeto Preliminar. Durante esta etapa, a arquitetura do produto deve ser estabelecida através da definição do *layout* geométrico do produto, do refinamento do

estilo do produto, e da definição das especificações funcionais de cada sistema, sub-sistema e componente (SSC). Quando apropriado, SSCs semelhantes podem ser recuperados em bases de dados para a sua reutilização. Os processos de fabricação e montagem começam a ser analisados, podendo-se definir um diagrama preliminar do fluxo de processo. Também neste caso, torna-se possível a busca de planos de processos semelhantes existentes que possam se reutilizados.

A idéia é criar um Modelo CAD 3D que representa completamente o produto e contém informações suficientes para dar continuidade às etapas seguintes do processo de desenvolvimento. Esse modelo deve apresentar as dimensões do produto, informações precisas sobre superfície, tolerância e *features*, e deve permitir que interferências sejam checadas, servindo de base para as demais atividades do PDP.

#### **5.4.2.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Projeto Preliminar**

Durante esta etapa, pode-se citar algumas limitações encontradas em processos de desenvolvimento tradicionais e que podem ser superadas com o uso da Manufatura Virtual.

Em primeiro lugar, a falta de representações completas do produto pode dificultar o direcionamento das atividades seguintes de PDP. Nem todos os sistemas CAD atualmente utilizados pelas empresas possuem as funcionalidades requeridas para fornecer uma representação completa do produto. Segundo Rajan et al. (1999) e Szykman et al. (2001), alguns sistemas CAD tradicionalmente utilizados pelas empresas são limitados na representação de dados geométricos e outros tipos de informações relacionadas à geometria tais como restrições geométricas do material, informações paramétricas, *features*, etc.

A escolha e a utilização de um sistema adequado são questões a serem consideradas em um ambiente de Manufatura Virtual. Conforme Souza e Coelho (2004), é freqüente observar empresas realizando investimentos equivocados em sistemas CAD, por falta de conhecimento. Segundo os autores, um sistema de software CAD de pequeno porte, por exemplo, utiliza representações geométricas em 2D. Já sistemas CAD de médio porte compõem a classe de maior ascensão no mercado atual e são capazes de: representar objetos 3D através de modelamento 3D, em geral sólidos ou superfície; representar objetos com volume, massa, centro de gravidade; e gerar desenhos 2D diretamente do modelo 3D. Outros dois recursos importantes presentes nestes sistemas são: modelagem paramétrica (dimensões do produto são relacionadas

entre si por meio de um parâmetro) e associatividade (geração automática de desenhos 2D com vistas e cotas para dimensionamento, partindo do modelo 3D e alterações realizadas no modelo 3D automaticamente passam para o desenho 2D). Por fim, sistemas de grande porte consistem em sistemas robustos que englobam todos os recursos acima mais o modelamento híbrido (sólido e superfície) e recursos de visualização fotográfica.

Durante o Projeto Preliminar, engenheiros precisam fazer mudanças no projeto e avaliá-las rapidamente no contexto de especificações funcionais. Diversas decisões tomadas durante esta etapa podem resultar em problemas potenciais que somente serão verificados nas etapas posteriores de desenvolvimento como, por exemplo, problemas com o encaixe e a interferência de peças em uma montagem; problemas de função relacionados ao desempenho do produto (por exemplo, no caso de um avião, a aerodinâmica e consumo de combustível); dificuldades para realizar atividades de montagem e de manutenção do produto; problemas de manufaturabilidade do produto.

Com a finalidade de prever e solucionar antecipadamente estes problemas, tradicionais ciclos de projetar-construir-testar presentes nesta etapa envolvem: a definição detalhada de cada componente e sistemas; a construção de protótipos físicos de componentes e sistemas baseados em desenhos preliminares; o teste de protótipos quanto às metas estabelecidas; a avaliação dos resultados dos testes; e se necessário a modificação do projeto. O ciclo deve se repetir até que um nível aceitável de desempenho do produto seja alcançado (CLARK; FUJIMOTO, 1992).

Normalmente, engenheiros precisam construir diferentes protótipos do produto para testar a aparência do projeto e diferentes tipos de análises de engenharia. Esse processo consome tempo e leva a elevados custos de produção. Além disso, a internacionalização das empresas torna esse problema pior. Problemas de comunicação entre projetistas, engenheiros e clientes levam a re-trabalho e *scraps* (LAU et al., 2003).

A produção de protótipos é um fator importante nesta etapa que suporta tanto o projeto do produto quanto o planejamento dos processos. Com os protótipos, pode-se examinar se os requisitos estão sendo encontrados, eles ajudam a aprender rapidamente, minimizar erros, integrar diferentes funções, fornecem interação em tempo real e a simulação da funcionalidade pretendida. Porém, a medida em que a complexidade dos produtos e a pressão pela redução dos ciclos de desenvolvimento aumentam, a criação e a realização de testes com protótipos físicos tornam-se um gargalo para o lançamento bem sucedido de novos produtos, pois esse processo, principalmente no caso de



produtos de capital intensivo, consome longos períodos de tempo (semanas e até mesmo meses) e resulta em elevados custos de desenvolvimento.

Nesse contexto, para uma companhia ser competitiva ela acabou evitando a necessidade de construir protótipos de cada detalhe do projeto e, como a velocidade da realização e análise de alterações em protótipos físicos é crítica, as empresas realizam apenas algumas alterações até que o cronograma da produção e as limitações de recursos fazem com que elas parem de explorar as mudanças necessárias. O resultado dessa prática é que muitos projetos são liberados para a manufatura contendo erros que serão encontrados e reparados no chão-de-fábrica pelo pessoal da manufatura. Para melhorar o desempenho do PDP torna-se necessário mudar esse processo. Aumentando, por exemplo, a velocidade com que as alterações de projeto podem ser realizadas e analisadas, a qualidade do sistema como um todo pode melhorar. Maior velocidade para a realização de mudanças no projeto pode ser obtida através da prototipagem virtual (FREEDMAN, 1999).

No Projeto B desenvolvido pelo ITIA – CNR, o elevado uso de protótipos físicos para validar o projeto do produto na empresa estava exercendo uma grande influência: nos custos de desenvolvimento; no tempo de resposta para colocar em prova o novo produto, que na lógica do *time-to-market* resultava excessivo; na eficiência do projeto, que não tendo um rápido *feedback* de controle não levava a sua otimização ao limite das possibilidades (principalmente em relação às propriedades do material e potencialidade dos instrumentos de cálculo); no controle de qualidade, que deve considerar, nas suas avaliações, as variações que acontecem entre o projeto e o produto realizado; na avaliação das condições críticas do processo e na relativa otimização do tempo de ciclo.

Em muitas empresas, uma parcela da construção e testes de protótipos de engenharia tem sido substituída pelo uso de simulações computacionais. Porém, em outros casos, como mostra o caso do Projeto A desenvolvido pelo ITIA-CNR, a simulação computacional não é ainda uma ferramenta completamente utilizada. Na empresa analisada neste projeto, as limitações existentes no processo de desenvolvimento estavam principalmente relacionadas à falta de capacidade interna para a utilização de simulações e análises virtuais dos componentes e grupos funcionais bem como para a experimentação virtual e física dos produtos finais. A empresa estava encontrando vários problemas no projeto em etapas posteriores do PDP por não simular apropriadamente a funcionalidade do produto (ela não utilizava o suporte de

ferramentas computacionais como, por exemplo, a simulação computacional do comportamento dinâmico do produto). Após testes realizados com protótipos físicos, era freqüente a ocorrência de falhas no projeto quanto à aerodinâmica da motocicleta, que não alcançava um nível de estabilidade adequado.

Uma questão envolvida no uso de simulações computacionais é a necessidade identificada, para o contexto atual de projeto, de associatividade entre o modelo CAD 3D e os modelos de simulação, visando aumentar a velocidade do ciclo projetar-analisar (SCHNITGER, 2003). Modelos CAD 3D e modelos de simulação passam por diversas mudanças durante o PDP e, assim, precisam estar em sincronia para que a análise seja realmente efetiva.

Um outro aspecto que pode ser mencionado é a análise da montagem dos produtos. Como o foco, atualmente, passou do projeto de peças para o projeto de montagens em nível de sistemas, a análise de montagens de produtos tem sido realizada através de *mockups* físicos e até mesmo da própria linha de montagem final para validar a integração de todos os componentes e sistemas no produto final. O uso de *mockups* físicos detecta muitos problemas de projeto, mas não todos, e muitos deles aparecem no final do PDP. Normalmente, esses *mockups* envolvem elevados custos e o resultado pode ser um produto muito difícil de ser montado. É comum ainda que os componentes sejam integrados somente na própria linha de montagem. E quando isso ocorre, na maioria das vezes, eles não se encaixam perfeitamente, resultando em custos de retrabalho para o encaixe de todas as peças (THOMKE; FUJIMOTO, 2000).

Projetistas e engenheiros vêm tentando construir montagens dos modelos sólidos para facilitar a detecção de interferência em nível de sistema e realizar o *fly-through* virtual. Porém, o desempenho de renderização de muitos sistemas CAD ainda é lento e o foco está passando para o uso de ferramentas de *mockup* digital (DMU) e tecnologias de ambientes virtuais para analisar a montagem dos componentes e sistemas no produto final.

Uma outra questão crítica para o desempenho do PDP é a dificuldade de reutilização de componentes e sistemas. Normalmente, dados se encontram distribuídos através de múltiplos sistemas incompatíveis, tornando difícil a simples tarefa de buscar e reusar informações, e levando à duplicação de dados e ao uso de informações incorretas. Muitas vezes, engenheiros recriam desenhos pois não encontram projetos similares existentes e fornecedores duplicam informações porque os sistemas são incompatíveis. Estudos têm mostrado que de 15 a 27% do tempo de um engenheiro é

gasto na tentativa de localizar e recuperar informações (SHOAF, 2001). As empresas precisam simplificar esse processo e reusar dados de projeto para reduzir tempo e custo de desenvolvimento.

Por fim, uma outra consideração atual que deve ser feita diz respeito à coordenação e colaboração entre membros dispersos de times de projeto. Meios tradicionais de comunicação e colaboração utilizados pelas empresas resultam, freqüentemente, em despesas significantes com viagens, re-locação de pessoal e telecomunicações. Tecnologias como a RV consideram muitas das necessidades atuais permitindo uma integração e interação em tempo real entre pessoas localizadas em diferentes plantas industriais através de um produto virtual. O resultado é o uso mais eficiente do tempo do que encontros e reuniões tradicionais.

Algumas considerações listadas acima - fornecer uma representação mais completa do produto que servirá de base para as atividades seguintes; métodos mais eficientes de validação e otimização do produto; a tendência cada vez maior do projeto em nível de sistema; reuso de informações; ferramentas para colaboração - levam ao surgimento de novas tecnologias e aplicativos que utilizados de forma adequada e integrada podem suprir carências de sistemas de projeto tradicionais e técnicas tradicionais de construção de protótipos.

#### **5.4.2.2. Proposta da Manufatura Virtual para o Projeto Preliminar**

Em um ambiente de Manufatura Virtual, o modelo CAD 3D deve representar completamente o produto e conter informações suficientes para direcionar as atividades seguintes. Além de informações da forma, modelos do produto devem considerar dados que são diretamente relevantes para a manufatura como tolerâncias (dimensional e geométrica), características da forma (*features*) e superfícies precisas.

Tolerâncias são essenciais na avaliação da manufaturabilidade de um projeto com respeito à capacidade dos processos de manufatura. Como resultado, a modelagem de tolerâncias tem sido um assunto tanto de pesquisa quanto de esforços de desenvolvimento de padrões.

Para que o planejamento do processo possa ser realizado de forma automática, o modelo CAD 3D definido nesta etapa deve conter também informações de “*feature*”. Erve (1988) apresenta uma definição do ponto de vista de planejamento dos processos, onde *features* de forma são tratadas como características de uma determinada peça, com uma forma geométrica definida, que podem ser utilizadas para especificação de

processos de usinagem, fixação e medição. Dessa forma, *features* podem ser acessados pelo sistema de planejamento para permitir que decisões sobre métodos de manufatura sejam tomadas. Além disso, sendo o modelo preciso em informações de superfície, pode-se utilizá-los em programas de CN para máquinas e inspeção sem ter que recriar manualmente a geometria do produto.

Segundo Bennett (1997), a última geração de sistemas CAD permite que modelos sólidos sejam criados tanto baseado em *features* (para automatizar o planejamento do processo) como com superfícies precisas (para gerar programas CN para usinagem e inspeção sem ter que recriar a geometria do produto manualmente).

Sistemas CAD 3D modernos oferecem às empresas a oportunidade de garantir uma abordagem de projeto centrada no modelo, permitindo que informações como requisitos de projeto, definição da geometria, e características do processo de montagem e manufatura, sejam capturadas no modelo digital 3D do produto. Desse conteúdo pode-se facilmente extrair informações de inspeção, instruções de montagem e caminhos de ferramentas de manufatura entre outras. Além disso, o modelo serve como base para diversas pessoas envolvidas no desenvolvimento: para parceiros e fornecedores assegurarem que os componentes satisfaçam os requisitos do projeto como um todo; para clientes garantirem que os requisitos sejam encontrados; para grupos de simulação e análise verificarem os requisitos de desempenho e segurança; para engenharia e manufatura trabalharem juntos; para a manufatura definir os planos de processo de produção e montagem; para vendas e marketing testarem a aceitação do cliente.

Para validar o modelo, o Projeto Preliminar inclui a utilização de diversas ferramentas de análise e verificação, como prototipagem virtual, simulações computacionais, DMU e prototipagem rápida, que possibilitem checar uma ampla gama de alternativas e opções de projeto de maneira rápida e sem ter que despender grande quantidade de recursos humanos e financeiros na construção de protótipos físicos.

A velocidade de introdução do produto no mercado e sua aceitação são afetadas pela frequência de interações de projeto. A RV, por exemplo, aumenta a velocidade e a frequência do processo colaborativo e interativo de projetar-construir-testar. Ambientes virtuais também consideram muitas das necessidades atuais de colaboração e cooperação em projeto à medida que possibilita a integração em tempo real de membros dispersos de times de desenvolvimento, de fornecedores e clientes em um produto virtual ao invés da necessidade de reunir todos fisicamente em um mesmo local.

Quanto ao planejamento dos processos de fabricação e montagem, que tem início nesta etapa do desenvolvimento, também consiste em uma atividade que evolui ao longo do PDP, onde planos macros do processo se desenvolvem para planos detalhados do processo. O planejamento macro de processos envolve a definição das operações macro de fabricação e montagem, que são pré-definidas e selecionadas no Sistema de Planejamento de Processos. Um fluxo preliminar de processos, definido utilizando-se a estrutura do produto e o plano macro pode ser analisado. O planejamento macro pode também envolver uma discussão preliminar das tecnologias mais apropriadas (por exemplo, remoção de metal, adição de material, junção) e dos materiais para produzir um *feature*, um componente, ou um produto. Resultados adicionais do planejamento macro podem incluir *feedback* sobre a manufaturabilidade, resultados iniciais de análises da montagem, e estimativas preliminares de custos (ELMARAGHY, 1993).

Uma questão importante para a integração do projeto do produto e dos processos em um ambiente de Manufatura Virtual é o uso de bases de dados e sistemas integrados de projeto do produto e de processos, permitindo que as empresas melhorem, a um custo efetivo, o projeto do produto e dos processos, enquanto facilitam a integração das atividades de projeto com o processo produtivo para manter e otimizar o uso de informações de projeto. Bases e sistemas integrados podem permitir também o reuso mais eficaz de dados do projeto e, assim, reduzir, por exemplo, o tempo gasto por engenheiros na busca e recuperação de desenhos do produto ou ainda no re-projeto de um componente (CROW, 2000).

#### *5.4.2.3. Modelo Proposto para o Projeto Preliminar em Ambiente de Manufatura Virtual*

Durante o Projeto Preliminar, as atividades que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual são: refinar a arquitetura do produto (identificar os SSCs, definir o *layout* e interfaces do produto e refinar o estilo), detalhar preliminarmente os SSCs, planejar o processo de manufatura macro e desenvolver testes (figura 20).



O Modelo Proposto para a etapa de Projeto Preliminar pode ser resumidamente visualizado na Figura 21, na qual as atividades são realizadas com o suporte de um conjunto de sistemas.

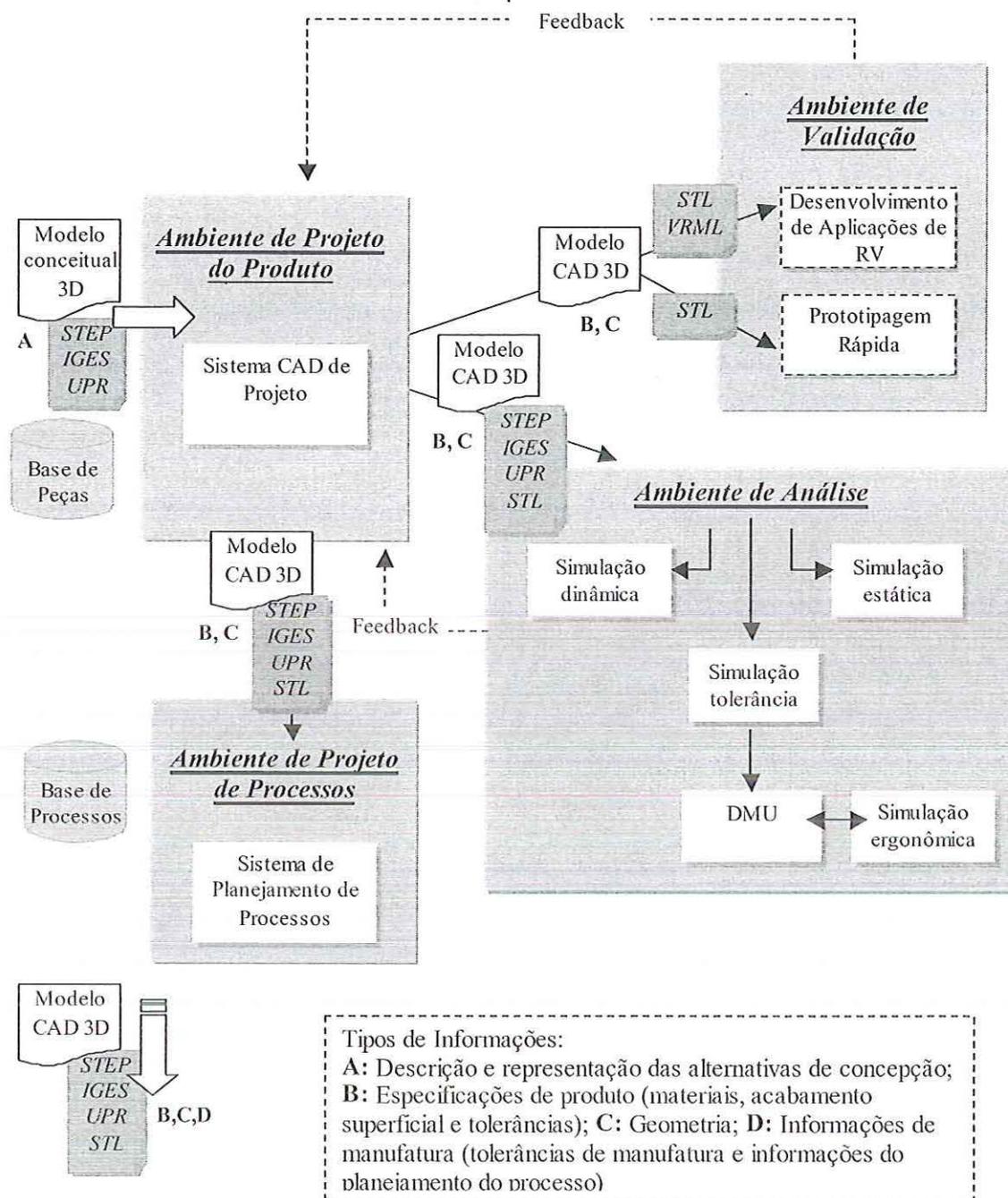


Figura 21 – Modelo Proposto para o Projeto Preliminar em ambiente de Manufatura Virtual

Para a realização desta etapa o modelo propõe a seguinte metodologia de trabalho:

1. Desenvolvimento do Modelo CAD 3D do produto com base nas características estéticas e funcionais desejadas (Modelo Conceitual 3D);
2. Inclusão de uma base de dados anexada ao modelo, contendo os requisitos funcionais dos componentes, subsistemas e sistemas (SSCs);
3. Identificação dos SSCs de produção corrente que serão re-aproveitados e recuperação desses SSCs na base de dados existente;
4. Para SSCs novos, desenvolvimento dos modelos nos quais são definidas as suas funções e suas características;
5. Verificação da estética, ergonomia, funcionalidade e montagem do produto através da prototipagem virtual;
6. Atualização do Modelo CAD 3D;
7. Análise dos SSCs através de simulações computacionais (simulações de comportamento estático, comportamento dinâmico, tolerância), com a definição de modelos para as simulações a partir do Modelo CAD 3D;
8. Atualização do Modelo CAD 3D;
9. Visualização e validação do produto através do DMU e simulação ergonômica do produto;
10. Atualização do Modelo CAD 3D;
11. Validação final do produto através de prototipagem rápida;
12. Atualização do Modelo CAD 3D;
13. Definição do plano macro de processos.

A seguir, os Ambientes de Projeto do Produto, Análise e Validação e Projeto de Processos estão descritos.

#### **Ambiente de Projeto do Produto**

O Ambiente de Projeto é composto pelo Sistema CAD de Projeto do produto. A integração entre a etapa de Projeto Conceitual e Projeto Preliminar se dá através do Modelo Conceitual 3D, que é a informação de entrada para o CAD.

Uma breve descrição desse sistema é apresentada abaixo.

### ***Sistema CAD de Projeto do Produto***

O Modelo Conceitual 3D do produto é usado pela engenharia para criar o Modelo CAD 3D. Depois de criado o Modelo CAD 3D, ele pode ser usado por diversos sistemas seguintes como base para as interações sucessivas.

O Sistema CAD é responsável pela criação de modelos sólidos dos componentes, subsistemas e montagens que serão utilizados como base para realizar diversos tipos de análises (montagem, interferência, cinemática, stress) e para gerar dados para o processo de manufatura (caminhos da ferramenta, lista de materiais, desenhos técnicos). O Modelo CAD 3D também é enviado como informação de entrada para moldadores que possuem conhecimento especializado e podem realizar algumas análises; comunicar a intenção do projeto; e coletar conhecimento especializado de outras funções de desenvolvimento como análise.

As principais funcionalidades desejadas para o Sistema CAD de Projeto dentro do contexto da Manufatura Virtual são: modelagem sólida, com capacidade de gerar objetos 3D sólidos com centro de gravidade e volume; modelagem baseada em *features*; modelagem paramétrica; modelagem de superfícies e *wireframe*; associatividade; sistemas baseados em conhecimento; manutenção de bibliotecas de peças e montagens; histórico das operações realizadas para a criação da peça (árvore topológica); comunicação com outros softwares através de interfaces padronizadas.

Neste ambiente, os dados gerados pelo Sistema CAD de Projeto do produto são armazenados e gerenciados na base de dados tanto em seu formato proprietário, como em formatos neutros de arquivos como STEP, IGES, UPR, STL, e VRML.

### ***Ambientes de Análise e Validação***

Como já mencionado anteriormente, a realização de análises e a validação do produto são realizadas através de diversas tecnologias como Prototipagem Virtual, Sistemas de Simulação, DMU e Prototipagem Rápida. Os sistemas utilizados para o cumprimento destas tarefas estão descritos a seguir.

### ***Sistema de Desenvolvimento de Aplicações de Realidade Virtual***

Verificações realizadas durante esta etapa de desenvolvimento são diferentes uma das outras e muitas delas podem ser feitas em Ambientes Virtuais ao invés de usar diferentes formas de modelos físicos (*mockup*, protótipos, etc). Normalmente, da mesma forma em que cada tipo de modelo físico fornece suporte a diferentes verificações de

projeto, as características do Ambiente Virtual devem ser definidas dependendo do tipo de verificação que será realizada. Por exemplo, para avaliar o impacto visual de um produto (um eletrodoméstico) no seu ambiente de uso com relação aos diferentes estilos de móveis, torna-se necessário desenvolver um ambiente que represente o ambiente da casa, que apresente um elevado nível de detalhes superficiais, e que permita a navegação dentro desse ambiente. Não é preciso definir um ambiente no qual se possa interagir com partes móveis do eletrodoméstico e não há necessidade de modelar o comportamento do produto. Se o objetivo é testar a lógica de uma interface do produto (painel de controle do eletrodoméstico), torna-se necessário modelar o comportamento do produto, dar um bom nível de detalhes aos dispositivos de entrada e saída, mas não há a necessidade de desenvolver um ambiente real particular.

Em um ambiente de Manufatura Virtual, aplicações de Realidade Virtual podem ser utilizadas nesta etapa principalmente para realizar a validação da estética e ergonomia, do *layout*, da funcionalidade e da montagem do produto. Deve ser destacado aqui o potencial dessa tecnologia para promover um ambiente colaborativo de projeto, no qual as pessoas envolvidas podem interagir com o protótipo virtual e realizar análises de projeto.

Mais uma vez, deve-se ressaltar que o uso das aplicações de RV implica na transferência de modelos geométricos definidos no Sistema de Projeto CAD para o Sistema de Desenvolvimento de Aplicativos de Realidade Virtual, na criação de uma cena 3D virtual, na definição de diversas características e propriedades dos objetos virtuais, na definição das regras para a interação em tempo real, na geração de novas informações e em avaliações e verificações dos resultados. Um procedimento básico para a criação destes ambientes virtuais foi descrito na etapa de Projeto Conceitual.

Aqui também a transferência de dados do Sistema CAD de Projeto para o ambiente virtual pode ser realizada através do uso de formatos neutros como IGES, STL e VRML.

#### Validação da estética e ergonomia do produto

Neste tipo de validação, o objetivo do protótipo virtual é permitir a verificação da estética e da ergonomia do produto, possibilitando que análises de manutenibilidade, acessibilidade e usabilidade sejam realizadas, bem como a avaliação do comportamento do usuário durante a interação com o produto. O modelo virtual pode ser visto em qualquer orientação espacial e sob as condições desejadas de iluminação, sombra, cores

e texturas. A avaliação e comparação de diferentes alternativas de formas e estilos são realizadas através desse ambiente.

Em um ambiente virtual imersivo, o pessoal de projeto e de manutenção pode vestir um HMD e luvas para estar imerso no ambiente e simular uma tarefa de manutenção para verificar se essa tarefa é compatível com o projeto. Análises ergonômicas podem ser realizadas como, por exemplo, no projeto de um veículo analisar aspectos do *layout* da posição do motorista no veículo como o nível de conforto do banco e a visibilidade do motorista.

#### Validação do *layout* do produto

Nesse caso, o ambiente virtual pode ser utilizado para alterar as configurações (troca de posição, cor e tipo de componentes do produto) e as características do produto em tempo real, testando novos *layout* de sistemas e componentes e verificando, assim, a funcionalidade de novas alternativas de *layout* do produto. O usuário pode navegar, tocar, arrastar e mover objetos. Um *layout* inicial de referência é apresentado no ambiente virtual. Componentes que podem ser substituídos por outros modelos alternativos podem ser representados em cores diferentes, por exemplo.

#### Validação do desempenho do produto

Para validar o desempenho do produto, o ambiente virtual pode ser usado visando “experimental” o protótipo do produto virtualmente. A lógica de funcionamento do produto e as restrições de comportamento do modelo devem ser incluídas no ambiente, permitindo que o produto virtual funcione exatamente como o real.

No projeto B do estudo de caso realizado no ITIA-CNR, foi desenvolvida uma aplicação de realidade virtual que permitia ao usuário interagir de maneira imersiva com um eletrodoméstico para avaliar: diferentes tipos de *layout* do produto e as funcionalidades de novas interfaces projetadas (por exemplo, o painel de controle da máquina de lavar roupas). O usuário, com óculos 3D para visão estereoscópica, interagia com o ambiente, projetado em uma tela, selecionava e alterava alguns componentes do produto, mudando a sua configuração e testava o painel de controle do produto, selecionando funções do menu do eletrodoméstico com o movimento da sua mão.

### Validação da montagem do produto

Um ambiente virtual de montagem permite considerar antecipadamente as questões de montagem de sistemas e permite que novos produtos sejam analisados quanto à “montabilidade” sem comprometer capital requerido para produzir protótipos físicos. Realizando virtualmente as atividades de montagem, o projetista gera informações tanto sobre o produto quanto sobre o processo. O ambiente pode ser usado para avaliar questões de tolerância, selecionar a seqüência ótima de componentes, gerar planos de processos de montagem e desmontagem e visualizar os resultados. Métodos de detecção de colisão avisam se problemas de interferências e tolerâncias existem. O ambiente permite também verificar a possibilidade de um caminho de desmontagem no caso de um componente precisar ser removido para manutenção.

A montagem virtual pode gerar informações sobre a seqüência de componentes, trajetórias da montagem, orientação dos componentes na montagem, e dados de tolerância que fornecerão suporte às decisões na seleção do processo. Informações sobre a trajetória dos componentes podem ser enviadas ao sistema de análise da montagem (DFA) permitindo a geração de mudanças de projeto que poderiam ter um *feedback* para o processo de projeto. Informações podem ser usadas para treinar pessoal no processo de montagem; podem ser enviadas ao sistema de planejamento de processos; ou podem ser usadas para gerar informações para a trajetória do robô. O ambiente pode também gerar informações que auxiliarão no projeto de ferramentas especializadas de montagem.

*Feedback* de força tem também um papel importante na simulação virtual da montagem, permitindo ao projetista pegar a parte que está sendo projetada e montá-la sentindo a resistência devido à força do contato. Experimentos comparando tempos de manipulação e inserção da montagem em mundos real e virtual mostraram que *feedback* de força é benéfico em termos de eficiência de tarefa (BURDEA, 1999).

### ***Simulações Computacionais***

Diversos tipos de simulações podem ser utilizados para a análise e otimização de componentes, sistemas e produtos completos durante o Projeto Preliminar tais como simulação do comportamento mecânico estático, simulação do comportamento mecânico dinâmico, simulação de tolerância e simulação ergonômica do produto.

A *simulação do comportamento mecânico estático* consiste em uma ferramenta para modelagem, análise e visualização do comportamento estático de sistemas

mecânicos submetido à força, stress e variações de temperatura entre outros. Essa análise pode ser realizada através da simulação de elementos finitos.

Os tipos de análises realizadas por esse aplicativo são: estrutural (por exemplo, análise estática para encontrar stress em situações de carregamento estático; análise para calcular frequência e modelar formas de uma estrutura; análise harmônica para determinar respostas às cargas, variando no tempo); térmicas (calcular gradientes de temperatura, fluxo térmico de um objeto); campo magnético de um dispositivo; campo elétrico; fluido (características de fluxo de um fluido) e análises integradas (dois ou mais tipos de análises feitas de forma integrada).

Alguns sistemas CAD possuem um pós-processador que permite adicionar no modelo condições de carga de análise de elementos finitos; especificar tamanho máximo e mínimo para elementos locais e globais; especificar número de pontos na malha em uma margem e definir propriedades de material para o modelo.

Porém, em muitos casos, o procedimento utilizado é a importação do modelo CAD nos sistemas de simulação do comportamento estático e o pré-processamento desse modelo (definição dos tipos de elementos, propriedades materiais e criação da malha). Nesses casos, o sistema de simulação pode ou não ser capaz de aceitar um formato de arquivo CAD particular. Um formato neutro de troca de dados pode ser requerido tais como STEP, IGES, UPR e STL.

Um processo típico de análise de elementos finitos consiste em:

- *Pré-processamento*: o processo de análise de elementos finitos inicia-se com um pré-processador ou modelador de elementos finitos (*mesher*). Cria-se o modelo para análise. Nesse processo uma malha de elementos é criada que serve como dados físicos para análise. O modelo usado para isso pode ser um modelo CAD importado ou pode ser gerado internamente.
- *Solver*: é o processador da análise de elementos finitos. O elemento, condições de carga e limites são informações de entrada e uma solução, que contém informações requeridas para revisão e entendimento dos resultados é a informação de saída.
- *Pós-processadores*: criam gráficos, animações e relatórios, usando a informação de saída do *solver*.

Alguns pacotes de elementos finitos permitem a edição da peça, mas alguns permitem apenas edição limitada. As mudanças assim devem ser feitas no CAD e re-exportadas para o software de elementos finitos. A experiência do usuário é requerida para prever todos estes problemas e solucioná-los.

A *simulação do comportamento mecânico dinâmico* é uma ferramenta para modelagem, análise e visualização do comportamento de sistemas mecânicos em movimento que permite avaliar variações de projeto até alcançar a opção desejada e analisar o efeito de forças, acelerações e movimentos de componentes, sub-montagens, sistemas e veículos completos. Geralmente, essas simulações também utilizam a técnica de elementos finitos.

Esse tipo de simulação possibilita a modelagem de componentes (ou importação de montagens CAD) e a conexão desses componentes através de juntas, para produzir um completo modelo funcional da montagem do sistema. O usuário aplica forças, acelerações e movimentos, e executa o modelo por uma bateria de testes de movimentos 3D fisicamente realistas.

Alguns sistemas CAD são integrados via interface direta com esses aplicativos, permitindo que usuários verifiquem os caminhos dos movimentos e verifiquem as reações às forças no próprio ambiente CAD nativo. Porém, formatos neutros de arquivos como STEP e IGES podem ser usados para a transferência de dados entre CAD e simulação do comportamento dinâmico.

A integração deste tipo de simulação com a simulação do comportamento mecânico estático pode ser realizada através da troca de arquivos em formatos neutros bem como interfaces customizadas. Isso permite que usuários transfiram forças de reação a aplicativos de simulação de comportamento estático para análises estruturais (stress, fadiga, vibração e deformação).

A *simulação de tolerância* é uma ferramenta para análise 3D da tolerância e pode ser usada para analisar a geometria e as tolerâncias definidas no modelo CAD dos componentes. Variando uma característica de superfície, por exemplo, um furo na superfície, a tolerância aplicada ao *feature* e ao relacionamento deste *feature* com outros *features* presentes no componente pode ser analisada. O objetivo é fornecer uma representação 3D de como um componente pode variar dentro de suas especificações.

Quanto ao processo de montagem, a simulação de tolerância pode fornecer uma interface gráfica para a sua definição, incluindo seqüência e métodos de montagem os quais juntamente com as tolerâncias dos componentes são possíveis fontes de variação.

Geralmente, estes pacotes de simulação usam o método de simulação de Monte Carlo para identificar os possíveis problemas e prever a quantidade de variação, e a abordagem de Delineamento de Experimentos para determinar as causas da variação.

A *simulação ergonômica* do produto visa desenvolver produtos orientados ao homem e avaliar projetos baseados em fatores ergonômicos, considerando diferentes tamanhos e formas de pessoas no projeto antes da construção de protótipos.

O emprego de ferramentas de softwares para modelagem digital de humanos pode ajudar a analisar questões como encaixe, stress, conforto, fadiga e detectar colisões. Um modelo digital humano pode ser usado para representar humanos através de variáveis como peso, tipo de corpo, idade, altura. Esses modelos são importantes quando a avaliação e a análise de características e ações humanas são relevantes para o DP e quando pode ser impossível testar pessoas reais em uma situação particular.

Geralmente, os modelos humanos são baseados em base de dados antropométricas, sendo possível escolher o tipo de humano que o estudo considera, e em alguns modelos existe ainda a possibilidade de alterar porções de parte do corpo.

#### *Sistema de DMU para visualização eficaz do produto*

Quando diferentes peças ou subsistemas ocupam as mesmas coordenadas no espaço geométrico 3D, elas interferem umas com as outras, ou seja, elas não se encaixam. Esses problemas são conhecidos como problemas de interferência e são bastante comuns durante a integração geométrica de um produto complexo.

Integrados a sistemas CAD, sistemas de *Mockup* Digital permitem a manipulação de grandes bases de dados e a visualização 3D da montagem completa do produto com toda a complexidade interna para o encaixe e análise de interferência da montagem final. O sistema de DMU realiza a leitura de dados do Sistema CAD, permitindo a visualização geométrica do produto (sólido; superfície; *wireframe*). Além de dados geométricos, dados estruturais também são necessários para a sua realização.

Dessa forma, sistemas DMU devem ser integrados aos sistemas CAD, pois ele não usa cópias ou duplicações de arquivos de sistemas CAD, mas acessam os arquivos diretamente usando, normalmente, ferramentas dentro do CAD para extrair dados geométricos. Apesar de diversos sistemas CAD possuírem um módulo de montagem, ele é, geralmente, uma ferramenta para posicionar os componentes da montagem em suas localizações corretas e capturar a árvore de montagem, sendo uma abordagem estática. Por outro lado, sistemas DMU enriquecem os modelos CAD com atributos de movimentação para que o comportamento real do produto possa ser animado e simulado.

As principais características dos Sistemas DMU são: interação, visualização e análise de um modelo digital para a identificação de falhas no projeto de forma colaborativa (até com membros em locais diferentes); fornecimento de ferramentas para checar interferência entre peças, seccionar, medir e filtrar atributos ou peças; realização do *fly-through*; inspeção visual dos modelos e montagens; visualização interativa de grandes bases de dados; integração e análise de dados de diferentes sistemas CAD.

Aprimorando ainda mais a capacidade de análise do projeto, um sistema DMU com interface em RV permite a visualização e interação simultânea com os modelos em um sistema de projeção estereoscópica durante as reuniões de revisão de projeto. O modelo 3D pode ser exibido usando equipamentos especiais de visualização e interação. Esse ambiente interativo também pode ser aproveitado para a apresentação do produto ao cliente e time de desenvolvimento e como uma nova forma de impulsionar as vendas.

A verificação dos procedimentos de manutenção do produto também pode ser realizada nesse ambiente com a adição de ferramentas de modelagem de humanos. Procedimentos são analisados para verificar se são compatíveis com os movimentos limites, ou seja, com a possibilidade de acesso do operador às peças. As ferramentas de modelagem humana permitem a realização de análises estáticas e dinâmicas de postura, identificando, de acordo com o perfil antropométrico da população, a possibilidade de desenvolvimento de lesões musculares.

### ***Sistema de Prototipagem Rápida***

Durante o Projeto Preliminar, a prototipagem rápida pode ser usada para análise final da estética e ergonomia, avaliações finais de montagem e geração de modelos para processos de fundição e moldagem.

Quanto à verificação da estética e ergonomia do produto, a Prototipagem Rápida proporciona ao projetista a noção de tamanho. Modelos físicos permitem checar a ergonomia do produto como, por exemplo, verificar o encaixe de um aparelho celular na palma da mão do usuário e inspecionar o produto para verificação de quinas perigosas.

A montagem de componentes criados com a prototipagem rápida é possível, porém sujeita a ocorrência de empenamento e encolhimento. Isso influenciaria na verificação de interferências e encaixe (tarefa também realizada pelos sistemas de DMU e montagem virtual). De um outro lado, permitem testar diferentes seqüências de montagem, inserir peças em movimentos não lineares e verificar o ângulo para a inserção.

A Realidade Virtual pode ser usada interativamente com a prototipagem rápida, permitindo o uso mais efetivo e o melhor planejamento através da visualização antecipada, teste de encaixe e funcionalidade, ou seja, através da exploração mais rápida de critérios de projeto funcionais, estéticos e ergonômicos.

#### *Ambiente de Projeto do Processo*

Para o desenvolvimento do plano macro dos processos de fabricação e montagem utiliza-se como suporte o Sistema de Planejamento de Processos.

#### *Sistema de Planejamento de Processos*

O planejamento macro dos processos inicia-se nesta etapa do PDP através, primeiramente, da busca de planos de processos que possam ser reutilizados. Quando planos semelhantes não são encontrados, um plano macro é então definido nesta etapa através da definição preliminar das operações macro de fabricação e montagem. Um fluxo preliminar de processos, definido utilizando-se a estrutura do produto e o plano macro de fabricação e montagem é analisado. Esses planos macros gerados nesta etapa são, então, detalhados na etapa de Projeto Detalhado.

O Sistema de Planejamento de Processos deve apoiar os estágios de projeto preliminar e detalhado fornecendo *feedback* da manufatura quanto às várias configurações do produto e auxiliar na definição de custos e metas para *lead time* através da definição de planos de processos macro e detalhados. Quando a configuração final do produto, incluindo montagens e componentes, estiver pronta, planos de processo são avaliados e quando requerido modificados com base na configuração do produto.

As características e funcionalidades deste sistema estão apresentadas no item 5.4.3.3. da próxima etapa do PDP.

#### *5.4.2.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para o Projeto Preliminar*

Segundo dados obtidos no estudo de caso realizado no ITIA-CNR, no âmbito da empresa considerada no projeto B, a busca por uma solução ao problema descrito no capítulo 4 foi bastante importante para o desempenho do PDP da empresa. A potencialidade do emprego de tecnologias como a Realidade Virtual e simulações e do emprego das técnicas de projeto integrado gerou como principais resultados uma

significativa redução nos custos de prototipação e uma ampliação das possibilidades de explorar soluções avançadas.

O Projeto B mostrou que, principalmente no campo das verificações de projeto, a aplicação de ambientes de RV proporcionou resultados muito satisfatórios. Durante o PDP tradicional da empresa, diversas verificações eram realizadas através de modelos físicos (*mockups*, protótipos funcionais e semi-funcionais, etc). A elaboração destes modelos resultava em longos períodos de tempo, elevados custos e, em muitas vezes, na necessidade de compartilhar informações importantes com parceiros externos e fornecedores que por motivos de segurança seria melhor não divulgar. O uso da Manufatura Virtual resultou na redução destas desvantagens, proporcionando os seguintes benefícios à empresa:

- redução da quantidade de protótipos físicos necessários; o número de protótipos caiu de oito, no PDP inicial da empresa, para dois protótipos após a implementação da Manufatura Virtual;
- redução do número de ordens de mudança de engenharia, principalmente devido à comunicação mais efetiva e maior colaboração de projeto;
- redução do custo com testes funcionais reais que, antes da Manufatura Virtual, correspondia a 40% do custo total de desenvolvimento, passando a 20% após a implementação da Manufatura Virtual;
- habilidade de visualizar a geometria das bases de dados de projeto do produto usando RV permitiu o alcance de um melhor senso de entendimento da funcionalidade, escala, estética e ergonomia dos produtos;
- engenheiros de produto, de manufatura, pessoal de manutenção e até clientes puderam visualizar e operar produtos virtuais complexos para melhorar a manufaturabilidade, ergonomia e manutenibilidade.

Além disso, o novo ambiente de projeto acrescentou ao PDP existente na empresa as seguintes melhorias:

- Integração do desenvolvimento do projeto estético com o projeto funcional através de ambientes virtuais;
- Validação estética e ergonômica do produto em ambiente virtual, integrando inclusive a interação do cliente com o produto;
- Validação funcional do produto mediante testes experimentais através da prototipagem rápida.

Também foi possível observar que, durante a fase de projeto e detalhamento do produto, na qual uma das necessidades era a realização de revisões freqüentes de projeto, ambientes de realidade virtual forneceram um mecanismo bastante efetivo para integrar o trabalho de diferentes membros do PDP e diferentes processos, propiciando a discussão e tomada de decisões de modo cooperativo. Revisões colaborativas de projeto permitiram a avaliação rápida de idéias individuais no contexto da montagem, manutenção e usabilidade do produto.

Através de ambientes de Realidade Virtual, as empresas podem usufruir uma importante ferramenta de simulação em tempo real para melhorar a colaboração em projeto. Esses ambientes facilitam a habilidade do engenheiro envolver todos os *stakeholders*, independente da localização ou área funcional, no desenvolvimento do produto, desde o refinamento da estética, ergonomia e funcionalidade do produto até a capacidade da empresa em fabricar e montar o produto.

Outra questão importante é integrar nesta etapa diversos tipos de sistemas de simulação visando otimizar o desempenho do produto. A proliferação da simulação computacional no desenvolvimento de produtos tem tido impacto na rápida e antecipada identificação e resolução de problemas funcionais. As vantagens de substituir modelos físicos reais por modelos computacionais (simulação) têm se mostrado bastante significativas (THOMKE; FUJIMOTO, 2000).

Quanto à validação de montagens de produtos, o uso de sistemas de DMU também pode apresentar benefícios, melhorando o *layout* do sistema pois: permite a verificação da possibilidade do sistema conter todos os subsistemas previstos e checka o posicionamento correto de cada subsistema; permite uma estimativa mais precisa do centro de gravidade e quantidades geométricas; permite estudos preliminares de características de manutenção e da interface entre elementos estruturais e subsistemas. DMU consiste em um eficiente meio de integrar o Projeto Preliminar com uma metodologia orientada em direção à manutenibilidade, segurança e resistência.

A vantagem de montar um produto em um ambiente virtual está, em primeiro lugar, na redução de custos de projeto à medida que nenhum componente físico precisa ser produzido. Também pode ser associado ao tempo de desenvolvimento que pode ser economizado na produção de ferramental. A montagem em ambiente virtual pode ser realizada rapidamente (em questão de minutos), bem mais rápido do que construir componentes reais para montá-los. Em um ambiente virtual é possível também construir ou mudar um componente e modificar seus atributos. Relacionamentos de montagem

podem ser escritos em parâmetros de engenharia, dimensão da parte e orientação. Avaliação de especificações de tolerância do projeto para otimizar o desempenho de engenharia ao mais baixo custo possível também pode ser realizada. Como consequência, custos de manufatura podem ser reduzidos intensificando as tolerâncias que contribuem mais com variações da dimensão crítica, e perdendo tolerâncias que tem pouco impacto.

A montagem de peças de prototipagem rápida pode complementar as técnicas acima, pois permite que usuários verifiquem não apenas a seqüência de montagem e possíveis quinas perigosas, mas também se uma peça pode ser posicionada através de um movimento linear ou se a peça precisa ser posicionada em ângulo antes de ser inserida na sua devida localização.

A importância dos processos de Prototipagem Rápida a serem utilizados, especialmente para a redução dos tempos de desenvolvimento, aumentou nos últimos anos (UHLMANN; SCHAPER, 2004). As vantagens universais são a produção rápida e econômica de protótipos e a pequena demanda de pessoal. Outro motivo para a sua ampla utilização é o seu potencial na produção direta de ferramentas e matrizes (ferramental rápido), que podem ser utilizados para pequenos lotes.

Portanto, alguns benefícios gerais para a etapa de Projeto Preliminar podem ser mencionados com a aplicação da Manufatura Virtual:

- redução do *time-to-market* à medida que a solução fornece a definição completa e precisa da geometria do produto para as atividades posteriores como análise, planejamento de processos e produção;
- redução do custo do produto, pois usando ferramentas 3D e RV para realizar o protótipo virtual engenheiros podem reduzir o custo da prototipagem física;
- resposta mais rápida aos requisitos dos clientes, pois tendo um modelo digital associativo que se atualiza a medida em que mudanças são feitas, projetistas podem executar e avaliar o impacto de mudanças nos requisitos dos clientes mais rapidamente e facilmente.

#### ***5.4.2.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Preliminar***

Apesar de todos os benefícios associados à implementação da Manufatura Virtual nesta etapa do PDP, alguns desafios e dificuldades podem ser citados.

Em primeiro lugar, uma questão que parece ser bastante simples, que é o uso de um sistema CAD, pode trazer algumas complicações para a realização de outras tarefas do PDP. A grande diversidade de aplicativos CAD disponíveis comercialmente torna a definição de um sistema mais adequado para determinada aplicação uma tarefa bastante representativa (SOUZA; COELHO, 2004). Não é raro encontrar empresas que, por falta de entendimento e conhecimento, investem em um determinado sistema e depois verifica que não era o mais adequado para as suas necessidades.

No desenvolvimento do Projeto B a escolha dos aplicativos de software para o desenvolvimento do modelo CAD 3D, do modelo virtual e dos modelos de simulação foi uma questão bastante considerada e analisada. Várias alternativas foram avaliadas, verificando a possibilidade de se alcançar uma completa integração entre estes sistemas.

Mais uma vez aqui nesta etapa, a conversão de geometrias CAD em objetos virtuais a serem utilizados em aplicações de RV também se apresenta como uma questão crítica para a Manufatura Virtual. Dados CAD são, normalmente, complexos e apresentam cada detalhe do objeto. Esse detalhamento não é compatível para a simulação em tempo real devido às cenas altamente detalhadas que devem ser processadas. Os problemas encontrados neste processo de conversão derivam basicamente do fato de que o modelo de engenharia não é construído com a preocupação de ser utilizado para visualização em tempo real. Na realidade, os problemas originam-se nas diferenças entre um modelo CAD e um modelo de RV, sendo que cada um deles atende a objetivos diferentes.

Segundo Corseuil et al. (2003), não existe ainda um ambiente integrado onde se possa migrar do modelo CAD para o modelo de RV e vice-versa, permitindo maiores interações para que ajustes necessários sejam feitos. O processo de conversão existente consiste em traduções diretas e imprecisas do modelo CAD para o objeto virtual. Além disso, quando engenheiros, trabalhando em um modelo do produto dentro de um ambiente virtual, geram informações importantes, que resultam em modificações no modelo do produto ou auxiliam na definição dos processos de montagem, existe a necessidade de que essas informações sejam incluídas manualmente no modelo CAD.

Segundo os autores, os problemas apresentados para a conversão da geometria e o fato de que ainda não foram resolvidos por nenhuma solução comercial ou acadêmica, restringem, mas não impedem, o uso de ambiente virtuais nas empresas. Na situação atual, o processo deve ser feito por partes, com intervenções não automatizadas e particulares para o modelo a ser trabalhado. Mesmo assim, comercialmente existe um

ganho nas empresas que empregam a realidade virtual em relação ao modelo físico de engenharia, como já mencionado no item anterior.

Esse problema de conversão de geometrias foi observado durante a realização do projeto B do estudo de caso 2, onde a integração entre o sistema de modelagem usado pela empresa e a aplicação de realidade virtual desenvolvida mostrou-se uma tarefa um pouco crítica. Os modelos geométricos do ambiente virtual (eletrodoméstico e local de uso do produto) foram criados utilizando-se um modelador sólido, denominado Rhino. Porém, no formato fonte proprietário, os arquivos não podiam ser diretamente inseridos no ambiente de realidade virtual, pois a descrição virtual da forma deveria ser feita por meio de polígonos (triângulos).

Para tanto, foi utilizado o OpenFlight (FLT) da empresa Multigen Paradigm que é o formato mais popular para aplicações 3D em tempo real. Os arquivos geométricos provenientes dos softwares de modelagem (Rhino) eram traduzidos em arquivos FLT. Em seguida, o modelo FLT passava por um processo de melhoria e acabamento do aspecto visual (cores, luzes, materiais eram aperfeiçoados para se alcançar um grau mais elevado de realismo) usando um modelador específico que permitia trabalhar diretamente em FLT.

Um aspecto muito importante e crítico a ser considerado em uma conversão de arquivos é o *número total de polígonos* que compõe a geometria, pois isso influencia muito no desempenho da renderização em tempo real e no desempenho da própria aplicação, sendo que objetos 3D muito complexos prejudicam o desempenho da renderização. Muitas vezes, torna-se difícil encontrar um ponto de equilíbrio entre a complexidade e o nível de detalhes de um modelo e o número de triângulos, sendo que a aplicação de RV deve ter um taxa de atualização mínima de 20 Hz (30 vezes por segundo todas as geometrias devem ser atualizadas) para garantir a continuidade do movimento.

Dessa forma, a solução adotada pela empresa foi a construção de geometrias simples, sem perder o grau de realismo. Para otimizar a quantidade de triângulos, foram eliminadas todas as partes do produto que não eram visualizadas no mundo virtual. Por exemplo, toda a mecânica interna do eletrodoméstico não foi representada no projeto.

Ainda com base na experiência do Projeto B, outras dificuldades foram encontradas: a complexidade para integrar os diversos modelos de simulação utilizados, necessitando da definição de protocolos de troca das informações; e a certificação de

que os modelos de simulação eram realmente capazes de definir os limites e as condições operacionais dos sistemas e sub-sistemas, ou seja, a validação dos modelos.

Para validar os modelos de simulação, a empresa analisou duas alternativas: o desenvolvimento do modelo de um produto já existente visando à realização de testes experimentais; e a prototipagem rápida. Uma questão crítica quanto ao primeiro procedimento é o tempo necessário envolvido e o fato de que a simulação do produto existente muitas vezes não é por si só interessante. Em outros casos, pode ser difícil selecionar um produto que seja suficientemente semelhante à nova solução para se obter resultados significativos para a validação. Quanto ao segundo procedimento, que foi escolhido pela empresa, apresentou como ponto crítico o uso de materiais e processos diferentes dos componentes da produção final. Nesse caso, torna-se necessário encontrar uma correlação que permita transferir os resultados das verificações experimentais realizadas com o protótipo ao produto final.

Ainda quanto aos sistemas de simulação, o seu uso efetivo requer habilidades específicas e experiência. Por exemplo, no caso de um sistema de análise do comportamento estático (análise de elementos finitos) existe a necessidade da habilidade e do conhecimento do usuário, que deve ser familiar com os conceitos e termos usados na modelagem de elementos finitos. A troca de dados não é a única barreira para transferir dados da peça para um software de elementos finitos. O julgamento do usuário é importante, pois deve definir fatores que facilitem a análise como, por exemplo, a possibilidade de suprimir alguns *features* da peça, mas ao mesmo tempo sem prejudicar a integridade dos resultados da análise.

Quanto ao uso de técnicas de prototipagem rápida, a análise da interferência e encaixe da forma com peças obtidas através da PR pode ser influenciada pelo risco de empenamento e encolhimento. Os problemas de peças que não se encaixam bem ou que interferem com outras podem ser atribuídos ao encolhimento, empenamento ou, então, erros de projeto. Mesmo quando as peças obtidas através da PR se encaixam bem, não existe a garantia que elas estejam dimensionalmente corretas. Sistemas DMU e montagem virtual podem ser usados para determinar se a interferência ocorre ou se o encaixe não está correto devido às falhas no projeto.

#### 5.4.2.6. Resumo da etapa de Projeto Preliminar

A tabela 8 apresenta um resumo da análise para a etapa de Projeto Preliminar.

Tabela 8 – Resumo da Análise da Utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Projeto Preliminar

Atividades do PDP	Limitações atuais	Proposta da Manufatura Virtual	Benefícios	Desafios
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Refinar a arquitetura do produto;</li> <li>- Detalhar preliminarmente os SSCs;</li> <li>- Planejar o processo de manufatura macro;</li> <li>- Desenvolver testes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de representações completas do produto;</li> <li>- Ciclos tradicionais projetar-construir-testar com protótipos físicos;</li> <li>- Simulação computacional ainda não é uma ferramenta completamente utilizada;</li> <li>- Análise de montagens através de mockups físicos e linha de montagem final;</li> <li>- Dificuldade de reuso de componentes e sistemas;</li> <li>- Meios tradicionais de comunicação e colaboração para times dispersos de projeto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Representação completa do produto através do modelo CAD 3D;</li> <li>- Utilização da Prototipagem Virtual, Simulações Computacionais, DMU e Prototipagem Rápida para análise e validação do projeto;</li> <li>- Início do planejamento macro de processos;</li> <li>- Uso de bases de dados e sistemas integrados que permitem o reuso de informações;</li> <li>- Ambientes virtuais para colaboração em projeto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução da quantidade de protótipos físicos necessários;</li> <li>- Redução do número de ordens de mudança de engenharia;</li> <li>- Redução do custo com testes funcionais reais;</li> <li>- Integração do trabalho de diferentes membros do PDP e diferentes processos através da RV;</li> <li>- Resposta mais rápida aos requisitos dos clientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escolha dos sistemas de software adequados;</li> <li>- Conversão de geometrias CAD em objetos virtuais;</li> <li>- Complexidade para integrar e validar os modelos de simulação;</li> <li>- Informações obtidas no ambiente virtual devem ser manualmente inseridas no modelo CAD;</li> <li>- Possibilidade de empenamento e encolhimento dos protótipos obtidos através da PR.</li> </ul>

#### 5.4.3. Projeto Detalhado

O Projeto Detalhado possui como principal objetivo entregar a documentação do produto pronta, onde estarão especificadas e avaliadas as tolerâncias dos SSCs, os desenhos dos conjuntos, e a lista de materiais completa. O produto é, finalmente, otimizado e inicia-se o detalhamento do plano dos processos de fabricação e montagem do produto.

Além do estabelecimento do plano de processos, os recursos são identificados e gerenciados, as ferramentas e os dispositivos são selecionados e projetados, programas CN são definidos e as operações manuais envolvidas em processos são definidas e avaliadas. Diversas verificações e validações como, por exemplo, validação de

programas CN, de robô, das operações manuais são realizadas usando diversos tipos de simulações.

Dessa forma, durante esta etapa é gerada toda a documentação de controle do produto, contendo desenhos e arquivos computacionais descrevendo a geometria de cada peça, as especificações das peças compradas e os planos dos processos para a fabricação e montagem.

#### **5.4.3.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Projeto Detalhado**

Os principais focos para a aplicação da Manufatura Virtual nesta etapa são a atividade de projeto e validação dos processos de fabricação e montagem e a integração entre essa atividade com o projeto do produto. As principais limitações consideradas estão apresentadas abaixo.

O projeto dos processos de manufatura é também composto de uma série de ciclos projetar-construir-testar. Tradicionalmente, essa atividade inicia-se com o desenvolvimento de um plano macro para todo o sistema produtivo. Em seguida, planos para processos individuais são desenvolvidos, e a seleção e o projeto de ferramentas e equipamentos são realizados. Esta etapa segue, então, com a construção e instalação das ferramentas, máquinas e equipamentos, realização de *try-outs*, e testes de ferramentas e equipamentos (CLARK; FUJIMOTO, 1992).

A identificação de problemas nos planos de processos ocorre, muitas vezes, no chão-de-fábrica. É na realização dos *try-outs* que a maior parte dos ajustes são realizados e o ciclo projetar-construir-testar continua até que o processo desejado seja alcançado.

Mais do que nunca, o projeto de estações de trabalho, de equipamentos e de mecanismos complexos deve considerar o fator humano, ou seja, questões relacionadas à ergonomia e à possibilidade do operador realizar o trabalho de forma segura. Tradicionalmente, engenheiros industriais têm despendido tempo e dinheiro na construção de *mockups* de estações de trabalho visando avaliá-las quanto a estas questões.

Em muitos casos, pressões para redução de custos e sobrecarga de trabalho nos departamentos de planejamento levam ao projeto ineficiente de estações de trabalho. Isso por sua vez, resulta em um pobre desempenho do trabalho e em baixa satisfação da mão-de-obra. Mais do que nunca, empresas precisam de ferramentas de planejamento com as quais estações manuais ou parcialmente automatizadas de trabalho possam ser

projetadas e testadas rapidamente, a um custo efetivo, e considerando aspectos de ergonomia.

Integrar a definição dos processos de manufatura com as atividades de projeto do produto é uma outra questão que pode ser abordada nesta etapa. Em muitas empresas, as atividades de projeto do produto e planejamento dos processos são fragmentadas e difíceis de serem gerenciadas e coordenadas (CROW, 2000; FENG; SONG, 2000; LEE et al., 2001).

Um dos motivos para tal dificuldade de integração está na falta de uma representação completa do produto contendo informações relevantes para o planejamento dos processos, na utilização de diversos sistemas, cada um armazenando seus próprios dados do produto e na utilização de bases de dados desconectadas para peças, planos de processos e ferramentas. Alcançar uma visão global de todos os dados envolvidos no PDP torna-se uma tarefa complexa. E, dessa forma, apesar da existência de eficientes sistemas de projeto do produto e dos processos, existe a dificuldade em identificar nas primeiras etapas do PDP se o projeto que está sendo desenvolvido apresentará um custo elevado ou se ele será até mesmo impossível de ser produzido.

#### **5.4.3.2. Proposta da Manufatura Virtual para o Projeto Detalhado**

Para a etapa de Projeto Detalhado, a Manufatura Virtual pode gerar impactos, principalmente, no projeto e validação dos processos de manufatura e na sua integração com as atividades de projeto do produto.

A documentação do produto é finalizada utilizando-se um sistema CAD que permite a geração de desenhos de produção a partir de modelos CAD 3D completos. As tolerâncias dimensionais dos SSCs podem ser analisadas e otimizadas através da simulação computacional, e o projeto do produto é finalizado.

Um plano detalhado de processos de fabricação e montagem deve ser gerado. Dados que direcionam esta atividade de planejamento incluem uma definição paramétrica baseada em *feature* do produto a ser manufaturado. Isso tem permitido a possibilidade de geração do processo automaticamente a partir dos dados de *features* e geométricos contidos no modelo. Dessa forma, dados de projeto do produto como *features*, dimensões, tolerâncias, acabamento, podem ser associados com processos específicos de manufatura e mesmo com uma parte específica do equipamento. Essa capacidade pode permitir que ferramentas de projeto forneçam orientação de manufaturabilidade diretamente ao projetista enquanto o produto está sendo

desenvolvido. Também re-orienta o projetista que, normalmente, pensa apenas em termos de geometria da parte, passando a pensar em termos de processos de manufatura e nas implicações de suas escolhas em termos de custos e qualidade. Esse tipo de informação de projeto facilita, então, o planejamento do processo e a manufatura auxiliada por computador.

Sistemas CAPP têm se desenvolvido das capacidades tradicionais (volume a ser usinado, seleção de parâmetros de corte, análise de tolerância) para capacidades modernas (planejamento automático de *set-up*, seleção de ferramentas e equipamentos).

Como as operações de manufatura demandam, cada vez mais, maiores níveis de eficiência, os softwares CAM usados no ambiente de Manufatura Virtual para usinar ou medir peças devem apresentar ferramentas mais precisas para o corte ou medição de peças complexas. As novas tendências dos sistemas CAM - associatividade entre a geometria do modelo e os caminhos das ferramentas para a programação de CN e a ponta de prova para a programação de MMC; usinagem ou medição baseada no conhecimento (captura técnicas de usinagem de um operador experiente ou de um programador de controle numérico); reconhecimento de “*feature*” (permite ao sistema automaticamente reconhecer “*features*” da peça e configurar padrões de operação); usinagem de alta-velocidade (realização de cortes pequenos e leves ao invés de grandes e pesados), e capacidade de usinagem e medição de modelos sólidos - requerem uso de modelos sólidos CAD 3D ou superfícies com precisão (RAVELLI, 2003).

A Manufatura Virtual propõe o uso dessas novas tendências em sistemas CAM em conjunto com a simulação de processos, visando a redução do tempo de programação, correção de erros e otimização dos programas. Processos de fabricação e montagem são simulados e diversas alternativas podem ser verificadas primeiramente por meio de softwares modernos de simulação e não diretamente no chão-de-fábrica usando máquinas e equipamentos reais. Processos de usinagem de CN, por exemplo, são verificados e otimizados antes da sua implementação no chão-de-fábrica. Células robóticas são programadas *off-line* e simuladas em computador para verificar possíveis colisões e erros de programa. Fatores ergonômicos de estações de trabalho, equipamentos e mecanismos complexos são verificados e validados através de simulação computacional visando otimizar o projeto e identifica problemas antes de sua implementação no chão de fábrica.

#### 5.4.3.3. Modelo Proposto para o Projeto Detalhado em Ambiente de Manufatura Virtual

As principais atividades da etapa de Projeto Detalhado que podem ser apoiadas com o uso de sistemas da Manufatura Virtual são (figura 22): detalhar e avaliar a documentação do produto, otimizar o produto, planejar detalhadamente os processos de fabricação e de montagem, e definir e projetar os recursos de produção (equipamentos, ferramentas, dispositivos, calibradores).

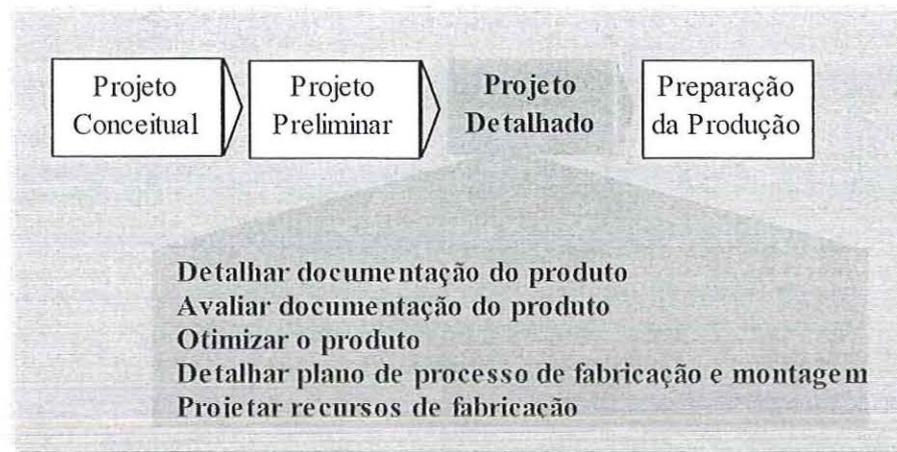


Figura 22 – Atividades do Projeto Detalhado que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual

Para a aplicação da Manufatura Virtual nesta etapa do PDP, os seguintes sistemas são utilizados: CAD, simulação de tolerâncias, planejamento de processos, gerenciamento de recursos, programação de CN, simulação de máquinas de CN, de robôs e de máquinas de medição por coordenadas e simulação de operações humanas. A tabela 9 apresenta a relação desses sistemas com as atividades do Projeto Detalhado.

Tabela 9 – Relação das atividades do Projeto Detalhado com os sistemas da Manufatura Virtual

Etapas e Atividades do PDP	Sistemas																			
	Projeto Conceitual	CAD	Mockup Digital	Simulação Ergonômica	Simulação Comportamento Dinâmico	Simulação Comportamento Estático	Simulação de Tolerância	Prototipagem Rápida	Desenvolvimento de Aplicações de RV	Planejamento Processos	Gerenciamento de Recursos	Programação de CN	Simulação de Máquina CN	Simulação Caminho da Ferramenta	Simulação de Robô	Simulação MMC	Simulação das Operações Humanas	Projeto do <i>Layout</i>	Simulação de Eventos Discretos	DMU da Fábrica
<b>Projeto Detalhado</b>																				
Detalhar documentação do produto	●																			
Avaliar documentação	●					●														
Otimizar produto						●														
Detalhar plano de processos								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Projetar recursos								●		●										

O Modelo Proposto para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Detalhado pode ser visualizado na Figura 23, na qual as atividades são realizadas com o suporte de um conjunto de sistemas.

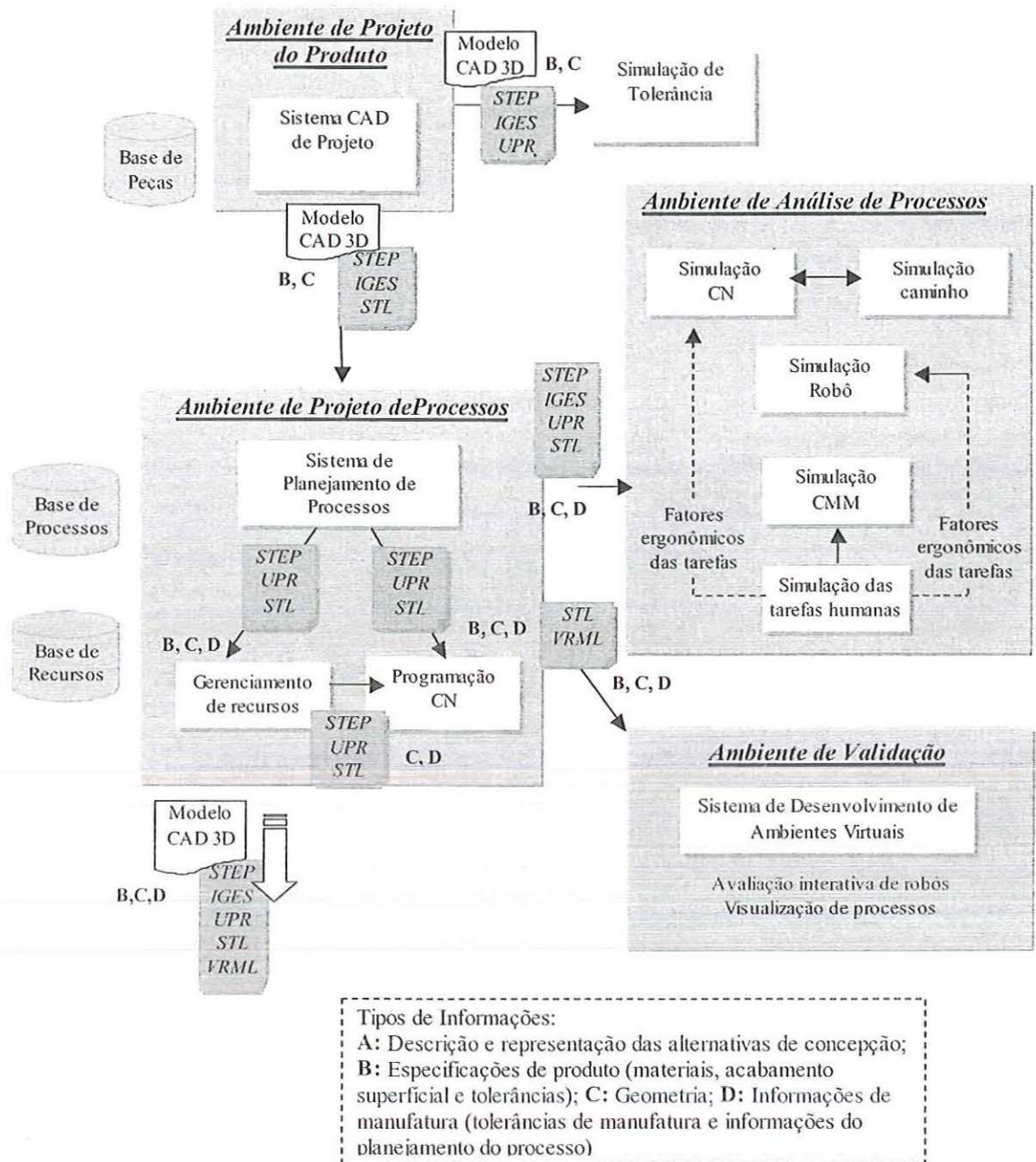


Figura 23 – Modelo Proposto para o Projeto Detalhado em ambiente de Manufatura Virtual

A metodologia proposta para a realização desta etapa é:

- Finalização do Modelo CAD 3D, que conterà informações completas para a realização das demais atividades;
- Validação das tolerâncias dimensionais;
- Criação dos desenhos do produto;

- Geração dos planos detalhados de processos de fabricação e montagem com base no Modelo CAD 3D;
- Verificação, no Sistema de Gerenciamento de Recursos, da disponibilidade das ferramentas, dispositivos e máquinas a serem utilizados;
- Projeto de ferramentas e dispositivos, caso necessário;
- Criação dos programas de CN para máquinas, células robóticas e MMC;
- Verificação e validação dos processos de fabricação e montagem através de simulações computacionais e ambientes de Realidade Virtual;

#### *Ambiente de Projeto do Produto*

Esse ambiente é composto pelo Sistema CAD de Projeto que já foi descrito na etapa de Projeto Preliminar e é utilizado nesta etapa para detalhar e concluir a documentação do produto e criar desenhos para a produção.

#### *Ambiente de Análise do Produto*

Esse ambiente é composto pelo Sistema de Simulação de Tolerâncias que também já foi descrito na etapa anterior. Esse sistema é utilizado para a verificação detalhada das tolerâncias dimensionais dos SSCs e a otimização final do produto.

#### *Ambiente de Projeto dos Processos*

O Ambiente de Projeto dos Processos engloba sistemas para o planejamento de processos, para o gerenciamento de recursos e para o desenvolvimento de programas de CN.

#### *Sistema de Planejamento de Processos*

O Sistema de Planejamento de Processos é tido como parte fundamental de um ambiente de Manufatura Virtual por ser um elo de ligação entre dados de projeto (CAD) e de fabricação (CAM). Consiste na aplicação central dessa etapa que permite a elaboração de planos de fabricação e montagem contendo dados dos processos que descrevem como os produtos são fabricados e montados usando os recursos disponíveis. Esse sistema, integrado a outros aplicativos, permite a criação de instruções detalhadas de trabalho para operações específicas.

As principais funcionalidades buscadas no Sistema de Planejamento de Processos para a elaboração dos planos de processos são (SOUZA et al., 2002; RAVELLI, 2003):

- Definir necessidades geométricas - habilidade de definir requisitos baseados no projeto do produto (arquivo CAD 3D) - e necessidades não-geométricas - habilidade de definir o consumo do material que não é definido no projeto do produto;
- Criar listagem de material de manufatura (MBOM) e informações associadas, tais como listagem das estações de consumo e datas de efetivação;
- Planejar o ponto de uso (como componentes comprados devem ser entregues ou armazenados);
- Definir roteiro primário (seqüência primária de operações);
- Definir máquinas e estações para fabricação/montagem e configurações (set-ups);
- Definir listagem de material processado (componentes consumidos na operação);
- Determinar sub-montagens para melhorar o processo de manufatura;
- Definir seqüência relativa de operações, tempo de ciclo e instruções textuais e gráficas;
- Emitir o plano de processo;
- Elaborar instruções detalhadas de: primeiras operações (corte e dobra de chapas), soldagem, pintura, tratamento térmico;
- Aplicar tempos padrões;

Um exemplo de Sistema de Planejamento de Processos pode ser visualizado na figura 24.

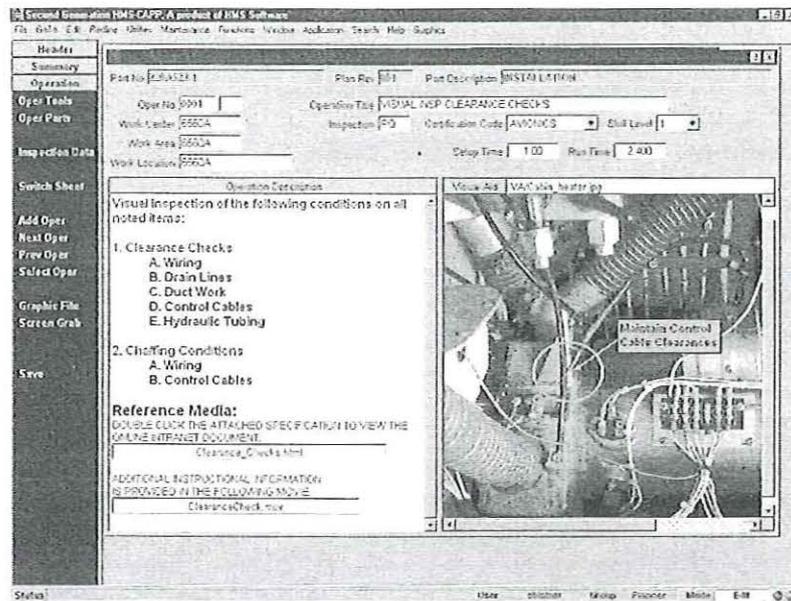


Figura 24 – Exemplo de software de Planejamento de Processos

Fonte: HMS (2005)

O Sistema de Planejamento de Processos deve ser integrado ao sistema CAD de projeto do produto, pois os planos são desenvolvidos com base nos modelos CAD e deve ser integrado ao Sistema de Gerenciamento de Recursos para obter feedback sobre a disponibilidade e as restrições dos recursos. Os dados de entrada para o Sistema de Planejamento de Processos são: especificações de produto (material, acabamento superficial, tolerâncias) e geometrias de componentes, sub-sistemas e sistemas. Desse sistema, informações são passadas para o Sistema de Gerenciamento de Recursos, Sistema de Programação de CN e os Sistemas de Simulação.

Segundo Ravelli (2003), algumas tarefas realizadas durante o planejamento de processos não requerem o uso de modelos sólidos CAD de alto-nível. Pode-se adotar o uso de modelos gráficos simplificados 3D, capazes de mostrar informações de parâmetros do modelo fonte, para a visualização da geometria do produto de forma fácil e rápida. Esses formatos possibilitam a descrição dos contornos de um objeto que pode ser transferida para o sistema de planejamento e permitem a fácil criação de *mockups* para a verificação do projeto. Pode-se utilizar formatos neutros de visualização de imagem como o STL, criados e gerenciados em adição ao modelo CAD fonte.

Para o compartilhamento da geometria exata, de informações de especificações de produto e de informações de processos de manufatura entre o Sistema de

Planejamento de Processos e outros aplicativos do ambiente de Manufatura Virtual o formato STEP pode ser o mais indicado, pois já conta com recursos para a manipulação da maioria dos diferentes tipos de dados identificados para o planejamento de processos, incluindo parâmetros de processo, requisitos de tolerância e acabamento superficial, entre outros (RAVELLI, 2003).

### ***Sistema de Gerenciamento de Recursos***

Recursos referem-se às máquinas de CN, máquinas de manuseio manual, espaço no chão-de-fábrica, células de trabalho, equipamentos, ferramentas e dispositivos de suporte e requisitos de mão-de-obra. O Sistema de Gerenciamento de Recursos deve atuar de forma integrada ao Planejamento de Processos fornecendo *feedback* sobre a disponibilidade e restrições de máquinas, ferramentas e calibradores. Além disso, fornece ao Sistema de Programação de CN a geometria dos recursos e informações de manufatura (tolerâncias de manufatura, por exemplo).

As principais funcionalidades requeridas nos sistemas aplicativos integrados ao Planejamento do Processo são (SOUZA et al., 2002; RAVELLI, 2003):

- Avaliar se recursos de chão-de-fábrica são suficientes para o plano de processo;
- Gerenciar ferramentas e calibradores;
- Verificar a existência de ferramentas e calibradores; pesquisar a disponibilidade nos almoxarifados; usar referências do modelo geométrico e requisitos de manufatura;
- Solicitar a um sistema CAD, quando necessário, o projeto de ferramentas e calibradores;
- Solicitar serviços de projeto de ferramentas e calibradores a fornecedores;
- Escrever ordens de serviço para execução de atividades no chão-de-fábrica não especificadas no plano de processo (por exemplo, instalar uma máquina);
- Definir localizações de ferramentas e calibradores no chão-de-fábrica;
- Realizar comunicação com o sistema de controle de chão-de-fábrica.

O Sistema de Gerenciamento de Recursos recebe as seguintes informações do Sistema de Planejamento de Recursos: especificações de produto (materiais, acabamento superficial e tolerâncias), geometria e informações de manufatura (tolerâncias de manufatura e outros dados do planejamento do processo).

Segundo Ravelli (2003), arquivos gráficos para sistemas e componentes de recursos, incluindo arquivos em formatos neutros, devem estar disponíveis para o sistema de gerenciamento de máquinas, dispositivos e ferramentas.

Segundo Ravelli (2003), o uso de formatos simplificados 3D (STL) e do STEP para a troca de dados apresenta as mesmas vantagens daquelas mencionadas no planejamento de processos. Mais uma vez, o formato STEP destaca-se por atender a todos os dados requeridos.

Para o projeto de máquinas, dispositivos e ferramentas, os projetistas usam sistemas CAD tradicionais, o que requer a troca de dados usando formatos neutros que representem dados com alta precisão, sendo apresentado aqui a possibilidade de uso dos formatos STEP e UPR.

#### *Sistema de Programação de CN*

O sistema de Programação CN inclui a geração de programas de máquinas CN, de máquinas de medição por coordenadas (MMC) e de robôs. Usando informações dos planos de processos, dos projetos de componentes, dos projetos de dispositivos e ferramentas, do projeto da peça bruta e dados do ferramental juntamente com métodos de processamento e informações de seqüência, esse sistema deve criar os programas para o processamento da peça. Os programas podem ser validados por meio de simulações e depois enviados às ferramentas de máquinas no chão-de-fábrica usando formatos padrões de arquivos como o STEP.

As funcionalidades de programação de controle numérico relatadas nesse item englobam aplicativos nas seguintes áreas (SOUZA et al., 2002):

- Programação de centros de usinagem e tornos
- Programação de Robôs (solda, pintura, montagem, corte)
- Programação de Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC)

Para as atividades da programação de controle numérico para máquinas de usinagem e tornos (CAM) – adição de métodos de usinagem e informações de seqüência, seleção de caminhos de corte, e verificação dos programas – o uso de modelos sólidos CAD de alto-nível torna-se necessário. Para a transferência de arquivos CAD, prevê-se o uso de formatos neutros como STEP e UPR. O formato STEP apresenta uma estrutura de dados com capacidade satisfatória para atender as representações necessárias da geometria e topologia de um objeto para esta tarefa. O

formato UPR tem apresentado bons resultados quanto aos requisitos de reconhecimento de *features*, comunicação bi-direcional e associatividade entre a geometria do modelo e os caminhos das ferramentas (RAVELLI, 2003).

Ainda segundo análise feita pelo autor, quanto à programação *off-line* de máquinas de controle numérico, MMC e células robóticas, o uso do formato STL (visualização simplificada 3D) pode ser útil para modelos cuja precisão possa ser atendida por esses formatos e que tenham a capacidade de armazenar informações de dimensão e tolerância geométrica. O STL pode ser aplicado principalmente para modelos CAD do equipamento, pontas de prova, peças e dispositivos, permitindo melhor desempenho computacional do software aplicativo para manipulação dos gráficos 3D em tempo real. Já nos casos em que há a necessidade de modelos geométricos de alta precisão, o uso de formatos STEP e UPR pode ser mais indicado.

#### *Ambiente de Análise e Validação dos Processos*

Em um ambiente de Manufatura Virtual, a utilização de diversos tipos de simulações e aplicações de realidade virtual fornece dados para a validação dos planos e pode também fornecer dados precisos para a simulação de eventos discretos a ser realizada na etapa de Preparação da Produção. A seguir, esses sistemas de simulação e as aplicações de RV estão descritos.

#### *Simulações Computacionais*

Os aplicativos de simulação para suporte às atividades de projeto dos processos são: simulação de máquinas CN; simulação do caminho da ferramenta; simulação de robôs; simulação MMC; e simulação das operações humanas.

A *simulação de máquinas CN* juntamente à *simulação do caminho da ferramenta* fornecem uma rica fonte de informações para a validação de programas CN e possibilitam a simulação do processo de remoção de material de um caminho de ferramenta CN, do movimento total da ferramenta na máquina, a detecção automática de colisões de ferramentas, de interferência entre componentes e das condições inadequadas de processamento.

O objetivo da *simulação de máquinas de CN* é simular a ferramenta de máquina e os processos de usinagem completos, visualizando o ambiente de processamento incluindo dispositivos de fixação e ferramentas de máquina. Nesse ambiente, normalmente o usuário seleciona a ferramenta de máquina e a peça bruta da base de

dados e aloca a peça na mesa de trabalho da máquina. As vistas e orientações podem ser alteradas a qualquer momento durante o processo. Carrega-se o processo na forma de código de CN, o qual é usado pela máquina. As operações podem então ser virtualmente realizadas. Essa aplicação permite ao usuário simular o processo de máquina baseado em código de CN existente e passar o código para máquina real de CN que criará as peças reais.

Empresas podem usar dados da simulação (normalmente exportados também em IGES e STL) como modelo processado para análises detalhadas dos processos de máquina e para checar operações subsequentes de processamento. O modelo CAD exportado pode ser também uma ferramenta para a engenharia reversa. Usuários podem criar modelos sólidos dos dados CNC. Quando terminada a inspeção no modelo, o processo continua a partir da orientação atual do modelo.

Na *simulação do caminho da ferramenta*, um modelo sólido da peça bruta e um modelo da ferramenta de máquina são usados para simular o processo de usinagem. A ferramenta de corte segue o caminho prescrito de remoção de material. Trajetórias da ferramenta que interferem com dispositivos ou peça bruta são facilmente detectadas e corrigidas. Dessa forma, o caminho da ferramenta pode ser otimizado e roteiros alternativos podem ser avaliados. A simulação pode também ajudar a determinar se parâmetros de corte especificados no plano são apropriados (cortes muito profundos podem estragar a peça bruta e até mesmo a ferramenta de máquina) e se velocidades definidas para o processamento são apropriadas (altas velocidades podem levar a superfície mais rugosa com respeito às especificações de projeto). A figura 25 apresenta um exemplo de software de simulação de máquinas de CN.

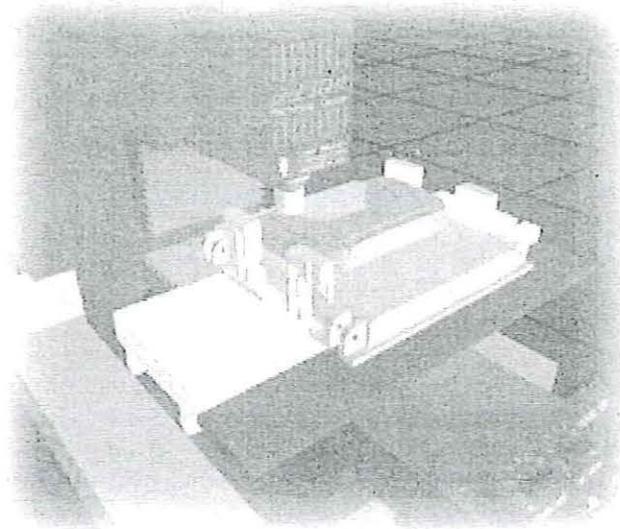


Figura 25 - Exemplo de software de simulação de máquinas CN

Fonte: DELMIA (2000a)

Essas simulações podem ser usadas para estudar fatores que afetam a qualidade, tempo de processamento e custo baseado na modelagem e simulação do processo de remoção de materiais bem como no movimento relativo entre a ferramenta e a peça bruta. A simulação pode também ser uma importante ferramenta para o treinamento de operadores.

A *simulação de robô* possibilita a programação e otimização de aplicações em pintura, MMC, soldagem e células de manufatura e consiste em uma ferramenta de simulação 3D para projetar, otimizar e criar programas *off-line* para robôs. O aplicativo utiliza dados CAD da peça bruta para gerar programas do processo e, então, passá-los para o robô no chão-de-fábrica. Bibliotecas de robôs e equipamentos relacionados para o desenvolvimento das células são também disponibilizadas. Sistemas de simulação de robôs oferecem também a possibilidade de criar outros componentes da célula robótica em um ambiente interno CAD ou importá-los de outros sistemas CAD através de formatos neutros de arquivo (STEP, IGES) ou tradutores diretos. A ferramenta pode também apresentar função de modelagem de superfície para modificação e otimização de dados importados de superfícies em *wireframe*. Um exemplo de Sistema de Simulação de Robôs é apresentado na figura 26.

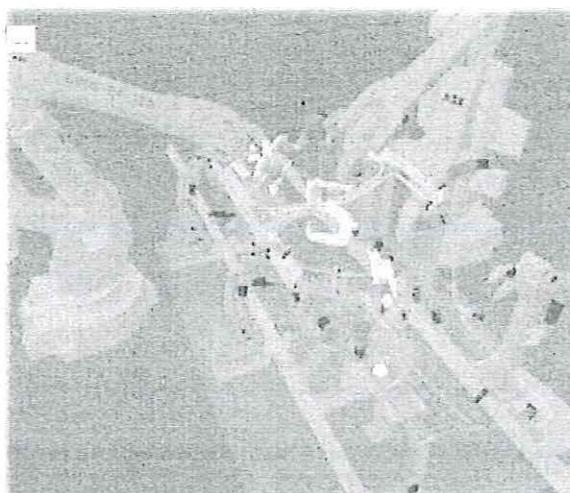


Figura 26 – Exemplo de sistema de simulação de robô

Fonte: DELMIA (2000a)

Após ter definido a célula robótica, o projetista define os movimentos do robô e constrói uma lógica de seqüência para os robôs e dispositivos no sistema. A rotina de animação do sistema pode ser ativada para simular as atividades no sistema de manufatura. Análises de tempo de ciclo e de capacidade de alcance do robô podem ser realizadas. Informações dessa simulação podem ser empregadas na simulação de eventos discretos (tempo de ciclo) e no projeto do *layout* (dimensão da célula).

Um programa *off-line* para robôs pode ser desenvolvido enquanto o movimento do robô é simulado. Durante a simulação, torna-se possível verificar: se robôs podem alcançar os pontos necessários; detectar colisões potenciais; e realizar análises de ciclo de tempo. Quando todo esse processo é otimizado, o programa *off-line* pode ser traduzido para a linguagem de programação do robô e passado para o robô no chão-de-fábrica.

*Simulação de Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC)* consiste na simulação do processo de inspeção de peças processadas, moldadas e montadas. O sistema cria programas para MMC baseados em modelo CAD de produto e nas tolerâncias, checka colisões com ferramental, trabalha com peças e montagens e simulação o ambiente completo incluindo peças e máquinas (figura 27).

O sistema permite também simular as propriedades físicas e mecânicas do equipamento de inspeção. O objetivo é estudar metodologias de inspeção, checkar

colisões, planejar inspeção, estudar fatores que afetam a precisão do processo de inspeção, entre outros.

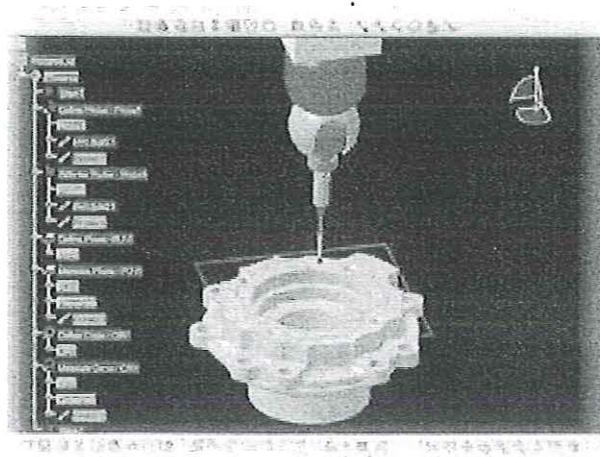


Figura 27 – Exemplo de sistema de simulação de MMC

Fonte: DELMIA (2000c)

E, por fim, a *simulação das tarefas humanas* assegura que os planos de processo sejam ergonomicamente corretos (figura 28). O uso de modelos humanos permite a análise de cansaço, esforços para braços, análise da postura e uso de ferramentas manuais. É bastante útil para o projeto e análise de centros e áreas de trabalho, permitindo ao projetista da célula otimizar a movimentação humana dentro dessa área, usando um paradigma gráfico de programação de movimentação.



Figura 28 - Exemplo de sistema de simulação de operações humanas

Fonte: DELMIA (2000d)

Segundo Ravelli (2003), sistemas de simulação de máquinas de CN, de robô, de MMC estão normalmente interligados ao sistema de programação *off-line* e o uso de padrões STEP ou UPR é indicado para a troca de dados quando se exige alto-nível de precisão (por exemplo, para acompanhar interativamente o processo de remoção de material de um caminho de ferramenta CN ou condições de corte inadequadas). Formatos simplificados 3D, como o STL, podem também ser utilizados dependendo do nível de precisão requerido como, por exemplo, quando o objetivo é analisar o movimento total da ferramenta e detectar automaticamente colisões de ferramentas.

Todos esses aplicativos de simulação geram informações para validar os planos de processos e otimizar o modelo do produto. Para a etapa seguinte do desenvolvimento de produtos esses sistemas de simulação fornecem importantes informações como, por exemplo, dimensões das células e estações de trabalho que podem ser usadas durante o projeto do *layout* da fábrica e tempos de ciclo das operações que podem ser usadas pela simulação de eventos discretos.

### *Ambiente de Validação*

O ambiente de validação consiste no uso do Sistema de Desenvolvimento de Aplicação de Realidade Virtual para visualizar e interagir com os processos de manufatura. Foram consideradas neste trabalho as seguintes aplicações de RV: simulação interativa de um robô; treinamento em operações; e avaliação de atividades produtivas manuais.

### *Aplicação de RV para a simulação interativa de um robô*

Nesse ambiente, um robô virtual é criado para promover a interação em tempo real. O usuário pode mover livremente o braço do robô no espaço de trabalho, verificando os tipos de movimentos possíveis e a sua amplitude. O robô virtual se bloqueia se algum componente de sua mecânica colide com um componente do ambiente, impedindo o movimento. Dessa forma, torna-se possível realizar testes no ambiente virtual antes de comprometer os recursos no chão-de-fábrica. Percursos de movimentação do robô já definidos podem ser passados ao protótipo virtual para a verificação da sua possibilidade.

A realidade virtual pode ser bastante vantajosa na programação das tarefas do robô. A programação pode ser realizada no robô virtual através da interação do usuário mediante dispositivos de entrada e saída (luvas, HMD, rastreador). O usuário sente-se

imerso em uma aplicação onde ele pode navegar, olhar para a cena de qualquer ângulo e visualizar detalhes que não são tão visíveis na vida real.

Para o desenvolvimento deste ambiente deve ser considerada a modelagem das geometrias em um sistema CAD de projeto do robô e a implementação da cinemática do robô. Base de dados de modelos pré-existentes bem como interface gráfica com usuário para customizar as configurações completam o ambiente. A interface gráfica permite especificar o comportamento dinâmico dos componentes como caminhos, aceleração e velocidade. Quando o programa é concluído, ele pode ser enviado para o robô real.

### *Aplicação de RV para treinamento em operações*

Alguns dos grandes benefícios da realidade virtual podem ser vistos em aplicações de educação, treinamento e comunicação de idéias e conceitos em geral. Para o treinamento, o detalhamento visual muitas vezes não é necessário. Em tais circunstâncias, a realidade virtual pode permitir: explorar ambientes normalmente não disponíveis ao participante; explorar ambientes antecipadamente; praticar um comportamento normalmente não disponível; interagir em tempo real e rapidamente com dispositivos virtuais; explorar diferentes pontos de vistas; e visualizar conceitos e idéias.

Um exemplo desse tipo de aplicação é o torno virtual desenvolvido pelo ITIA-CNR durante o Projeto “*Virtual Machine Shop*” (BOER et al., 1997) que, após ser modelado em um sistema CAD e importado no chão-de-fábrica virtual, desempenhava operações típicas de uma ferramenta de máquinas real (set-up de ferramentas, suprimento da peça, utilização dos comandos da máquina, processamento, reprodução do comportamento da máquina quando operador executa tarefa errada) e análises completas sobre os processos de aprendizado visando obter um ambiente educacional e uma ferramenta de treinamento.

Nesse ambiente, um modelo gráfico de uma mão virtual 3D pode ser usado para realizar ações quando o usuário aperta um botão no painel de controle de uma máquina, por exemplo. A mão é anexada a um dispositivo de entrada de 6 graus de liberdade e apresenta o movimento relativo da mão do usuário. Para ativar objetos do painel de controle, a mão deve alcançá-los e tocar os botões no painel. A resposta será engatilhada pela colisão entre a mão virtual e o botão. Quando uma máquina realiza atividades de programas CN, colisão entre a ferramenta e componentes pode ocorrer. Problemas como este podem ser detectados nesse ambiente.

#### *Aplicação de RV para avaliação das atividades manuais*

Uma aplicação de RV pode ser desenvolvida visando analisar e avaliar interativamente o processo de montagem manual do produto, focando, por exemplo, no uso de ferramentas manuais para a realização das operações de montagens. O objetivo de uma aplicação deste tipo é, além de verificar o processo de montagem, verificar se o projeto das ferramentas manuais utilizadas para a montagem satisfaz requisitos ergonômicos, permitindo que o montador trabalhe sem interferências, que tenha fácil acesso aos locais e que as atividades e movimentos realizados não resultem em desconforto e problemas de postura.

Uma aplicação deste tipo integra em um único ambiente o projeto da montagem, o seu planejamento, o projeto de ferramentas manuais e análises ergonômicas das atividades manuais. O sistema CAD de projeto do produto fornece ao ambiente virtual o modelo da montagem, a geometria dos componentes e o relacionamento entre os componentes na montagem. As restrições de precedência de montagem são fornecidas pelo sistema de Planejamento do Processo. O sistema de Gerenciamento de Recursos fornece o projeto das ferramentas manuais usadas para as operações de montagem.

A aplicação ainda pode permitir que a trajetória de movimentos para a montagem dos componentes seja obtida manipulando as peças em tempo real até a sua localização na montagem. Durante esses movimentos, as ferramentas manuais para realizar a operação de montagem podem ser manipuladas pelos montadores.

Problemas de acessibilidade podem ser identificados, e ocorrem quando: componentes interferem com elementos da instalação de montagem durante o percurso de montagem; componentes não podem ser colocados nas suas posições de montagem; ferramentas manuais não alcançam a área de trabalho. Problemas de ergonomia surgem durante as operações de montagem dos componentes devido ao difícil alcance às peças na montagem e a posturas estressantes adotadas durante as operações de montagem.

#### *5.4.3.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para o Projeto Detalhado*

Diversos benefícios podem ser associados com a aplicação da Manufatura Virtual nesta etapa do PDP. Alguns destes benefícios são alcançados através do uso de simulações de processos integradas ao Sistema de Planejamento de Processos. Essa prática pode contribuir na solução de questões relacionadas ao aumento de taxa de rendimento de máquinas e sistemas, e aumento da produtividade. Pode também

proporcionar a redução do tempo de planejamento de processos, num ambiente colaborativo, compartilhando informações, permitindo acesso fácil, e requerendo menos especialização dos processistas (RAVELLI, 2003).

Alguns resultados obtidos em testes pilotos com sistemas de simulação realizados pela empresa do estudo de caso 1, podem ser citados. Em um destes testes, a utilização de um Sistema de Simulação de Máquinas de CN proporcionou a otimização virtual do programa antes de ser implementado no chão-de-fábrica e isso teve como consequência a redução do custo e do tempo necessários para implementar o programa no chão-de-fábrica. Através destas simulações, erros nos programas de CN foram identificados; o número de peças refugadas foi reduzido; e colisões entre a ferramenta e os dispositivos de fixação foram identificadas. A otimização dos programas de CN proporcionou uma redução de tempo de ciclo em torno de 20%, melhorando a produtividade da ferramenta de máquina. Neste teste piloto, a simulação possibilitou a detecção e prevenção de 37 colisões e erros no programa de CN e eliminou 3 dias de testes no chão-de-fábrica (*prove-out*).

O processamento virtual pode ser usado para estimar mais precisamente o mérito de um plano de processo e, baseado nessa avaliação, determinar condições apropriadas de processo para melhorar e otimizar o plano. Com a simulação, a precisão do tempo de ciclo e das estimativas de custo é sempre melhorada. O engenheiro de produto pode usar essas informações para modificar o projeto visando melhorar sua manufacturabilidade. O engenheiro de processos pode usá-la para modificar os parâmetros de processamento e melhorar o plano. Isso tudo pode ser realizado sem a necessidade de utilizar protótipos físicos. Além da área de usinagem, processos de fundição, forjamento e injeção são também áreas de interesse para a Manufatura Virtual.

Em um outro teste piloto realizado pela empresa, a Simulação de Robô também se mostrou uma solução eficaz. O planejamento e a programação do robô podem ser completados antes que os robôs sejam instalados. A simulação pode ser usada para otimizar o layout da célula robótica quanto ao acesso e tempo de ciclo. A simulação também pode ser útil para otimizar o projeto do dispositivo de fixação da peça. Nesse teste piloto foi observado que uma mudança realizada no projeto de um dispositivo após a simulação aumentou a acessibilidade da junta de 40% para mais de 90%. Tempos de ciclo também podem ser determinados antes da instalação do robô. Isso ajuda a determinar quantos robôs são necessários para alcançar a capacidade de produção desejada.

Uma vez que os processos produtivos são otimizados, os programas podem ser passados diretamente para as máquinas e robôs no chão-de-fábrica. A programação *off-line* elimina a programação manual que, na maioria das vezes, é altamente custosa e libera as máquinas para a produção corrente.

Benefícios podem ser obtidos também com o uso de aplicações de RV na etapa de Projeto Detalhado. Destacam-se aqui aplicações para o treinamento de operadores de máquinas, sendo que permitem: explorar ambientes que muitas vezes não estão disponíveis para o operador; interagir rapidamente e em tempo real com as máquinas, robôs e dispositivos virtuais; explorar, de diferentes pontos de vista, o ambiente de trabalho; e visualizar novos conceitos e idéias envolvidas. O ambiente pode fornecer elementos desejados para um ambiente de treinamento como instruções de trabalho com ilustrações visuais; envolvimento ativo dos operadores que estão sendo treinados; auto-avaliação; e um ambiente interessante e motivador de aprendizado.

A experiência do ITIA-CNR com o desenvolvimento do torno virtual apontou benefícios relacionados às fases de pré-projeto da ferramenta de máquina e treinamento. Durante o pré-projeto, o torno virtual fornece ao projetista a possibilidade de estudar a interface homem-máquina e verificar, por exemplo, colisões através da interação direta do usuário com a máquina virtual. Após a verificação no ambiente virtual questões importantes como a segurança no trabalho, passam a ser consideradas mais adequadamente durante o projeto da ferramenta de máquina. O ambiente virtual pode proporcionar vantagens relacionadas ao treinamento quanto ao uso e manutenção da máquina. Através de modelos de aprendizado, a transferência de informação do fornecedor da ferramenta para o cliente pôde ser bastante simplificada.

Todas essas formas de simulação de processos de manufatura podem fornecer informações importantes que influenciam as decisões do projeto do produto e dos processos, sendo que ambos afetam a avaliação da manufaturabilidade e do custo do produto.

#### ***5.4.3.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual no Projeto Detalhado***

Quanto à programação *off-line* de robôs, apesar dos benefícios verificados no teste piloto mencionado anteriormente (estudo de caso 1), questionava-se a sua utilização por usuários e empresas que não possuíam experiência com robôs. Em uma das unidades da empresa, o primeiro robô de soldagem-a-arco demorou dois anos para

ser implementado, ou seja, a utilização de robôs por si só requer uma curva de aprendizado significativa. Avaliar e escolher o fornecedor adequado do robô, especificar o sistema, entender seu funcionamento, avaliar o fluxo de linha e os efeitos que o robô pode causar, são algumas das questões que fazem parte da curva de aprendizado relacionada à introdução de um robô na produção. A programação *off-line* pode contribuir muito nessas tarefas como mencionado no item anterior, mas é preciso garantir um total comprometimento com a sua aplicação. Sem esse comprometimento, problemas podem surgir.

Se a empresa já possui experiência no uso de robôs, a programação *off-line* pode ser, sem dúvida, uma ferramenta bastante eficiente. Mas, alguns fatores envolvidos com a sua aplicação foram identificados: elevada curva de aprendizado associada ao uso eficiente do software; falta de tempo adequado para o treinamento das pessoas; falta de dedicação em tempo integral para alcançar resultados satisfatórios; necessidade de conhecer o processo, o sistema de robô que está sendo programado, e computadores em geral. Foi constatado que ao menos uma pessoa deve se dedicar em tempo integral à criação e gerenciamento da estratégia de programação *off-line*.

A conversão de dados aparece também nesta etapa como uma das dificuldades encontradas. Durante a realização do estudo de caso 1, um teste piloto foi realizado para a tradução de modelos sólidos do sistema CAD adotado para alguns sistemas CAM que estavam em teste, através do formato STEP. Alguns dos problemas encontrados foram: erros na tradução do modelo; perda de dados (tolerância, *features*); e perda de associatividade (geralmente, o processo não é bi-direcional).

O uso de ambientes virtuais também traz a questão da incompatibilidade de dados novamente à discussão. O ITIA –CNR desenvolveu um ambiente de RV para a simulação interativa de um robô a cinemática paralela. Os modelos 3D usados para a criação do robô virtual foram exatamente aqueles empregados para a sua construção física na oficina. Assim, o robô virtual era geometricamente e dimensionalmente igual ao real. Porém, um problema encontrado foi a incompatibilidade de formatos entre o CAD usado no projeto do robô e a aplicação virtual. Após a conversão da geometria de um sistema para o outro, as cores dos objetos mudaram e as hierarquias dos componentes foram perdidas. Foi necessário remodelar as hierarquias e fixar todos os sistemas de referências locais. Esforço também foi despendido para reduzir a quantidade de triângulos gerados no processo de conversão da geometria da forma paramétrica do CAD original para a forma de polígonos para a RV.

#### 5.4.3.6. Resumo da etapa Projeto Detalhado

O resumo da etapa Projeto Detalhado está apresentado na tabela 10.

Tabela 10 – Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual na etapa de Projeto Detalhado

Atividades do PDP	Limitações atuais	Proposta da Manufatura Virtual	Benefícios	Desafios
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detalhar e avaliar a documentação do produto;</li> <li>- Otimizar o produto</li> <li>- Planejar detalhadamente os processos de manufatura;</li> <li>- Definir e projetar os recursos de produção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realização dos try-outs para identificação de problemas nos processos;</li> <li>- Construção de mockups de estações de trabalho;</li> <li>- Falta de ferramentas para validar processos;</li> <li>- Falta de integração entre projeto do produto e processos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema CAD para geração de desenhos de produção;</li> <li>- Tolerâncias dimensionais dos SSCs analisadas através da simulação;</li> <li>- Definição do plano detalhado de processos a partir da definição paramétrica baseada em feature do produto;</li> <li>- Uso de novas tendências em CAM em conjunto com a simulação de processos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validação e otimização de processos através da simulação;</li> <li>- Detecção e prevenção de colisões e enos no programa de CN;</li> <li>- Redução na quantidade de dias necessários para realização de try-outs;</li> <li>- Redução de tempos de ciclo de processos;</li> <li>- Identificação de problemas no projeto de dispositivos antes da sua produção;</li> <li>- Possibilidade de treinamento de operadores em ambiente virtual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevadas curvas de aprendizado associadas ao uso de simulações;</li> <li>- Falta de tempo adequado para dedicação no uso das ferramentas;</li> <li>- Problemas com conversão de dados entre CAD e CAM e entre CAD e ambiente virtual.</li> </ul>

#### 5.4.4. Preparação da Produção

Nesta etapa do processo de desenvolvimento, a empresa deve se preparar para a produção do produto. O *layout* final da planta da fábrica, contendo os sistemas de fabricação, linhas de montagem, áreas de estocagem de matérias primas, produtos em processo e produtos acabados, é desenvolvido levando em consideração diversas informações das etapas anteriores. Além disso, o planejamento da fábrica deve ser realizado para a verificação das saídas, operações gargalos, necessidade de recursos, entre outros.

#### 5.4.4.1. Limitações de PDPs tradicionais para a etapa de Preparação da Produção

Durante a Preparação da Produção, muitas vezes, o *layout* do sistema produtivo corrente precisa ser alterado, melhorado e até mesmo re-projetado. Para tanto, a experimentação física, ou seja, a realização de mudanças na fábrica real para analisar os resultados, tem sido o método empregado pelas empresas para cumprir estas tarefas. Porém, as experimentações físicas nem sempre são possíveis, especialmente quando se está planejando uma nova fábrica. Mesmo em fábricas existentes, a experimentação utilizando a instalação real pode consistir em um processo bastante caro (CHANCE et al., 1996).

Sistemas CAD de projeto de fábrica são ferramentas utilizadas para apoiar a definição do *layout* da fábrica, criando um modelo do sistema produtivo. Esse modelo é estático e não fornece informações sobre a operação da fábrica. *Layouts* de fábricas precisam ser simulados para verificar o conceito e determinar se as metas de saídas requeridas serão alcançadas.

Durante esta etapa, o projeto do produto e dos processos de manufatura são colocados lado-a-lado através de corridas piloto que visam encontrar e resolver problemas que não foram detectados na produção e testes com os protótipos, simular tarefas complexas de montagem, verificar se o sistema produtivo atenderá as metas de volume de produção, e treinar funcionários. A forma como as empresas realizam esta tarefa pode influenciar o sucesso do processo de desenvolvimento de produto.

Tradicionalmente, para conduzir a corrida piloto, as empresas podem utilizar uma planta de fabricação piloto separada, minimizando a interrupção na produção corrente. Porém, se a planta piloto não representar a planta real, problemas podem surgir durante a produção final. Uma segunda alternativa para a realização da corrida piloto é criar uma linha piloto próxima da linha de produção final, na mesma planta fabril, fazendo com que a linha piloto trabalhe de forma parecida com a real. Essa alternativa pode levar a uma probabilidade maior de distúrbios na produção. Uma última alternativa é realizar a corrida piloto na própria linha que produzirá o produto final. Utilizar o sistema de produção real pode resultar em simulações mais reais, porém a produção do modelo corrente precisa ser interrompida. Para minimizar esses distúrbios na produção corrente, as empresas, muitas vezes, programam a troca de ferramental para finais de semana e períodos de férias e torna a linha mais flexível para acomodar tanto as corridas piloto para o novo modelo quanto à produção do modelo corrente (CLARK; FUJIMOTO, 1992).

Um meio de reduzir a necessidade de um grande número de corridas piloto é integrar ao projeto do *layout* dos sistemas produtivos a simulação de eventos discretos, que é uma ferramenta poderosa na captura da complexidade dinâmica dos sistemas produtivos. Embora essa ferramenta já tenha atingido maturidade de desenvolvimento, o seu uso tem se difundindo lentamente nas empresas, pois: é associada a um custo e tempo elevado de implementação; é uma técnica *stand-alone* ao invés de uma parte integrada do processo de desenvolvimento; é usada principalmente para verificar soluções já desenvolvidas ao invés de fornecer suporte a tomada de decisões e ao projeto (JOHANSSON et al., 2003; ZHOU et al., 2004).

O uso integrado de sistemas de projeto de *layout* e simulação de eventos discretos ajuda a evitar erros de planejamento e a obter uma visão mais precisa do investimento requerido, do espaço de produção e da força de trabalho. Tradicionalmente, integrar esses sistemas requer que o especialista em simulação duplique o desenho CAD do *layout* do sistema produtivo no ambiente de simulação antes de ser capaz de modelá-lo.

Normalmente, o departamento de *layout* de fábrica cria um modelo CAD da fábrica usando objetos “inteligentes” e, se possível, usando objetos de bibliotecas do software. O objetivo do departamento de *layout* é garantir que tudo na fábrica se encaixe de uma perspectiva geométrica (checar se não há interferência, uso do espaço disponível de forma otimizada, etc).

*Layouts* de fábrica precisam, então, ser simulados para aprovar o conceito e determinar se a saída requerida como, por exemplo, peças por hora pode ser alcançada. Se a simulação é usada, a função do especialista em simulação é analisar a mesma fábrica em termos de tempo e saída. Ele cria um desenho da fábrica no papel e modela a mesma fábrica no aplicativo de simulação de eventos discretos. Informações como tempo de ciclo, disponibilidade de recursos e roteiros de produção, são coletadas em diferentes departamentos e adicionadas ao modelo de simulação. Em seguida, a lógica é programada e os experimentos são realizados. Os resultados são, então, apresentados em tabelas e figuras.

A duplicação de desenhos pode ocorrer várias vezes na medida em que o *layout* da fábrica pode ser revisado várias vezes antes da configuração final ser alcançada (MOORTHY, 1999; MECKLENBURG, 2001). Como as empresas atualmente usam cada vez mais sofisticados sistemas de manufatura, como redes de esteiras, sistemas de

manuseio de materiais, plantas automotivas, veículos automaticamente guiados (AGVs), este trabalho pode se tornar difícil, consumir muito tempo e não ser à prova de erros.

#### ***5.4.4.2. Proposta da Manufatura Virtual para a Preparação da Produção***

Em um ambiente de Manufatura Virtual, a Preparação da Produção é realizada principalmente através de um ambiente integrado para projeto, simulação e visualização colaborativa do *layout* de fábrica que permite a transferência de objetos do sistema de projeto sem precisar duplicar desenhos.

Nesse ambiente, para reduzir a duplicação de trabalho, as informações contidas nos objetos definidos no sistema de projeto do *layout* são transferidas para o sistema de simulação usando um formato comum de dados como o SDX, que serve como uma entrada para a geração automática de modelos de simulação de eventos discretos.

Esse procedimento elimina a necessidade de recriação física de objetos e da definição de algumas informações de controle da corrida no sistema de simulação dinâmica. O propósito básico é desenvolver um método automático de geração de modelos de simulação e animações 3D diretamente de desenhos CAD.

Através desse ambiente integrado, torna-se possível projetar um novo *layout* ou uma otimização de um sistema já existente e checar através da simulação se o sistema projetado atende as necessidades da produção. Para a visualização mais efetiva e colaborativa dos resultados da simulação e animações, utiliza-se um sistema de *mockup* digital de fábrica.

Uma alternativa para a realização destas atividades (projeto, simulação e visualização da fábrica) é o uso de uma aplicação de Realidade Virtual (Fábrica Virtual), que permite a modelagem e a simulação de uma fábrica dentro de um ambiente virtual.

#### ***5.4.4.3. Modelo Proposto para a Preparação da Produção em Ambiente da Manufatura Virtual***

As atividades que podem ser apoiadas pelo uso de sistemas da Manufatura Virtual são: planejar a produção piloto, otimizar o processo e ensinar pessoal (figura 29).



O Modelo Proposto para a realização desta etapa apresenta duas alternativas para aplicar a Manufatura Virtual:

- (A) Atividades de projeto, de simulação e de visualização de fábrica realizadas através da integração de Sistemas de Projeto do *Layout*, de Simulação de Eventos Discretos e de *Mockup* Digital da Fábrica;
- (B) Atividades de projeto, de simulação e de visualização de fábrica realizadas em um ambiente de Realidade Virtual – Fábrica Virtual.

A figura 30 apresenta o Modelo Proposto para a etapa de Preparação da Produção para a alternativa A descrita acima.

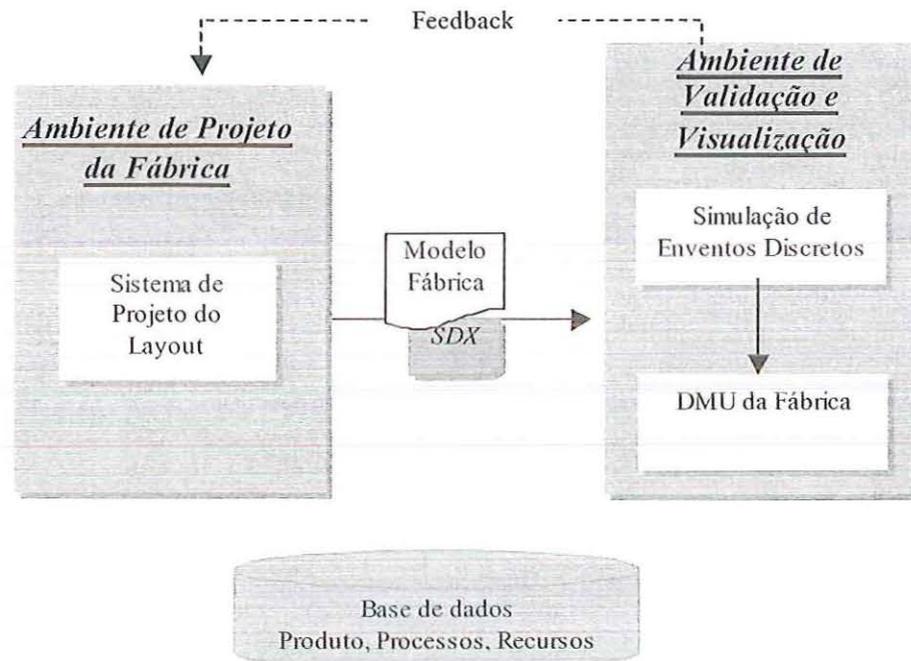


Figura 30 – Modelo Proposto para a Preparação da Produção em Ambiente de Manufatura Virtual

Nesse caso, a metodologia para a utilização do ambiente de Manufatura Virtual consiste em:

1. Criar um modelo 3D do *layout* usando um Sistema CAD de Projeto, com a criação de objetos inteligentes e objetos de bibliotecas;
2. Importar, de outros sistemas, objetos gráficos (por exemplo, robôs, ferramentas de máquinas) diretamente no *layout*;

3. Definir dados relevantes para a simulação de eventos discretos diretamente nos objetos do modelo 3D do *layout* da fábrica (tempo de falha, tempo de reparo, tempo de ciclo, taxa de refugo, velocidades);
4. Definir dados relevantes para a simulação nos objetos gráficos 3D importados;
5. Gerar um arquivo SDX, descrevendo dados de manufatura e *layout*;
6. Importar o arquivo SDX no sistema de simulação e traduzir o arquivo em um modelo de simulação;
7. Importar outros dados de entrada no modelo de simulação criado como, por exemplo, informações sobre o movimento de um robô;
8. Executar o modelo de simulação usando o Sistema de Simulação de Eventos Discretos;
9. Gerar scripts de animação e arquivos de dados;
10. Importar objetos gráficos estáticos (dados de ferramentas, dados CAD de produto) juntamente aos arquivos de dados e scripts de animação para a geração da animação no sistema mockup digital da fábrica.

A troca de informações nesse ambiente pode ser realizada através de formatos neutros de arquivos. Dados geométricos podem ser transferidos por meio de formatos como, por exemplo, STEP, IGES e VRML. Informações de processo podem ser trocadas por meio de SDX. O arquivo SDX é uma compilação de dados físicos, dados de manufatura e produção, e dados de simulação (por exemplo, comprimento de uma corrida de simulação). A informação SDX pode ser salva em um formato XML. Esse novo formato apresenta conformidade com todas as especificações que são definidas no padrão SDX.

### **Ambiente de Projeto**

Projetar um novo sistema de fábrica ou ainda modificar sistemas existentes requer a utilização de um Sistema de Projeto do *Layout* visando avaliar alternativas de posicionamento e alocação de estações de trabalho, máquinas e equipamentos no chão-de-fábrica.

### ***Sistema de Projeto de Layout***

Esse sistema fornece uma útil ferramenta para a criação do *layout* de fábrica, permitindo a análise espacial das instalações de manufatura e a avaliação de interferências entre os componentes do sistema de manufatura.

O sistema possibilita uma rotina inteligente de extração que exporta detalhes dos objetos tais como tipo de objeto (máquina, esteira, AGV, etc), localização do objeto, e outros parâmetros físicos juntamente com os dados relevantes para a realização da simulação que foram embutidos nos objetos, em um arquivo de texto padronizado ASCII, conhecido como arquivo SDX. Um link dinâmico com a base de dados, permite que os arquivos SDX tenham informações do objeto como número do objeto, tempo de ciclo, taxa de refugo, e tempo de *set-up*. Assim arquivos SDX possuem um conjunto completo de dados organizados tanto do modelo CAD quanto de base de dados que contém a rotina do material, e outros dados de manufatura relacionados.

### **Ambiente de Validação e Visualização**

Para validar e visualizar o *layout* projetado, o ambiente conta com um Sistema de Simulação de Eventos Discretos e um Sistema de *Mockup* Digital da Fábrica.

### ***Sistema de Simulação de Eventos Discretos***

Esse sistema deve permitir que o modelo de simulação seja gerado automaticamente, a partir do arquivo de dados SDX gerado pelo Sistema de Projeto de *Layout*, via tradutor desenvolvido pela ferramenta de simulação de eventos discretos. Após a realização dos experimentos, o modelo de simulação gera dados de animação que são disponibilizados para visualização dinâmica e análise no Sistema de *Mockup* Digital.

Segundo Ravelli (2003), para a realização da simulação normalmente não é necessário o uso de modelos sólidos CAD de alto nível, sendo mais indicado o uso dos formatos STL e VRML para a troca de dados geométricos.

A transferência de dados de movimento entre os sistemas de simulação de manufatura, como, por exemplo, dados de movimento de um robô de um sistema de simulação de robô para um sistema de eventos discretos, pode ser feita usando o formato neutro VRML. Porém, segundo Mecklenburg (2001), as capacidades de importação da maioria das aplicações disponíveis no mercado não estão maduras o suficiente para suportar essa alternativa no curto prazo.

### ***Sistema de Mockup Digital de Fábrica***

Esse sistema possibilita atividades de colaboração em projeto para a visualização, medição, verificação de falhas no modelo 3D da fábrica e treinamento. O modelo pode ser facilmente acessado sem ter que usar o sistema CAD no qual o modelo foi criado e animações da simulação podem ser visualizadas sem precisar do sistema de simulação. Isso permite com que diversos usuários participem do projeto sem precisar possuir as licenças dos outros softwares.

O sistema trabalha com os dados de animação e *scripts* gerados pelo sistema de simulação e ainda permite a inclusão de dados adicionais de ferramentas e do produto de diferentes fontes CAD em um ambiente visual.

### ***Fábrica Virtual como segunda alternativa para a etapa de Preparação da Produção***

Como mencionado acima, uma alternativa a essa metodologia, é usar o conceito da Fábrica Virtual, onde o projeto do *layout*, a simulação e a visualização são integrados em um ambiente de Realidade Virtual.

Um ambiente de Fábrica Virtual pode permitir a realização do projeto virtual das instalações da fábrica, do projeto virtual dos sistemas de produção, a caracterização desses sistemas para a definição dos modelos de simulação, e a visualização 3D dos eventos baseada nos resultados da simulação em uma interface de realidade virtual. Esse ambiente combina realidade virtual com simulação de eventos discretos. A realidade virtual permite uma representação 3D tão real possibilitando que o usuário sinta-se presente na nova planta e a simulação dá dinamismo à fábrica modelada.

Um exemplo dessa aplicação é a Fábrica Virtual desenvolvida pelo ITIA-CNR, que consiste em um instrumento imersivo e interativo de suporte ao projeto e verificação do *layout* de uma fábrica. O mundo virtual desta aplicação é um plano de trabalho sob o qual o usuário dispõe as instalações físicas, as máquinas da linha produtiva e dos sistemas de produção que está projetando.

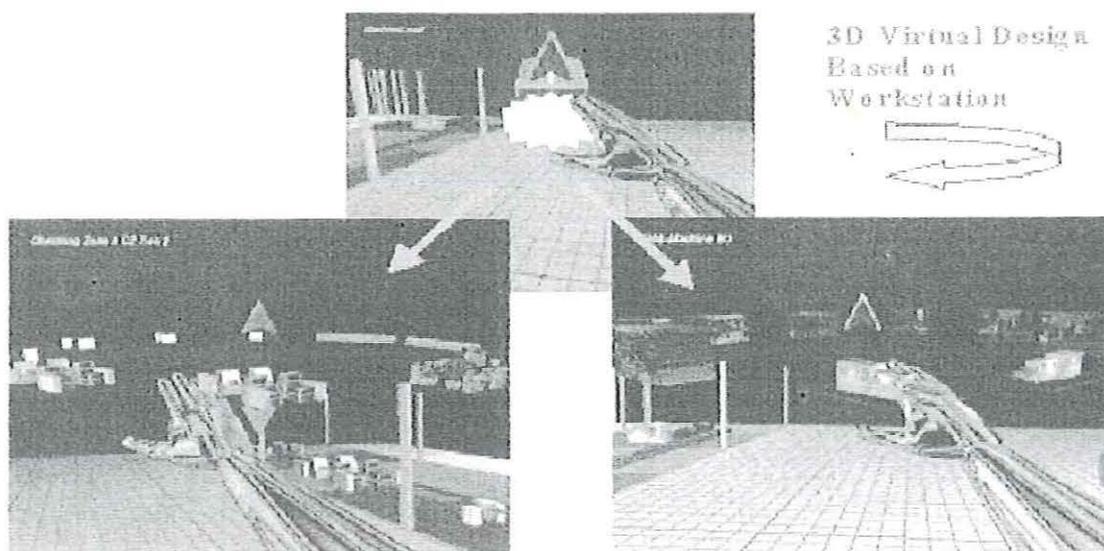


Figura 31 – Fábrica Virtual

Fonte: SACCO et al. (2000)

Para o desenvolvimento da Fábrica Virtual, o primeiro passo foi o desenvolvimento de uma base de dados de componentes padrões composta por um conjunto de ferramentas e instalações visando o gerenciamento de todas as informações necessárias para o projeto da planta de produção. A base de dados representa uma biblioteca da qual o ambiente virtual de projeto recupera todos os módulos funcionais necessários para o projeto da planta tais como máquinas, sistemas de transporte, unidades de armazenagem, unidades de construção do prédio, unidades de serviços e áreas externas.

A principal idéia foi decompor a planta em módulos funcionais. O usuário pode selecionar os recursos e módulos necessários na base de dados e colocá-los em um chão-de-fábrica virtual, conectando *outputs* com *inputs* e verificando alternativas de *layout* quanto às restrições de espaço existentes.

Durante o projeto das instalações da fábrica, a aplicação permite definir a área do prédio e a construção da fábrica usando módulos como unidades de construção e de serviço; definir as instalações externas e internas; definir o *layout* das instalações; navegar pelo ambiente e obter um *feedback* em tempo real das escolhas de projeto e realização de mudanças.

Para o projeto do *layout* dos sistemas de produção, a aplicação permite ao usuário definir o *layout* ou recuperar um *layout* da base de dados; definir e alocar os módulos de produção tais como unidades de processo, unidades de armazenagem e unidades de transporte; customizar as entidades, caso necessário, e navegar no ambiente.

Quando o *layout* estiver pronto, o usuário pode definir parâmetros de produção para a realização da simulação. Alguns módulos também podem ser criados para a realização do modelo de simulação. Enquanto o projetista cria o *layout*, o sistema automaticamente constrói o modelo de simulação; via uma interface no ambiente virtual, o usuário pode inserir tempos de ciclo de máquinas, quantidades, distâncias entre máquinas e células, velocidade da esteira, etc. A simulação é, então, iniciada para a verificação de parâmetros de processo e desempenho da fábrica.

O software de simulação tem como principal finalidade o suporte a análises e avaliações das instalações e *layout* do chão-de-fábrica que foram definidos na fase de projeto. A simulação é realizada através de uma interface em realidade virtual. Durante a corrida, um arquivo de resultados é gerado, que pode ser identificado pelo ambiente de realidade virtual. Baseado nesse arquivo, a interface em realidade virtual fornece a plataforma 3D para demonstrar todos os resultados da simulação em tempo real ou *off-line*.

A integração entre a simulação e o ambiente de realidade virtual foi realizada através do XML. Após a simulação completar uma corrida completa, um arquivo XML pode ser produzido, armazenando todos os processos simulados incluindo os parâmetros necessários para o ambiente virtual replicar o efeito da simulação em um ambiente 3D.

#### **5.4.4.4. Principais benefícios da Manufatura Virtual para a Preparação da Produção**

Integrar o projeto do *layout* com a simulação de eventos discretos permite que atividades como projeto, validação e re-projeto do sistema de manufatura sejam feitos rapidamente e sem desperdício de recursos, sistemas produtivos e ferramentas.

No projeto de uma nova planta industrial, a simulação permite avaliar e otimizar novas idéias, e, dessa forma, quando um investimento é feito um risco mínimo é envolvido na decisão.

Quando conectada a uma planta existente, a simulação pode desempenhar um importante papel para integrar projeto do produto e planejamento do processo com planejamento e programação da produção. Dado um projeto e um plano

de processo (ou um conjunto de planos alternativos), diversos cenários de produção podem ser simulados para determinar o impacto de um novo produto ou ainda de uma nova máquina em operações do chão-de-fábrica. Com isso, o projetista é capaz de determinar mais cedo no projeto o efeito de certas decisões de projeto nas atividades de planejamento e controle da fábrica. Além disso, o planejador é capaz de determinar planos alternativos que são apropriados para certos estágios da produção.

Após o desenvolvimento de produtos, a simulação pode continuar sendo empregada para programar e otimizar a produção diariamente, tentar cenários “e se” com pouco ou nenhum custo e minimizar a perda durante trocas na produção. Nas operações do dia-a-dia, permite que novas idéias sejam testadas e que as máquinas sejam programadas dentro da simulação, sem perturbar a produção.

Durante a realização do estudo de caso 1, foi desenvolvido um trabalho de simulação com o objetivo de analisar o comportamento dinâmico de uma nova linha de sub-montagem de motores, projetada em função de uma mudança do arranjo físico posicional para o arranjo por produto ou em linha. A simulação permitiu: identificar a necessidade e o balanceamento de mão-de-obra por estação de trabalho, os gargalos e a capacidade máxima de produção; ajudou a sincronizar a linha de sub-montagem com as linhas principais de montagem, procurando minimizar o estoque de motores prontos entre estas etapas; entender melhor o sistema produtivo e como se comportaria em determinadas circunstâncias; e transmitir maior confiança ao projetista da linha.

Esse teste piloto mostrou que a simulação pode ser utilizada como uma ferramenta de suporte ao projeto de uma nova linha de produção, pois possibilitou a aquisição de conhecimentos importantes para a obtenção de um melhor desempenho da linha no atendimento às demandas das linhas principais de montagem. Com o estudo da capacidade máxima foi possível comparar cenários com diversas alternativas de alocação de mão-de-obra e medir o desempenho do sistema em termos de taxa de ocupação dos montadores, produtividade dos montadores, taxa de saída dos motores e identificação de estações gargalos.

Quanto a Fábrica Virtual, o uso deste ambiente pelo ITIA-CNR também possibilitou a simulação de várias configurações de *layouts* de fábrica e a verificação do comportamento e impacto dessas configurações. Como consequência, foi possível alcançar uma solução otimizada para o *layout* do sistema produtivo.

Porém, o trabalho também mostrou que usar tecnologias 3D interativas para layout de fábrica pode ter benefícios em algumas circunstâncias de projeto. Muitos dos benefícios vêm da apresentação da informação em 3D em uma forma bastante compreensível e a manipulação em tempo real dos módulos e recursos de instalações de fábricas e sistemas produtivos. Porém, esse ambiente pode ser realizado em telas 2D e não requer dispositivos estereoscópicos, ou seja, não requer um mundo completamente imersivo, som avançado e outras tecnologias avançadas de realidade virtual.

#### ***5.4.4.5. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual na Preparação da Produção***

Os principais desafios estão: na propagação e adoção da simulação de eventos discretos pelas empresas como uma ferramenta de apoio não apenas ao projeto dos sistemas produtivos, mas também como ferramenta de auxílio a programação e controle diário da fábrica; na integração da simulação com o sistema de projeto do *layout*; no uso de ambientes virtuais imersivos para *layout* e simulação de fábrica.

Apesar dos benefícios associados à simulação serem bastante reconhecidos pelas empresas, dificuldades ainda são encontradas para a sua utilização. Dentre elas, pode-se destacar o fato da simulação necessitar de uma grande quantidade de informações, as quais normalmente não se encontram bem estruturadas nas empresas. Essas informações estão quase sempre espalhadas em várias fontes como base de dados, sistemas PDM, desenhos computacionais e planilhas em diferentes computadores. Métodos precisam ser criados para facilitar a transferência destas informações para o sistema de simulação. Além de incluir uma grande quantidade de informações, desenvolver modelos de simulação consome tempo considerável, e, assim métodos também precisam ser criados para promover o reuso de dados de modelos de simulação existentes e a modificação destes dados baseada nas informações correntes.

Uma outra tarefa difícil envolvida no uso da simulação de eventos discretos é comprovar o retorno do investimento a ser realizado em software e treinamento. A primeira razão para essa dificuldade ocorre quando o sistema produtivo a ser simulado não existe fisicamente, e a simulação permite identificar problemas que não foram antecipados, evitando custos com atrasos de lançamentos e repetição de atividades. Em outras palavras, com a simulação torna-se possível poupar recursos financeiros e materiais que na realidade não foram planejados inicialmente. Da mesma forma, quando

a simulação é usada para estudar melhorias em sistema existentes, irá evitar o gasto com alterações que não geram as melhorias ou benefícios esperados.

Através da aplicação da simulação durante o estudo de caso 1, pôde-se comprovar a presença destes desafios, destacando principalmente a dificuldade encontrada para a coleta de dados de entrada, que em alguns casos, não estavam definidos na empresa, a pressão sofrida pelo projetista para a conclusão rápida da linha conforme cronograma estabelecido, a falta de disponibilidade de pessoas que pudessem se dedicar às atividades envolvidas no estudo de simulação e a necessidade de um especialista em simulação para trabalhar integrado aos engenheiros e técnicos visando integrar o conhecimento em simulação e sistema produtivo.

Além disso, para Manufatura Virtual ter maior impacto, a simulação de eventos discretos deve ser integrada ao sistema de projeto do *layout* e aos sistemas de informação existentes na companhia. Por exemplo, simulações da produção devem ser construídas com o mínimo de input do usuário usando dados MRPII, como a lista de materiais, centros de trabalho, rotinas de produção, demanda dos clientes e dados de controle do chão de fábrica. Tanto sistemas CAD quanto de planejamento do processo devem ser integrados nesse ambiente prático da Manufatura Virtual para permitir o uso da simulação para análises no projeto e planejamento.

Com relação à Fábrica Virtual desenvolvida pelo ITIA-CNR, a experiência mostrou que a renderização 3D contínua e dinâmica da fábrica requer uma grande quantidade de computação gráfica. Se o ambiente é imersivo, computação acima do normal é necessária. Além disso, informações no desenho do *layout* podem não ser apresentadas facilmente ao usuário quando usando um dispositivo imersivo. Esses aspectos do desenvolvimento do mundo virtual precisam ser mais explorados em desenvolvimento de sistemas futuros.

A renderização interativa 3D ainda continua uma tecnologia sofisticada e cara em termos de hardware, de software e de desenvolvimento de sistema. Embora o potencial continua sendo grande, melhorias nestas tecnologias precisam ser realizadas antes que a RV entra para o mundo comercial de *layout* de fábrica. O poder computacional tende a aumentar e os custos a diminuir no futuro, e, assim, novas gerações de equipamentos computacionais surgirão.

#### 5.4.4.6. Resumo para a etapa de Preparação da Produção

A tabela 12 apresenta uma síntese da análise realizada para a etapa de Preparação da Produção.

Tabela 12 – Resumo da análise da utilização da Manufatura Virtual para a etapa de Preparação da Produção

Atividades do PDP	Limitações atuais	Proposta da Manufatura Virtual	Benefícios	Desafios
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planejar a produção piloto;</li> <li>- Otimizar o processo;</li> <li>- Ensinar pessoal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Experimentação física para alteração, melhoria ou re-projeto do layout do sistema produtivo;</li> <li>- Comidas piloto para encontrar e resolver problemas;</li> <li>- Falta de integração entre projeto do layout e simulação de eventos discretos;</li> <li>- Duplicação de desenhos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realização da simulação de eventos discretos para validar sistema produtivo;</li> <li>- Integração da simulação com o projeto do layout;</li> <li>- Visualização da fábrica através de DMU;</li> <li>- Possibilidade de uso de ambiente virtual para projeto, simulação e visualização da fábrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Otimização de sistemas produtivos através da simulação;</li> <li>- Redução de riscos de investimento;</li> <li>- Possibilidade de explorar diversos cenários;</li> <li>- Aquisição de conhecimentos sobre o novo sistema produtivo;</li> <li>- Possibilidade de manipulação em tempo real dos módulos e recursos de instalações de fábrica e sistemas de produção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande quantidade de informações necessárias à simulação;</li> <li>- Dificuldade de transferir as informações de outros sistemas para a simulação;</li> <li>- Comprovar o retorno do investimento;</li> <li>- Uso de ambientes virtuais imersivos para layout e simulação de fábrica.</li> </ul>

#### 5.5. Visão Global do Modelo Proposto

Este item do trabalho tem como objetivo fornecer uma visão global do Modelo Proposto de PDP em Ambiente de Manufatura Virtual bem como os benefícios e desafios globais encontrados. A tabela 13 apresenta a relação das atividades do PDP com os sistemas da Manufatura Virtual para todas as etapas do processo.

Tabela 13 – Relação das Atividades do PDP com sistemas da Manufatura Virtual

Etapas e Atividades do PDP	Sistemas																			
	Projeto Conceitual	CAD	Mockup Digital	Simulação Ergonômica	Simulação Comportamento Dinâmico	Simulação Comportamento Estático	Simulação de Tolerância	Prototipagem Rápida	Desenvolvimento de Aplicações de RV	Planejamento Processos	Gerenciamento de Recursos	Programação de CN	Simulação de Máquina CN	Simulação Caminho da Ferramenta	Simulação de Robô	Simulação MMC	Simulação das Operações Humanas	Projeto do <i>Layout</i>	Simulação de Eventos Discretos	DMU da Fábrica
<b>Projeto Conceitual</b>																				
Desenvolver alternativas de concepção	●																			
Selecionar e determinar alternativas	●						●	●												
<b>Projeto Preliminar</b>																				
Refinar arquitetura		●	●				●	●												
Detalhar SSC		●		●	●	●	●													
Planejar processo macro									●											
Desenvolver testes				●	●	●	●	●												
<b>Projeto Detalhado</b>																				
Detalhar documentação do produto		●																		
Avaliar documentação		●				●														
Otimizar produto							●													
Detalhar plano de processos								●	●	●	●	●	●	●	●	●				
Projetar recursos								●		●										
<b>Preparação Produção</b>																				
Planejar produção piloto								●									●			
Otimizar produção								●										●	●	
Treinar pessoal								●										●	●	

Para obter uma visão global do Modelo Proposto, a figura 32 apresenta as etapas do PDP em termos de informações trocadas (parte superior da figura), bem como os sistemas de software que são utilizados de suportes.

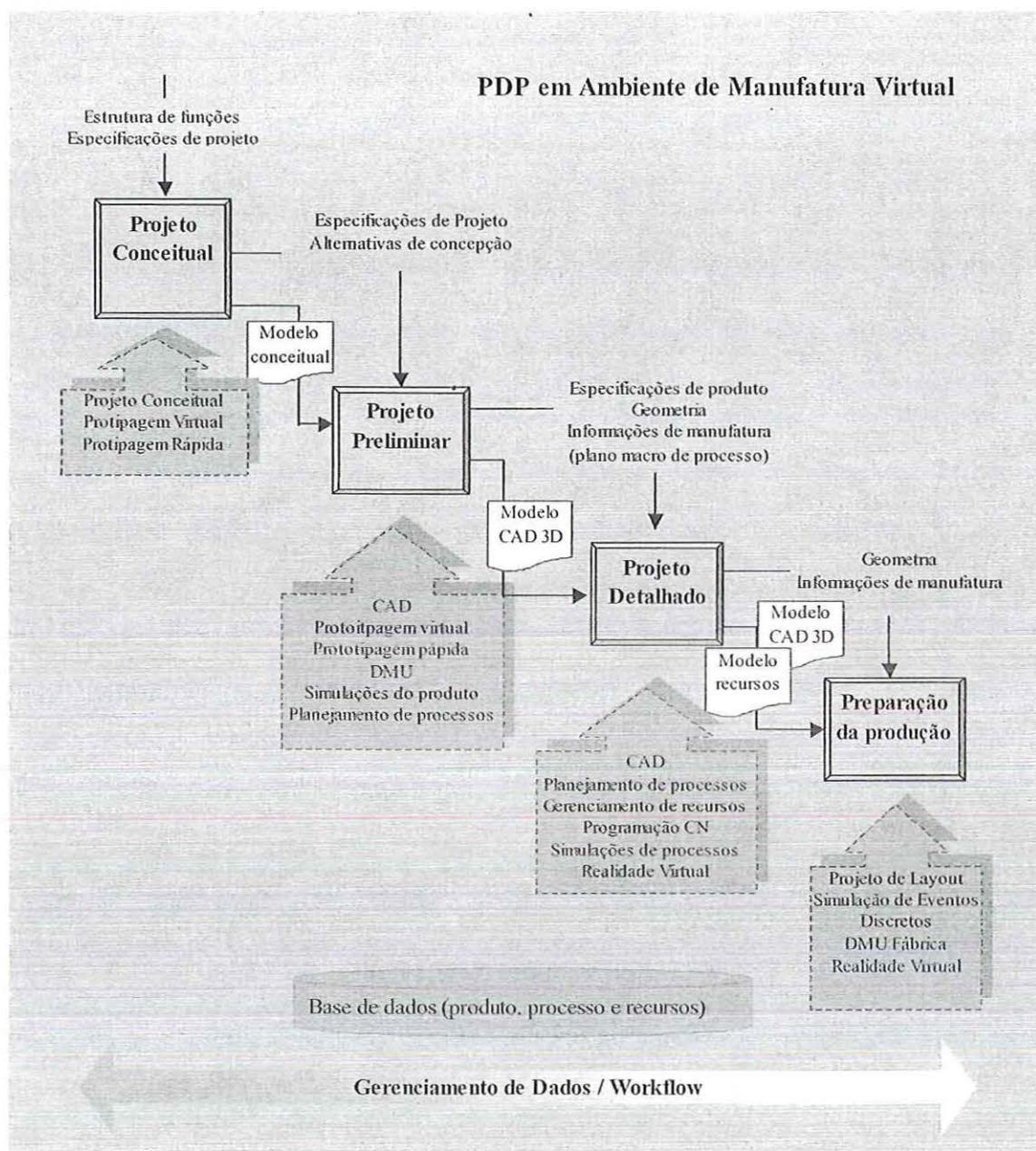


Figura 32 – Visão Global do Modelo Proposto para PDP em Ambiente de Manufatura Virtual

Para alcançar um ambiente de Manufatura Virtual um elemento importante é a integração de dados do produto, processos e recursos e, para que isso seja possível, torna-se necessário o desenvolvimento de um mecanismo como, por exemplo, a representação digital padrão, que possibilite a troca e compartilhamento de informações

entre os sistemas presentes no ambiente. Para tanto alternativas de uso de formatos neutros foram apresentadas na tentativa de reduzir a necessidade de desenvolver diversas interfaces entre sistemas específicos. Nesse ambiente, dados e informações utilizados por mais de um sistema da Manufatura Virtual são armazenados em uma base de dados para o compartilhamento.

Sendo assim, arquivos CAD são criados pelo sistema de projeto em seu formato proprietário e também em formatos neutros; são armazenados e gerenciados na base de dados; e podem ser utilizados por outros sistemas da Manufatura Virtual. Da mesma forma, dados criados ou alterados pelos demais sistemas são também armazenados e gerenciados na base de dados no seu formato nativo e em formatos neutros. Nesse ambiente de Manufatura Virtual, sistemas PDM exercem um papel fundamental e devem ser utilizados principalmente para: a geração automática desses arquivos em formatos neutros, o controle das alterações técnicas, promover o compartilhamento de dados entre os diferentes sistemas, controle do *workflow*, e promover a comunicação do projeto.

### **5.5.1. Principais benefícios da Manufatura Virtual**

Um dos mais significantes aspectos na aplicação de ambientes de Manufatura Virtual no processo de desenvolvimento está na sua habilidade em melhorar o processo de tomada de decisões durante todo o processo tanto de uma perspectiva qualitativa quanto quantitativa.

As oportunidades que as tecnologias avançadas presentes neste ambiente, tais como simulação computacional, sistemas avançados de projeto, prototipagem rápida e virtual, podem fornecer ao PDP tornam-se cada vez mais claras principalmente quanto a identificação de uma percentagem significativa dos problemas de desenvolvimento a uma taxa significativamente mais alta do que os protótipos convencionais. Combinadas com métodos de prototipagem tradicionais, essas tecnologias podem resultar na redução de tempo de desenvolvimento através da solução antecipada e rápida de problemas.

Para ilustrar alguns benefícios globais da Manufatura Virtual, pode-se citar o Projeto B do estudo de caso 2. A empresa realizava basicamente três tipos de revisões de seus produtos: revisão completa do produto, revisão dos componentes e sistemas principais e revisão estética de uma família de produtos. Com relação à vida média dos

modelos, foi possível estimar os seguintes dados para os três tipos de revisão adotadas na empresa (tabela 14):

Tabela 14 – Benefícios da Manufatura Virtual para os tipos de revisões de produtos

<b>Tipo de Revisão</b>	<b>Tempo com PDP existente (*)</b>	<b>Tempo com Manufatura Virtual (**)</b>
<b>Revisão completa (estética, funcional e estrutural)</b>	A cada 10–15 anos	A cada 7-10 anos
<b>Revisão dos componentes importantes do produto</b>	A cada 4 anos	A cada 2 anos
<b>Revisão estética da família</b>	A cada 2 – 4 anos	A cada 6-12 meses

(\*) *Tempo médio ótimo relativo à situação existente no mercado quanto à conveniência produtiva e adequação do produto.*

(\*\*) *Tempo médio com base nas previsões da redução do tempo de adequação do produto aos pedidos do mercado.*

Ainda no Projeto B, a nova solução de desenvolvimento proporcionada à empresa resultou também em benefícios (tabela 15) em termos de redução no número de protótipos físicos construídos, no tempo de resposta às necessidades dos consumidores, no custo com testes funcionais reais e nos custos totais de desenvolvimento. As modificações que puderam ser realizadas ao modelo virtual em breves períodos de tempo para o estudo de novas soluções de projeto superaram os processos tradicionais utilizados, proporcionando a verificação de uma maior quantidade de alternativas e redução do número de protótipos físicos necessários.

Tabela 15 – Resultados com o uso da Manufatura Virtual

	PDP existente	PDP em ambiente de Manufatura Virtual
Número total de protótipos necessários para o desenvolvimento de produtos	8	2
Tempo de resposta às necessidades dos clientes (*)	8 meses	2 meses
Custo com testes funcionais reais (*) [% sob o desenvolvimento]	40%	20%
Redução no custo global de desenvolvimento de produto com a Manufatura Virtual (*)		
- revisão completa do produto		30%
- revisão parcial do produto		33%
- revisão de componentes		60%

(\*) Valores médios referentes a um produto padrão.

Resultados relacionados ao impacto tecnológico podem também ser destacados tais como: o desenvolvimento de um ambiente integrado de projeto, no setor de eletrodomésticos, consentiu verificar contemporaneamente os aspectos estéticos, funcionais, tecnológicos, produtivos e econômicos do produto, podendo recorrer a testes funcionais imediatos das soluções levantadas; e a possibilidade de estender o modelo desenvolvido neste projeto a outros produtos, permitindo o emprego da tecnologia de PR mais vasta e economicamente vantajosa.

A vantagem estratégica da prototipagem digital é o avanço das decisões da fase de teste com protótipos físicos para as fases iniciais do PDP com protótipos digitais. O processo de desenvolvimento e teste de produtos pode ser consideravelmente melhorado. A demonstração digital permite a modificação e otimização antecipada do protótipo. Leva a redução de custos na variedade de protótipos. Quando se trata de protótipos virtuais, *features* podem ser facilmente verificados e assim tempos de desenvolvimento podem ser reduzidos. Falhas quanto à fabricação ou ao próprio produto podem ser detectadas nas fases iniciais do PDP e eliminadas sem grande comprometimento de recursos. Isso fornece a possibilidade de começar o planejamento do produto nas primeiras etapas.

### 5.5.2. Principais desafios e dificuldades para aplicar a Manufatura Virtual

Mover-se para um ambiente de Manufatura Virtual envolve uma mudança na forma como o PDP é realizado, e isso resulta em uma série de desafios globais. Souza et al. (2002) apresentam os seguintes desafios técnicos e sócio-culturais que dificultam a implementação da Manufatura Virtual:

- Integração das ferramentas, sistemas e dados: problemas de incompatibilidades entre software e hardware estão presentes em um ambiente de Manufatura Virtual e podem resultar em elevados custos para as empresas.
- Gerenciamento das informações: novos projetos e processos são construídos, analisados e testados em um ambiente simulado, tendo como consequência a geração de uma grande quantidade de informações. A integração não só deve ocorrer entre diferentes e independentes bancos de dados para informação e conhecimento dentro da empresa como também entre banco de dados de fornecedores, clientes e outras empresas. Existe a necessidade de estabelecer uma base de dados completa para dar suporte ao ambiente da Manufatura Virtual.
- Gerenciamento da configuração: todas as ordens de engenharia e mudanças de projeto devem ser refletidas nas simulações e modelos usados para criar e avaliar novos projetos.
- Velocidade operacional do sistema: a utilização deste ambiente envolve uma grande quantidade de trabalho em computação matemática, processamento gráfico de imagens, troca de dados e comunicações remotas. Implementar um ambiente de Manufatura Virtual pode requerer um sistema computacional de processamento rápido de gráficos (SGI, por exemplo), que determina a rapidez com que as imagens são renderizadas.
- *Know-how* em manufatura, modelagem e representação: aplicações da Manufatura Virtual são baseadas em *know-how* humano, no entendimento dos processos de manufatura e no conhecimento de técnicas de modelagem e representação.
- Capacidade de aprendizado e aquisição de conhecimentos: principalmente conhecimento das instalações reais da manufatura, possibilitando uma maior facilidade de monitorar o desempenho operacional das instalações bem como tomar decisões e previsões mais precisas.

- Questões culturais, de gerenciamento, econômicas e de treinamento: surgem quando tecnologias e métodos inovadores são usados. O desenvolvimento de um sistema de Manufatura Virtual demanda um alto investimento de capital e esforço administrativo. Implementar novas tecnologias requer investimento em treinamento do pessoal, tradução dos dados existentes, aquisição de novas ferramentas de software, sistemas e pessoal de suporte. Depois de implantado, é difícil comprovar que um sistema de Manufatura Virtual é responsável pela redução dos custos ou pela melhoria da qualidade. Um investimento em uma nova infra-estrutura com um retorno incerto não é visto como favorável pelos gerentes que decidem se aceitam ou não o risco. Tais decisões devem ser guiadas por métricas que prevêm o desempenho futuro da Manufatura Virtual em aplicações específicas e, uma vez implementada, deve-se medir o sucesso desta ferramenta no alcance das metas.

Através da realização dos estudos de casos, foram observados alguns destes desafios para a aplicação da Manufatura Virtual em uma empresa. Pode-se destacar o investimento necessário para implementar esse ambiente que por ser elevado acaba se tornando, para muitas empresas, uma barreira à implementação da Manufatura Virtual mesmo se tratando de uma grande corporação. Muitos benefícios decorrentes do uso da Manufatura Virtual são difíceis de serem comprovados, como ocorre com a simulação, quando a finalidade é identificar falhas e problemas não previstos em um sistema antes deste ser fisicamente instalado ou sem ter que tirá-lo do seu funcionamento diário. O grande ganho na verdade está em evitar que tais problemas e falhas ocorram e, conseqüentemente evitar custos extras e economizar tempo para solucionar estas falhas.

Dificuldades também foram observadas com relação à necessidade imposta pela Manufatura Virtual de mudança cultural e de práticas existentes. Torna-se necessário convencer as pessoas precisam da importância dessa iniciativa e da necessidade de substituir as práticas e atividades correntes ou ainda os aplicativos e sistemas de software que estão acostumadas a usar, visando a adoção de uma nova forma de trabalho. Normalmente o uso do novo ambiente e de seus aplicativos requer elevadas curvas de aprendizado, principalmente associadas com a fase inicial da Manufatura Virtual. Além disso, a implementação da Manufatura Virtual deve ser alinhada com outras iniciativas presentes na empresa como, por exemplo, projetos Seis Sigma.

Durante a realização do estudo de caso 1, pôde-se notar que, pelo fato da implantação da Manufatura Virtual ser um projeto corporativo a maior parte das

atividades e decisões é realizada, principalmente, por unidades estrangeiras que estão à frente do projeto. No caso da unidade brasileira, ocorre principalmente o acompanhamento dos resultados de testes pilotos realizados no exterior, conhecimento das decisões tomadas por outras unidades e adequação à realidade brasileira. Além disso, pode-se citar outros agravantes como recursos limitados (pouca disponibilidade de capital e pessoas), e limitação de tempo para dedicação ao projeto.

Quanto ao Projeto A do estudo de caso 2, alguns desafios iniciais foram encontrados para a implementação da Manufatura Virtual. Inicialmente, um primeiro desafio foi convencer e conquistar a confiança dos profissionais da empresa para o fornecimento de informações sobre o PDP existente. Além disso, uma preocupação das pessoas da empresa relacionava-se à capacidade dos profissionais (projetistas, técnicos) usarem as ferramentas e o ambiente virtual que seria proposto e aceitarem essa nova forma de trabalho sem impor muitas resistências. Para tanto, a meta era desenvolver um ambiente dedicado às necessidades da empresa, mas que pudesse ser utilizado com a maior naturalidade possível pelas pessoas.

Tecnologias envolvidas em aplicações de RV muitas vezes requerem modos de trabalho e interfaces do usuário bastante diferentes dos meios utilizados pelas pessoas no dia-a-dia. Por exemplo, usar um HMD e luvas ainda não é uma atividade natural no meio industrial e envolve uma certa complexidade tanto estrutural quanto funcional. Essa é uma questão crítica no uso de ambientes virtuais imersivos e foi bastante analisada e estudada para o desenvolvimento do Projeto B do estudo de caso realizado no instituto de pesquisa.

Com respeito a sistemas de software tradicionais, os ambientes virtuais requerem novas soluções de interface, que ainda não são padronizadas e aceitas com normalidade. Normalmente o problema de interface é reduzido a análises de dispositivos hardware e softwares, o que não é suficiente. A preocupação do instituto no desenvolvimento de ambientes virtuais para essa empresa (Projeto B) era explorar a interação homem-RV de um ponto de vista mais completo, levando em consideração aspectos ergonômicos, psicológicos e fisiológicos da interação. Isso acabava resultando em um modo mais natural do usuário interagir com um ambiente virtual, facilitando a aceitação dessa tecnologia pelos usuários da empresa.

Uma outra questão ainda relacionada à interface, é que a cada momento em que uma aplicação de RV era desenvolvida, diversas partes da interface precisavam ser re-projetadas ou ainda projetadas partindo do início. Essa é uma outra dificuldade

encontrada no de ambientes virtuais e, daí a tentativa do instituto em projetar interfaces genéricas, que possam ser aplicadas e usadas em diversos ambientes de RV independente do objetivo de um ambiente particular.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A complexidade envolvida no gerenciamento do processo de desenvolvimento de produtos decorrente tanto de fatores internos quanto de fatores externos à empresa, acaba influenciando no alcance de um elevado desempenho em termos de tempo, qualidade e custo. Daí a importância dada à busca por novas soluções, metodologias e ferramentas de suporte, que possam facilitar a tomada de decisões envolvidas nesse processo, a identificação e solução de problemas e a integração das atividades de PDP. A Manufatura Virtual foi o foco deste trabalho como sendo a solução para as empresas na busca de um desempenho superior no desenvolvimento de produtos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi *analisar a utilização da Manufatura Virtual no Processo de Desenvolvimento de Produtos*, procurando enfatizar as limitações de PDPs tradicionais que podem ser superadas pela Manufatura Virtual, a sua proposta, benefícios e desafios encontrados para a sua aplicação. Para a apresentação da análise foi desenvolvido um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP (Modelo Proposto) com a finalidade de promover um parâmetro e uma visão comum para a discussão.

Pode-se afirmar que o objetivo foi alcançado conforme descrito no capítulo 5, o qual apresenta, juntamente ao Modelo Proposto, a análise da utilização da Manufatura Virtual em cada uma das etapas do PDP e uma visão global da aplicação no processo como um todo.

O alcance do objetivo foi possível através da realização das atividades previstas na metodologia de pesquisa, que previa além da pesquisa bibliográfica, a realização de estudos de caso.

Os estudos de caso foram realizados, no Brasil e no exterior, em empresas que estavam implementando um ambiente de Manufatura Virtual nos seus processos de desenvolvimento, porém com diferentes focos e escopos de aplicação. O primeiro caso, realizado em uma empresa multinacional, tinha como foco a aplicação da Manufatura Virtual nas atividades de planejamento de processos, produção e controle. O segundo

caso, envolvendo projetos de aplicação da Manufatura Virtual em duas empresas distintas, tinha como foco a aplicação no projeto do produto.

A análise dos casos reais foi bastante válida, pois possibilitou acompanhar experiências de aplicação da Manufatura Virtual em diferentes empresas, com diferentes PDPs, e com diferentes focos e escopos da Manufatura Virtual, e isso contribuiu para se alcançar um entendimento mais completo dos aspectos envolvidos na implementação da Manufatura Virtual.

Com a possibilidade de presenciar diferentes realidades de desenvolvimento de produtos e diferentes modelos de aplicação da Manufatura Virtual pôde-se enriquecer o Modelo Proposto bem como a discussão dos benefícios e desafios associados à implementação da Manufatura Virtual. Os estudos de caso contribuíram também proporcionando o contato direto com algumas ferramentas e tecnologias envolvidas.

A geração de um modelo para orientar a aplicação da Manufatura Virtual no PDP - o Modelo Proposto – teve como objetivo apresentar: as atividades de desenvolvimento de produtos que podem ser apoiadas pela Manufatura Virtual; os sistemas de software, suas funcionalidades e as informações de entrada e saída; a configuração destes sistemas em um ambiente de Manufatura Virtual; e as alternativas de formato neutro para promover a troca de dados nesse ambiente. O modelo propõe a aplicação da Manufatura Virtual em todas as etapas do PDP dentro do escopo de Manufatura Virtual definida no capítulo 3 (projeto, produção e controle). Cabe ressaltar que todos os sistemas de software propostos no trabalho encontram-se disponíveis no mercado atual.

Esse modelo foi utilizado no capítulo 5 como um “*frame*” para a discussão e apresentação da análise da utilização da Manufatura Virtual em um processo de desenvolvimento. O desenvolvimento do modelo foi útil pois na bibliografia consultada não foi encontrado nenhum modelo de aplicação da Manufatura Virtual em todas as etapas do PDP para ser utilizado como referência neste trabalho.

O Modelo Proposto pode também ser utilizado como um instrumento para orientar pesquisadores que desejam trabalhar nessa área. Pode ser um ponto de partida para a exploração de pesquisas mais específicas em determinadas áreas dentro do contexto da Manufatura Virtual. O Modelo pode ainda ser utilizado como uma orientação inicial para profissionais de empresas que desejam implementar um ambiente de Manufatura Virtual, pois ele fornece um direcionamento inicial de como aplicar a Manufatura Virtual e uma fonte de informações sobre as funcionalidades de sistemas e

ferramentas atualmente disponíveis e sobre alternativas de formatos para a integração de dados.

Para a sua utilização como modelo de referência de PDP em ambiente de MV seria necessário a sua validação através de aplicação em casos de testes ou em empresas, o que consiste em um trabalho complexo e que demandaria longo período de tempo. Para essa finalidade, tem-se um modelo bastante abrangente, envolvendo todas as etapas do PDP e explorando o uso de diversas ferramentas possíveis. Para a sua aplicação prática, uma avaliação do ambiente de desenvolvimento de produtos existente na empresa seria necessária, e a customização do Modelo Proposto seria realizada em função das necessidades da empresa. Em muitos casos, nem todas as funcionalidades e sistemas presentes no Modelo Proposto precisariam fazer parte do ambiente de Manufatura Virtual.

Quanto aos resultados obtidos na análise realizada, pode-se afirmar que o impacto da utilização da Manufatura Virtual no PDP é bastante significativo e tem sido reconhecido pelas empresas que a estão utilizando, e que existe uma tendência dos processos de desenvolvimento caminharem em direção à essa nova abordagem. Alguns pontos positivos quanto ao uso da Manufatura Virtual podem ser ressaltados:

- A Manufatura Virtual pode ser aplicada em diferentes níveis e atividades do PDP e gerar impactos em todas as etapas;
- O ambiente de Manufatura Virtual fornece um mecanismo para integrar diferentes etapas do PDP facilitando a captura e utilização de informações geradas durante a etapa de projeto e a geração simultânea, nesta etapa, de informações de manufatura;
- Uma das vantagens estratégicas da Manufatura Virtual é o avanço das decisões envolvidas na etapa de testes com protótipos físicos para as etapas iniciais do PDP com protótipos virtuais;
- O uso de sistemas de prototipagem virtual apresenta um grande potencial no fornecimento de capacidades avançadas de visualização e manipulação em tempo real para o desenvolvimento de produtos, permitindo um maior poder de avaliação visual e aquisição da percepção dos consumidores quanto ao produto;
- O uso de padrões como STEP, IGES, UPR, STL, VRML e SDX, para a troca e compartilhamento de dados nesse ambiente permite a adoção, no médio prazo, do ambiente, pois a funcionalidade principal destes padrões tem alcançado consenso entre organizações mundiais e desenvolvedoras de sistemas, podendo ser utilizados

como mecanismos integradores de dados e informações na maioria dos softwares da Manufatura Virtual. Torna-se importante a continuidade no desenvolvimento destes padrões e de tecnologias de suporte para que a implementação da Manufatura Virtual tenha sucesso nas empresas;

- A realização de projetos pilotos pode ser muito útil na implantação da Manufatura Virtual tanto para auxiliar as pessoas que farão uso do ambiente para compreenderem melhor o seu funcionamento quanto para validar tecnologias e ferramentas.
- A inclusão da Realidade Virtual proporciona ao desenvolvimento de produtos uma nova tecnologia de interface com o usuário, permitindo ao homem uma maior interação com o objeto simulado e possibilitando a sua imersão no ambiente virtual.

Essa tecnologia proporciona uma interface melhorada para o projeto e modelagem do produto, simulação dos processos, planejamento das operações e controles de chão de fábrica em tempo real.

A grande vantagem da RV pode estar na possibilidade de interação com os produtos que estão sendo desenvolvidos, visto que ela pode permitir a verificação do modelo em diferentes fases do PDP, ou seja, em uma fase que o produto não se encontra totalmente definido bem como em uma fase final do desenvolvimento, quando a definição do projeto já foi realizada. A oportunidade de visualizar um produto funcionando ou sendo fabricado e interagir com este produto em um ambiente de simulação, e não apenas visualizá-lo através de uma simples animação, é, sem dúvida, um aspecto que pode resultar em diversas vantagens estratégicas.

Embora o desenvolvimento da Manufatura Virtual possa ser considerado uma evolução de diversas tecnologias e do ambiente de negócios, para se implementar um ambiente integrado e completo, que envolve desde a definição do conceito do produto até a sua produção, destacam-se os seguintes desafios:

- Envolvimento de diversas ferramentas e tecnologias computacionais, algumas delas ainda em desenvolvimento e que requerem muito conhecimento, longas curvas de aprendizado e, muitas vezes, a introdução de novas interfaces homem-computador como a RV;
- A aplicação bem sucedida de um ambiente de Manufatura Virtual requer um *know-how* multidisciplinar, envolvendo uma ampla gama de disciplinas das ciências da computação e engenharia, e abrange mais do que a simulação tradicional de um

processo ou operação particular. O entendimento dos processos e operações, que já possui grande importância nos métodos convencionais, torna-se essencial para que sejam simulados;

- Resistência e dificuldade das pessoas em aceitar a Manufatura Virtual, pois receiam a sistematização e as mudanças envolvidas;
- Utilização da RV ainda é restrita, principalmente devido aos custos envolvidos (aquisição de software e hardware, treinamento e contratação de mão-de-obra especializada), às limitações tecnológicas, à ausência de um melhor entendimento dos aspectos humanos envolvidos na percepção sensorial dos ambientes virtuais e reais, e à carência de experiências de criação e utilização dos novos conceitos possibilitados pela RV.
- A Manufatura Virtual depende da reinvenção das habilidades de engenheiro, ou reinvenção de cada uma das ferramentas que são envolvidas no processo de desenvolvimento.

Uma das questões mais desafiadoras é a falta de interoperabilidade de dados, que inibe o uso de ferramentas tradicionais em ambientes de Manufatura Virtual, os quais por natureza requerem um alto grau de integração. Aumentar a interoperabilidade das ferramentas de software é uma atividade complexa, principalmente devido à geração de um custo, às incertezas sobre o retorno no investimento e às dinâmicas psicológica e social das organizações. Porém, a melhoria é essencial, pois a falta de interoperabilidade resulta em elevados custos para a empresa.

Uma forma de criar um ambiente altamente integrado é através do uso de arquiteturas abertas que permitam a inserção de novos elementos, usando interfaces projetadas de acordo com padrões pré-definidos. Essa alternativa reduz o custo de implementação e treinamento, pois possibilitam que mudanças nas capacidades dos sistemas sejam realizadas com um impacto mínimo e por meio de interfaces com usuário.

Além disso, mesmo que novas ferramentas e sistemas sejam altamente interoperáveis, a Manufatura Virtual somente se tornará realidade quando for efetivamente integrada com ferramentas e sistemas legados, principalmente no caso de utilizar esta proposta em um ambiente de desenvolvimento de produtos já existente.

Apesar de oferecer uma solução atrativa para as empresas melhorarem seu desempenho no desenvolvimento de produtos, ela não pode ser vista como uma solução

para melhorar o estado atual da empresa de forma imediata. A Manufatura Virtual é uma solução que traz benefícios futuros, e deve ser implementada de modo incremental.

Para uma implementação bem sucedida, devem ser considerados, além dos fatores técnicos, os fatores organizacionais e culturais de cada empresa e, desde o início do processo, devem ser consideradas questões como tempo, aprendizado e compartilhamento de dados entre os diversos sistemas. Além disso, a sua implementação deve ser uma decisão estratégica na empresa, fortemente apoiada pela alta administração.

O suporte da alta administração torna-se muito importante para que ambientes desse tipo sejam implementados. Recursos adicionais são necessários no início do desenvolvimento de produtos para tratar das sofisticadas análises e simulações presentes neste novo ambiente. O suporte de institutos de pesquisa e de empresas também se torna importante, pois para a implantação da Manufatura Virtual, diferentes empresas, setores de negócio e tecnologias estão envolvidas.

Mesmo sabendo dos desafios para a implantação da Manufatura Virtual, espera-se um futuro promissor, pois a contínua demanda por produtos de alta qualidade, com custos reduzidos e menores tempos de lançamento no mercado levam as empresas a mudarem suas estratégias, processos e práticas de desenvolvimento de produto. E a Manufatura Virtual proporciona, dentro de um ambiente integrado e virtual, as mais poderosas ferramentas para as empresas lidarem com estas mudanças.

### **Recomendações para Trabalhos Futuros**

Algumas recomendações podem ser feitas para a realização de trabalhos futuros:

- Desenvolver métodos que permitam o controle de configuração e reuso de modelos de simulação no ambiente de manufatura virtual, ou seja, que permitam armazenar, recuperar e modificar modelos, podendo-se gerar um modelo novo a partir de um modelo já existente, avaliando se o alcance, nível de detalhes e precisão do modelo original são aplicáveis para o novo estudo.
- Dar continuidade ao desenvolvimento de métodos para a modelagem voltada à simulação, que tenham como prioridade a máxima importação dos dados originais aumentando a integração entre projeto do *layout* e simulação de eventos discretos.

- Explorar o uso de sistemas PDM no ambiente de Manufatura Virtual para a geração de procedimentos automáticos para a criação de arquivos de formatos neutros, controle de alterações técnicas no projeto, e gerenciamento dos processos, sistemas e informações.
  - Desenvolver métodos para conversão automática de dados entre sistemas CAD e RV, e que permitam a transferência de alterações realizadas no ambiente virtual para o sistema de projeto.
  - Explorar o uso da Manufatura Virtual pela Internet visando estabelecer uma relação com fornecedores de equipamentos e máquinas que irão compor o ambiente real de produção para verificar, através da simulação, se o equipamento atende as condições de desempenho de produção desejadas.
  - Desenvolver métricas que possam quantificar: os benefícios da Manufatura Virtual para o PDP; o impacto da Manufatura Virtual na cultura da empresa; e o impacto nas decisões relacionadas a custos, riscos, tempo e qualidade. Essas métricas ajudariam a demonstrar, validar e calcular os benefícios no novo ambiente.
- 
- Explorar o uso da tecnologia orientada a objeto, que pode ser uma ferramenta para a representação na Manufatura Virtual, na qual cada objeto transporta consigo as informações, dizendo a cada sistema como interpretar o seu conhecimento. Essa tecnologia pode fornecer uma plataforma comum para compartilhar informações e um meio para armazenar, recuperar e modificar informações, conhecimentos e modelos.

## REFERÊNCIAS

- ADVANCED engineering environments: achieving the vision, phase 1.* (1999). National Academy Press, Washington, D.C. Disponível em: <<http://www.nap.edu/books>> Acesso em: 10 out. 2001.
- ADVANCED PLANNING OF QUALITY PRODUCTS. (1994). *QS 9000: quality system requirements for automotive industry.* USA, Omnex.
- BACK, N. (1983). *Metodologia de projeto de produtos industriais.* Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- BANERJEE, P.; ZETU, D. (2001). *Virtual manufacturing.* New York: John Wiley & Sons Inc.
- BARCLAY, I. (1992). The new product development process: improving the process of new product development. *R&D Management*, v. 22, n. 4, p. 307-317.
- BARNES, M. (1996). Virtual reality and simulation. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.101-110.
- BENNETT, G.R. (1997). The application of virtual prototyping in the development of complex aerospace products. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v.69, n.1, p.19-25.
- BOER, C. R.; JOVANE, F.; SACCO, M.; IMPERIO, E. (1997). Virtual reality as a tool for sustainable production in the manufuturing model. In: CIRP International Symposium, Hong Kong, *Proceedings...*, August.
- BOWYER, A.; BAYLISS, G.; TAYLOR, R.; WILLIS, P. (1996). A Virtual Factory. *International Journal of Shape Modeling*, v.2, n.4, p.215-226.
- BROWN, S. L.; EISENHARDT, K. M. (1995). Product development: past research, present findings, and future directions. *Academy of Management Review*, v.20, n.2, p.343-378.
- BULLINGER, H. J.; WARSCHAT, J.; FISCHER, D. (2000). Rapid product development – an overview. *Computers in Industry*, v.42, p.99-108.
- BURDEA, G.C. (1999). Invited review: the synergy between virtual reality and robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.15, n.3, p.400-410.
- CARTER, D.E.; BAKER, B.S. (1992). *CE – Concurrent engineering: the product development environment for the 1900s.* Massachussets: Addison – Wesley Publishing Company Inc.
- CHANCE, F.; ROBINSON, J.; FOWLER, J. (1996). Supporting manufacturing with simulation: model design, development and deployment. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, San Diego, CA.

CHANG, K. H.; SILVA, J.; BRYANT, I. (1999). Concurrent design and manufacturing for mechanical systems. *Concurrent Engineering Research and Applications*, v.7, n.4, p.290-308.

CHEUNG, C. F.; LEE, W.B. (2001). A framework of a virtual machining and inspection system for diamond turning of precision optics. *Journal of Materials and Processing Technologies*, v.119, p.27-40.

CHOI, S.H.; CHAN, A.M.M. (2004). A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, v.36, p.401-412.

CHUA, C.K.; TEH, S.H.; GAY, R.K. (1999). Rapid prototyping versus virtual prototyping in product design and manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.15, p. 597-603.

CLARK, K.B.; FUJIMOTO, T. (1989). Lead time in automobile development: explaining the japanese advantage. *Journal of Technology and Engineering Management*, v.6, p.25-58.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. (1991). *Product Development Performance: strategy, organization and management in the world auto industry*. Boston: Harvard Business School Press.

CLARK, K. B.; WHEELWRIGHT, S. C. (1993). *Managing new product and process development: text and cases*. New York: The Free Press.

CLAUSING, D. (1994). *Total quality development: a step-by-step guide to world-class concurrent engineering*. New York: American Society of Mechanical Engineering Press.

CORBO, P.; GERMANI, M.; MANDORLI, F. (2004). Aesthetic and functional analysis for product model validation in reverse engineering applications. *Computer-Aided Design*, v.36, p.65-74.

CORSEUIL, E.T.L.; RAPOSO, A.B.; SANTOS, I.H.F.; GATTASS, M.; PINTO, M.H.G. (2003). Buscando o Uso Operacional de Realidade Virtual em Grandes Modelos de Engenharia. In: Symposium on Virtual Reality, 6., *Anais...*, Ribeirão Preto, p.187-198.

CRAIN, L.M. (1996). *Virtual manufacturing – the next revolution in global manufacturing*. California, MARC Analysis Research Corporation, USA.

CROW, K. (2000). *Design automation requirements to support integrated product development*. DRM Associates. Disponível em: <<http://www.npd-solutions.com/designauto.html>> Acesso em: 26 jun. 2003.

CUSUMANO, A. M.; NOBEOKA, K. (1998). *Thinking beyond lean: how multi-project management is transforming product development at Toyota and other companies*. New York: Simon & Schuster.

DANI, T.H.; GADH, R. (1997). Creation of concept shape designs via a virtual reality interface. *Computer-Aided Design*, v.29, n.8, p.555-563.

DELMIA Company (2000a). *Machining products*: Virtual NC. Dassault Systemes. Disponível em: <<http://www.delmia.com>> Acesso em: 5 abr. 2004.

DELMIA Company (2000b). *Robotics products*: Igrid. Dassault Systemes. Disponível em: <<http://www.delmia.com>> Acesso em: 5 abr. 2004.

DELMIA Company (2000c). *Inspection products*. Dassault Systemes. Disponível em: <<http://www.delmia.com>> Acesso em: 5 abr. 2004.

DELMIA Company (2000d). *Ergonomics products*: Envision/Ergo. Dassault Systemes. Disponível em: <<http://www.delmia.com>> Acesso em: 5 abr. 2004.

DICKERSON, C. (1996). *Product data management: an overview*. Computer and Automated Systems Association / Society of Manufacturing Engineers.

ELMARAGHY, H. A. (1993). Evolution and future perspectives of CAPP. In: CIRP, *Annals...*, v.42, n.2.

ERVE A.H.V. (1988). *Computer aided process planning for part manufacturing: an expert system approach*. Tese (Doutorado) - University of Twente, 1988.

FASSI, I.; MOTTURA, S.; SACCO, M.; BOËR, C.R. (1999). An approach to virtual manufacturing environment. In: Swiss CAD/CAM Conference, *Proceedings...*, Neuchatel, Switzerland.

FENG, S.C.; SONG, E.Y. (2000). Information modeling of conceptual design integrated with process planning. In: International Mechanical Engineering Congress and Exposition, *Proceedings...*, Florida, p.1-8.

FERREIRA, H.S.R.; TOLEDO, J.C. (2001). Metodologias e ferramentas de suporte à gestão do processo de desenvolvimento de produto (PDP) na indústria brasileira de autopeças. In: Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 3., 2001, Florianópolis. *Anais...*, Florianópolis, SC, setembro.

FREEDMAN, S. (1999). An overview of fully digital manufacturing technology. In Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.281-285.

GALLIZIO, M.; SEMBENINI, G. (2002). Accessibility and maintainability studies through digital humans in a digital mock-up context. In: ICAS2002 Congress, *Proceedings...*, p. 883.1-883.10.

GOLDSTEIN, B.L.M.; KEMMERER, S.J.; PARKS, C.H. (1998). A brief history of early product data exchange standards. *Technical Report NISTIR 6221*, National Institute of Standards and Technology – NIST, Gaithersburg, MD.

- GUPTA, S. K.; DAS, D.; REGLI, W. C.; NAU, D. S. (1995). *Automated manufacturability analysis: a survey*. Disponível em: <<http://www.isr.umd.edu/Labs/CIM/vm/report/report.html>> Acesso em: 12 jun. 2000.
- HENDERSON, K. (1995). The political career of a prototype: visual representation in design engineering. *Social Problems*, v.42, n.2, p.274-299.
- HENRIQUES, J.R.; SCHUTZER, K. (2003). Avaliação do sistema CAD Unigraphics para a melhora da eficiência na troca de dados através da STEP AP214. In: Encontro de Mestrados e III Encontro de Doutorandos em Engenharia, *Anais...*, UNIMEP, Piracicaba.
- HMS Software (2005). *Second generation HMS-CAPP*. Disponível em: <http://www.hmssoftware.com>> Acesso em: 6 abr. 2005.
- JAIN, S. (1999). Simulation in the next millennium. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.1478-1484.
- JAYARAM, S.; CONNACHER, H.I.; LYONS, K.W. (1997). Virtual assembly using virtual reality techniques. *Computer-Aided Design*, v.29, n.8, p.575-584.
- JOHANSSON, B.; JOHANSSON, J.; KINNANDER, A. (2003). Information structure to support discrete event simulation in manufacturing systems. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, 1290-1295.
- KRISHNAN, V.; EPPINGER, S.; WHITNEY, D. (1997). A model-based framework to overlap product development activities. *Management Science*, v.43, p.437-451.
- KUME, H. (1995). Product development and quality design. *KENSHU*, n. 137, p. 17-24.
- LAU, H.; JIANG, B. (1998). A generic integrated system from CAD to CAPP: a neutral file-cum-GT approach. *Computers Integrated Manufacturing System*, v.11, n.1-2, p.67-75.
- LAU, H.Y.K.; MAK, K.L.; LU, M.T.H. (2003). A virtual design platform for interactive product design and visualization. *Journal of Materials Processing Technology*, v.139, p. 402-407.
- LAWRENCE ASSOCIATES INC. (1994). Virtual manufacturing user workshop. *Technical Report*, Ohio. Disponível em: <<http://www.isr.edu/Labs/CIM/vm/lai1/final6.html>> Acesso em: 23 out. 2001.
- LEE, W. B.; CHEUNG, C. F.; LI, J. G. (2001). Applications of virtual manufacturing in materials processing. *Journal of Materials Processing Technology*, v.113, p.416-423.
- LIN, E.; MINIS, I.; NAU, D.S.; REGLI, W.C. (1995). *Contribution to virtual manufacturing background research*. Institute of Systems Research, University of Maryland, Disponível em: <<http://www.isr.umd.edu/Labs/CIM/vm/report/report.html>> Acesso em: 12 jun. 2000.

MACKRELL, J. (2004). Exchanging product design data: business benefits of the collaboration gateway. *CIMdata Inc.*, Abril.

MCLEAN, C.; LEONG, S.; HARRELL, C.; ZIMMERMAN, P.M.; LU, R.F. (2003). Simulation standards: current status, needs, and future directions. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.2019 – 2026.

MECKLENBURG, K. (2001). Seamless integration of layout and simulation. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.1487-1491.

MARSAN, A.; KUMAR, V.; DUTTA, D.; PRATT, M.J. (1998). An assessment of data requirements and data transfer formats for layered manufacturing. *Technical Report NISTIR 6216*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

MERVYN, F.; KUMAR, A.S.; BOK, S.H.; NEE, A.Y.C. (2004). Developing distributed applications for integrated product and process design. *Computer-Aided Design*, v.36, p.679-689.

MOORE, P.R.; PU, J.; NG, H.C.; WONG, C.B.; CHONG, S.K.; CHEN, X.; ADOLFSSON, J.; OLOFSGARD, P.; LUNDGREN, J.O. (2003). Virtual engineering: an integrated approach to agile manufacturing machinery design and control. *Mechatronics*, v.13, p.1105-1121.

MOORTHY, S. (1999). Integrating the CAD model with dynamic simulation: simulation data exchange. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.276-280.

MURPHY, C.A.; PERERA, T.D. (2001). The definition and potential role of simulation within an aerospace company. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.829-837.

NATIONAL COALITION FOR ADVANCED MANUFACTURING (2001). *Exploiting e-manufacturing: interoperability of software systems used by U.S. manufacturers*. Washington, D.C., February.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (2001). Alternative engineering: how virtual reality and simulation are changing design and analysis. *NASA Tech Briefs Engineering Solutions for Desing & Manufacturing Magazine*, v.25, n.6, p.16-24, June.

NORTH AMERICAN TECHNOLOGY AND INDUSTRIAL BASE ORANIZATION (1996). *Collaborative Virtual Prototyping Sector Study*. An Assessment of CVP Technology Integration and Implementation, NATIBO. May.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (1999). Interoperability Cost Analysis of the U.S. Automotive Supply Chain. *Planning Report #99-1*, Gaithersburg, MD. Disponível em:  
<<http://www.mel.nist.gov/msid/sima/daratech/sld007.htm>> Acesso em: 21 out. 2001.

- OFFODILE, O. F.; ABDEL-MALEK, L.L. (2002). The virtual manufacturing paradigm: the impact of IT/IS outsourcing on manufacturing strategy. *International Journal of Production Economics*, v.75, p.147-159.
- OH, J.Y.; STUERZLINGER, W. (2004). A system for desktop conceptual 3D design. *Virtual Reality*, v.7, p.198-211.
- OWEN, J.V. (1994). Making virtual manufacturing real. *Manufacturing Engineering*, v.113, n.5, p.33-37.
- PDES. (1999). *STEP success stories*. PDES Inc. presentation. Disponível em: <<http://pdesign.aticorp.org/success-stories.ppt>>, Acesso em: 1999.
- PENG, Q.; HALL, F. R.; LISTER, P. M. (2000). Application and evaluation of VR-based CAPP system. *Journal of Materials Processing Technology*, v.107, p.153-159.
- PORTO, A.J.V.; PALMA, J. G. (2000). Manufatura virtual. *Revista Produto e Serviços*, São Paulo, Ed. Banas, n.312, p.89-97, dez.
- PRASAD, B. (1997). *Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process organization*. New Jersey: Prentice Hall International Series.
- PROFICIENCY (2004). *The proficiency collaboration gateway*. Proficiency Inc., Boston, USA, Disponível em: <<http://www.proficiency.com>> Acesso em: 10 nov. 2004.
- PROSTEP (2004a). *AP 203 configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies*. Disponível em: <[http://www.prostep.org/en/stepportal/was/application\\_protocols/ap203.sql](http://www.prostep.org/en/stepportal/was/application_protocols/ap203.sql)> Acesso em: 14 jul. 2004.
- PROSTEP (2004b). *AP 214 core data for automotive mechanical design processes*. Disponível em: <[http://www.prostep.org/en/stepportal/was/application\\_protocols/ap214.sql](http://www.prostep.org/en/stepportal/was/application_protocols/ap214.sql)> Acesso em: 14 jul. 2004.
- PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (2003). Pro/CONCEPT – Capture ideas instantly and quickly turn them into winning products. *Data Sheet*, PTC – Parametric Technology Corporation. Disponível em: <<http://www.ptc.com>> Acesso em: 15 abr. 2004.
- RAJAN, V.N.; SIVASUBRAMANIAN, K.; FERNADEZ, J.E. (1999). Accessibility and ergonomic analysis of assembly product and jigs designs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v.23, p.473-487.
- RAVELLI, C.A. (2003). *Análise da interoperabilidade de dados para a implementação de um ambiente de Manufatura Virtual*. 111p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

REVISTA QUALIDADE EMPRESARIAL (2001). Embraer: como a Embraer utiliza a Realidade Virtual e os conceitos de tecnologia 3D na concepção e fabricação dos aviões. *ISONET*, n.13, setembro.

RICHARDSON, R. J. (1985). *Pesquisa social: métodos e técnicas*. São Paulo: Atlas.

ROMANO, L.N. (2003). *Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas*. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROZENFELD, H. (1999). Desenvolvimento de produto na manufatura integrada por computador (CIM). *Engenharia e Arquitetura – Caderno de Engenharia Mecânica*, v.1, n.1, p.4-18.

ROZENFELD, H.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; CARVALHO, J. (2000). O processo de desenvolvimento de produtos. *Revista Produto e Serviços*, São Paulo, Ed. Banas, n.312, p.55-64, dez.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; TOLEDO, J.C.; ALLIPRANDINI, D.H.; MOSCONI, E.P.; FERREIRA, C.V.; BASBALHO, S.; ROMANO, L.N.; PEREZ, R.L.; SCALICE, R.K.; PENSO, C.C.; MENEGATTI, F.A.; AREND, L. (2003). Integrando os conhecimentos em um PDP de três grupos de pesquisa: proposta de um modelo de referência e suas aplicações. In: Congresso Brasileiro de Gestão e Desenvolvimento de Produtos, 4., *Anais...*, Gramado, RS.

SACCO, M.; MOTTURA, S.; FOSSATI, M.; BOËR, C.R. (2000). The industrial design interdisciplinarity and the applied research: the EUREKA CODERAVI project. In: Design Plus Research International Symposium, *Proceedings...*, Milan, Italy.

SACCO, M.; MOTTURA, S.; VIGANÒ, G.; AVAI, A.; BOËR, C.R. (2000). Tools for the innovation: virtual reality and discrete events simulation to build the 2000 factory. In AMSMA 2000, *Proceedings...*, China, p.458-462.

SCHEER, A.W. (1998). *Business process engineering: reference models for industrial enterprises*. Heidelberg: Springer-Verlag.

SCHELKLE, E.; ELSENHANS, H. (2001). Virtual vehicle development in the concept stage - current status of CAE and outlook on the future. In: MSC Worldwide Aerospace Conference & Technology Showcase, 3., *Proceedings...*, Toulouse, France, p. 24-26.

SCHNITGER, M. (2003). Digital simulation to meet today's product development challenges. *White Paper*, Daratech Inc, dezembro.

SENGE, P. (1996). *The fifth discipline: the art and practice of the learning organization*. New York: Scribner.

SHOAF, S. (2001). Configured DMU. *IBM Product Lifecycle Management Solutions*, February, 2001. Disponível em: <<http://www.ibm.com/Solutions/plm>> Acesso em: 15 fev. 2005)

SHUKLA, C.; VAZQUEZ, M.; CHEN, F.F. (1996). Virtual manufacturing: an overview. *Computers Industrial Engineering*, v.31,n.1/2, p.79-82.

SILVA, S.L. (2002). *Proposição de um modelo para caracterização das conversões do conhecimento no processo de desenvolvimento de produtos*. 231p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE (2002). Capability Maturity Model<sup>®</sup> Integration (CMMI<sup>SM</sup>), Version 1.1. *Technical Report*. Pittsburgh, PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, March.

SOUZA, A.F.; COELHO, R.T. (2004). Definições e estado-da-arte para o ambiente fabril. *Revista Máquinas e Metais*, p.204-213

SOUZA JUNIOR, C. (2003). *O uso da dinâmica de sistemas na simulação da estrutura do processo de desenvolvimento de produtos*. 107p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

SOUZA, M.C.F.; RAVELLI, C.A.; PORTO, A.J.V.; BATOCCHIO, A. (2002). Manufatura virtual: conceituação e desafios. *Revista Gestão e Produção*, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR. v.9, n.3, p.297-312.

SZYKMAN, S.; FENVES, S.J.; KEIROUZ, W.; SHOOTER, S.B. (2001). A foundation for interoperability in next-generation product development systems. *Computer-Aided Design*, v.33, p.545-559.

THOMKE, S. (1998). Managing experimentation in the design of new products. *Management Science*, v.44, p.743-762.

THOMKE, S.; FUJIMOTO, T. (2000). The effect of “front-loading” problem-solving on product development performance. *Journal of Product Innovation Management*, v. 17, p. 128-142.

TSENG, M.M.; JIAO, J.; SU, C.J. (1998). Virtual prototyping for customized product development. *Integrated Manufacturing Systems*, v.9/6, p. 334-343.

TOLEDO, J.C. (1993). *Gestão da Mudança da Qualidade de Produto*. 231p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

UHLMANN, E.; SCHAPER, E. (2004). Como usar a TI para aumentar a produtividade. *Máquinas e Metais*, p.86-120, abr.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. (1995). *Product design and development*. New York: McGraw-Hill.

USINGEM BRASIL (2004). *Realidade virtual revoluciona a criação na VW*. Disponível em: <[http://www.usinagem-brasil.com.br/construtordepagina/htm/1\\_2\\_4193htm](http://www.usinagem-brasil.com.br/construtordepagina/htm/1_2_4193htm)> Acesso em: 10 out. 2004.

- VALÉRIO NETO, A. (1998). *Prototipação de um torno CNC utilizando realidade virtual*. 131p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- VALLE, H.M.C. (2005). *Prototipação virtual de plataforma agrícola móvel*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- VERGANTI, R. (1997). Leveraging on systemic learning to manage the early phase of product innovation projects. *R&D Management*, v.27, p.377-392.
- VERNADAT, F.B. (1996). *Enterprise modelling and integration: principles and application*. London: Chapman & Hall.
- VICENTI, W. (1990). *What Engineers Know and How They Know It*. Baltimore: John Hopkins Press.
- WALLER, D.L. (1999). *Operations management: a supply chain approach*. London: International Thomson Business Press.
- WAVE REPORT (2002). *3D - Points to Ponder*. Disponível em <<http://www.wave-report.com>> Acesso em: 02 jul. 2002.
- WEB3D CONSORTIUM (2002). The virtual reality modelling language. Disponível em: <<http://www.vrml.org/technicalinfo/specifications/eai/part1/>> Acesso em: 20 dez. 2002.
- WEBSTER, M.; SUGDEN, D. (2003). Implementation of virtual manufacturing by a technology licensing company. *International Journal of Operations & Production Management*, v.23, n.5, p.448-469.
- WIEGERS, T.; VERGEEEST, J.S.M. (2001). Extraction of CAD tool requirements from industry and from experimental design projects. In: ASME Design Engineering Technical Conferences And Computers and Information in Engineering Conference, *Proceedings...*, Pittsburgh, Pennsylvania, p.9-12.
- WINNER, R.I., PENNELL, J.P., BERTREND, H.E. & SLUSARCZUK, M.M.G. (1988). The role of concurrent engineering in weapons system acquisition. *IDA Report R-338*. Alexandria, Institute for Defense Analysis.
- YIN, R. K. (1989). *Case study research: design and methods*. USA: Sage Publications.
- ZANCUL, E. S. (2000). *Análise da aplicabilidade de um sistema ERP no processo de desenvolvimento de produtos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- ZHA, X.F.; LIM, S.Y.E.; FOK, S.C. (1999). Development of expert system for concurrent product design and planning of assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.15, p.153-162.

ZHAO, G.; DENG, J.; SHEN, W. (2001). CLOVER: an agent-based approach to systems interoperability in cooperative design systems. *Computers in Industry*, v.45, p.261-276.

ZHOU, M.; SON, Y.J.; CHEN, Z. (2004). Knowledge representation for conceptual simulation modeling. In: Winter Simulation Conference, *Proceedings...*, p.450-458

## APÊNDICE A – Macro-etapas, etapas e atividades do Modelo de Referência

MACRO ETAPAS	ETAPAS	ATIVIDADES	
<b><u>PRÉ-DESENVOLVIMENTO</u></b>	<b>Planejamento Estratégico de Produtos</b>	Definir escopo da revisão do Plano Estratégico de Negócios (PEN)	
		Planejar atividades para a revisão do PEN	
		Consolidar informações sobre tecnologia e mercado	
		Revisar o PEN	
		Analisar o Portfólio de Produtos da Empresa	
		Propor mudanças no portfólio de produtos	
		Decidir mudanças no portfólio de produtos	
		Decidir início do planejamento de um produto do portfólio	
	<b>Planejamento do Projeto</b>		Definir interessados do projeto
			Definir escopo do produto
			Definir escopo do projeto
			Preparar declaração de escopo
			Adaptar o modelo de referência
			Definir atividades e prazos
			Definir recursos necessários
			Preparar estimativa de orçamento do projeto
			Analisar a viabilidade econômica do projeto
			Avaliar riscos
			Definir indicadores de desempenho
			Definir plano de comunicação
	Planejar e preparar aquisições		
	Preparar Plano de Projeto		

<b><u>DESENVOLVIMENTO</u></b>	<b>Projeto Informacional</b>	Atualizar o Plano do Projeto Informacional
		Definir o problema de projeto do produto
		Detalhar ciclo de vida do produto e definir seus clientes
		Identificar os requisitos dos clientes do produto
		Definir requisitos de projeto do produto
		Definir especificações de projeto do produto
		Avaliar etapa
		Submeter a aprovação
		Documentar as decisões tomadas e registrar lições aprendidas
	<b>Projeto Conceitual</b>	Atualizar o Plano do Projeto Conceitual
		Estabelecer a estrutura funcional do produto/família
		Desenvolver alternativas de concepção
		Definir e desenvolver fornecedores e parcerias de co-desenvolvimento
		Selecionar e determinar concepções alternativas
		Atualizar estudo de viabilidade econômica
		Avaliação da etapa
		Submeter a aprovação
		Documentar as decisões tomadas e registrar lições aprendidas

<b><u>DESENVOLVIMENTO</u></b>	<b>Projeto Preliminar</b>	Atualizar o Plano do Projeto Preliminar
		Refinar a arquitetura do produto
		Detalhar preliminarmente SSC
		Decidir por fazer ou comprar SSC
		Desenvolver fornecedores
		Planejar o processo de manufatura macro
		Desenvolver testes
		Avaliar etapa
		Submeter a aprovação
		Documentar as decisões tomadas e registrar lições aprendidas
		<b>Projeto Detalhado</b>
	Detalhar documentação do produto	
	Avaliar documentação do produto	
	Otimizar Produto	
	Detalhar plano de processo de fabricação e montagem	
	Projetar Recursos de fabricação	
	Enviar documentação do produto a parceiros	
	Criar material de suporte do produto	
	Projetar embalagem	
	Homologar produto	
	Planejar fim de vida do produto	
	Monitorar a viabilidade econômica do produto	
	Avaliar fase	
Aprovar fase		
Documentar as decisões tomadas e registrar lições aprendidas		

<b><u>DESENVOLVIMENTO</u></b>	<b>Preparação da Produção do Produto</b>	Obter recursos de fabricação
		Planejar Produção Piloto
		Receber e instalar recursos
		Produzir Lote Piloto
		Homologar processo
		Otimizar produção
		Certificar produto
		Desenvolver processo de produção
		Desenvolver processo de manutenção
		Ensinar pessoal
		Monitorar a viabilidade econômica
		Avaliar fase
		Aprovar fase- liberar producao
		Documentar as decisões tomadas e registrar lições aprendidas
	<b>Lançamento do Produto</b>	Planejar lançamento
		Desenvolver processo de vendas
		Desenvolver processo de distribuição
		Desenvolver processo de atendimento ao cliente
		Desenvolver processo de assistência técnica
		Promover marketing de lançamento
		Lançar produto
		Gerenciar lançamento
		Acompanhar fornecimentos iniciais
		Atualizar plano de fim de vida
		Monitorar a viabilidade econômica
		Avaliar fase
Aprovar fase		
Documentar as decisões tomadas e registrar lições aprendidas		

<b><u>PÓS-DESENVOLVIMENTO</u></b>	<b>Acompanhar e Melhorar o Produto</b>	Realizar auditoria do projeto
		Avaliar Satisfação do Cliente
		Monitorar desempenho do produto
		Gerenciar modificações do produto
		Registrar lições aprendidas
	<b>Descontinuar Produto no Mercado</b>	Analisar e aprovar retirada do mercado
		Planejar retirada do mercado
Implementar plano de retirada do mercado		
<b><u>PROCESSOS DE APOIO</u></b>	<b>Gerenciamento de Mudanças de Engenharia</b>	Realizar auditoria do projeto
		Avaliar Satisfação do Cliente
		Monitorar desempenho do produto
		Gerenciar modificações do produto
		Registrar lições aprendidas
	<b>Melhoria do processo de desenvolvimento de produtos</b>	Analisar e aprovar retirada do mercado
		Planejar retirada do mercado
Implementar plano de retirada do mercado		

APÊNDICE B - Tabela de sistemas da Manufatura Virtual, funcionalidades, informações de entrada e saída e exemplos de softwares comerciais

Sistemas de software	Descrição	Funcionalidades	Informações de entrada	Informações de saída	Exemplos de softwares comerciais
Sistema de Projeto Conceitual	Ferramenta de esboço 2D e modelagem 3D integrados para a definição digital do conceito e estilo do produto	(1) Criação de esboços 2D: projeto 2D integrado em ambiente 3D; permite criar esboços diretamente sob dados CAD de referência; cria ilustrações; ferramenta para ajuste de cor, imagens, sombras e luzes; criação de curvas de alta qualidade. (2) Desenvolvimento do esboço 2D em modelos 3D. (3) Modelagem de superfícies e forma livre: criação de qualquer forma; histórico de como superfícies são criadas; cria e edita linhas, arcos, curvas e superfícies de forma livre de alta qualidade. (4) Visualização em tempo real e realista de modelos 3D para avaliação: suporta texturas e transparência; avaliação de superfícies usando cores e linhas de reflexos. (5) Engenharia reversa: importa e configura dados de escaners 3D. (6) Renderização foto realista em tempo real. (7) Criação de animações. (8) Exporta arquivos STL para prototipagem rápida. (9) Integração de dados através de interfaces diretas ou formatos neutros de arquivos.	Informações sobre requisitos dos clientes, requisitos de projeto, especificações de projeto	Modelo Conceitual 3D do produto	* Alias StudioTools (Alias) * Pro/Engineer Concept and Industrial Design (PTC)
Sistema CAD de Projeto do Produto	Ferramenta para a criação de modelos CAD 3D que representem as peças e o produto e contenham informações suficientes para realizar as próximas atividades.	(1) Modelagem 3D dos componentes e montagens; (2) Definição e representação completa de componentes / montagens (geometria, topologia, features e tolerância); (3) Construção de modelos geométricos das partes / montagem usando os tipos de modelos: 2D, wireframe, 3D, de superfície, sólidos; (4) Rotação e visualização do componente / montagem em qualquer orientação espacial; (5) Capacidade para gerar desenhos técnicos 2D para a produção; (6) Renderização em tempo real; (7) Rotinas de Import/Export para trocar dados com outros pacotes e por meio de formatos padrões; (8) Cálculo de propriedades de massa das peças e montagens; (9) simulação cinemática.	Modelo Conceitual 3D do produto	Modelo CAD 3D dos componentes / sistemas (geometria, dimensões, features, tolerâncias, superfície).	* Pro/Engineer (PTC) * CATIA (Dassault Systemes) * Unigraphics (UGS) * I-DEAS (Structural Dynamics Research Corporation)

<p><b>Sistema de Mock-up Digital (DMU)</b></p>	<p>Ferramenta para visualização 3D da montagem completa do produto com toda a complexidade interna para o encaixe interno e análises de interferência da montagem final.</p>	<p>(1) Visualização de montagens complexas para avaliação rápida da forma e encaixe de montagens completas de modelos sólidos 3D em um produto; (2) Verificação de colisões entre componentes; (3) Verificação de falhas de montagem do produto; (4) Detecção de interferências, folga, distâncias mínimas e acesso; (5) Posicionamento automático das partes e verificação da consistência de montagem; (6) Realização de revisões colaborativas e revisões das análises de engenharia; (7) Visualização avançada 2D e 3D com análise de grandes e complexas montagens, navegação "fly-through" e ferramentas de comunicação; (8) Realização de análises de secção, medição e comparação de geometrias 3D; (9) Análise de operações de montagem e desmontagem para validação.</p>	<p>Estrutura do produto, Modelo CAD 3D dos componentes e sub-sistemas</p>	<p>Feedback de problemas com interferências entre peças</p>	<p>* VisFly e VisMockup (Engineering Animation Inc.) * ENOVIA - DMU Navigator (Dassault Systemes)</p>
<p><b>Sistema de Simulação Ergonômica do Produto</b></p>	<p>Ferramenta que permite a inserção de modelos humanos para análise ergonômica do produto e avaliação dos atributos físicos e comportamentais do homem quanto ao produto.</p>	<p>(1) Análise de posição e conforto do usuário na utilização do produto; (2) Análise da visibilidade (campo de visão do usuário quando opera um equipamento ou veículo); (3) Análise de alcance de controles, pedais, botões para a operação do produto; (4) Análise da interação do usuário com o produto; (5) Análise da força / esforço para operar o produto; (6) Análise das tarefas de manutenção do produto; (7) Simulação cinemática de mecanismos complexos; (8) modelos humanos baseados em medidas de dimensões corporais de base de dados antropométricas (ANSUR 88, NHANES, CAESAR); (9) Capacidade de animação; (10) Suporte à dispositivos de realidade virtual</p>	<p>Mock-ups digitais</p>	<p>Modelo de produto ergonômico (feedback para sistema CAD)</p>	<p>Jack (UGS)</p>

<b>Sistema de Simulação do Comportamento Mecânico Dinâmico</b>	Ferramenta de modelagem, simulação, análise e visualização do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos.	(1) Importação de modelos CAD; (2) Possibilidade da criação de modelos usando uma variedade de objetos de movimentos como juntas, molas, forças, torques, etc; (3) Modelagem de movimentos de corpo livre; (4) Modelagem de contatos entre corpos; (5) Checar interferências; (6) Visualização gráfica e animação 3D do modelo; (7) Geração de filmes MPEG e planilhas; (8) Criação e avaliação rápida de diferentes cenários para testar e refinar o sistema até alcançar um nível de desempenho ótimo; (9) Análise de forças / torques, velocidades e aceleração considerando inércia. (10) Delineamento do traço da sequência de movimentação; (11) Simulação do comportamento dos sistemas mecânicos.	Modelo CAD 3D dos sub-sistemas e sistemas	Feedback para atualização do modelo CAD 3D	* ADAMS (MSC Software Corporation)
<b>Sistema de Simulação do Comportamento Mecânico Estático</b>	Ferramenta de simulação e análise de problemas no comportamento estático de sistemas mecânicos tais como estruturais, térmicos, campo elétrico e magnético, fluxo de fluido e problemas combinados.	(1) Possibilidade de importação do modelo CAD 3D; (2) Capacidade para modificar e reparar dados CAD; (3) Geração ou importação de malha existente; (4) Definição dos parâmetros de análise; (5) Realização de análises estruturais (stress, resposta à cargas, deformação, etc), térmica (gradientes de temperatura, heat transfer e fluxo térmico), campo magnético, campo elétrico, análise de fluido (características do fluxo de um fluido), e análises combinadas; (6) Visualização dos resultados; (7) Otimização da malha.	Modelo CAD 3D dos componentes e sub-sistemas	Feedback para atualização do Modelo CAD 3D	* ANSYS (Ansys Inc.) * ABAQUS Standard (ABAQUS)
<b>Sistema de Simulação de Tolerância</b>	Ferramenta para análise da tolerância de encaixe das submontagens para a montagem de componentes e propósitos de manufatura.	(1) Análise das tolerâncias mínimas e máximas; (2) Assistência dinâmica para checar cumprimentos padrões; (3) Verificação de processos de montagem responsáveis por variações; (4) Uso de informações do modelos 3D e ajuste de valores máximo e mínimo para realizar análises que estimam a variação total, identifica contribuintes para a variação e fornece verificação das tolerância dimensionais especificadas; (5) Apresentação visual das variações das partes; (6) Visualização do movimento das partes à suas posições finais na montagem; (7) Visualização das folgas e interferências; (8) Apresentação de resultados na forma gráfica e em tabelas.	Modelo CAD 3D dos componentes e sistemas	Feedback para atualização do modelo CAD 3D	* 3DCS Designer/Analyst (CATIA - Dassault Systemes) * I-DEAS VSA 3D (SDRC)

<b>Sistema de Prototipagem Rápida</b>	Sistema que possibilita a produção de artefatos físicos diretamente do modelo CAD.	(1) Pré- processa o modelo STL, ajustando o seu tamanho, localização e orientação; (2) "Fatia" o modelo em finas camadas; (3) Monta uma camada sob a outra.	Modelo Conceitual; Modelo CAD 3D	Protótipo físico (feedback para o projeto)	
<b>Sistema de Desenvolvimento de Aplicações de Realidade Virtual</b>	Ferramenta para o desenvolvimento de aplicativos 3D interativos para visualização, interação, colaboração e simulação do produto e processos produtivos.	(1) Capacidade para modelar objetos geométricos ou importar geometria existente em outros sistema de modelagem; (2) Capacidade de adicionar comportamento aos modelos; (3) Configuração da cena para definição de influencias de forças nos objetos; (4) Possibilidade de adicionar nas simulações efeitos especiais como chuva, ondas, explosões e iluminação em tempo real; (5) Oferece biblioteca de protótipos: objetos inteiros, texturas ou segmentos completos de simulações com atributos e comportamentos podem ser armazenados e facilmente reutilizados em simulações subsequentes; (6) Detecção de colisão; (7) Renderização em tempo real.	Modelo Conceitual; Modelo CAD 3D; Modelos de Máquinas, robô, ferramentas.	Feedback para atualização do projeto	* EON Studio (EON Reality) * WorldUp (Sense8)
<b>Sistema de Planejamento de Processos</b>	Ferramenta para elaboração de planos de processo macro e detalhados tanto para processos de fabricação quanto montagem. Descreve os processos que serão usados para fabricação e montagem do produto usando os recursos disponíveis.	(1) Definir necessidades geométricas (requisitos baseados no projeto do produto / arquivo CAD 3D) e não geométricas (consumo do material que não é detalhado no projeto do produto); (2) Criar lista de material de manufatura (MBOM); (3) Planejar ponto de uso; (4) Definir sequência primária de operações; (5) Definir máquinas e estações para fabricação e montagem; (6) Definir configurações de máquinas e estações; (7) Definir lista de materiais processados; (8) Determinar sub-montagens; (9) Definir sequência relativa de operações; (10) Definir tempo de ciclo das operações; (11) Determinar custos estimados de manufatura e compra; (12) Incluir instruções textuais e gráficas; (13) Emitir planos de processo; (14) Eborar instruções detalhadas para processos.	Modelo CAD 3D (tolerâncias, features, topologia, dimensões, material e condições de superfície), normas técnicas, restrições de máquinas	Planos de processos de fabricação e montagem, sequência de operações, máquinas e estações de trabalho selecionadas, instruções de trabalho	* HMS-CAPP (HMS Software)

<p><b>Sistema de Gerenciamento de Recursos</b></p>	<p>Ferramenta de gerenciamento de recursos como máquinas de controle numérico e de manuseio manual, equipamentos, ferramentas, dispositivos de suporte, calibradores, células de fabricação e montagem, e espaço no chão de fábrica.</p>	<p>(1) Avaliação dos recursos de chão de fábrica visando atender às necessidades dos planos de processo; (2) Gerenciamento e seleção de ferramentas e calibradores; (3) Solicitação de serviços de projeto; (4) Emissão de ordens de serviços para realização das atividades no chão de fábrica não especificadas no plano de processo; (5) Definição das localizações de ferramentas e calibradores no chão de fábrica; (6) Comunicação com o sistema de controle de chão de fábrica; (7) Visualização de ferramentas e dispositivos.</p>	<p>Modelo CAD 3D, Plano de Processo, Projeto da peça bruta, Dados do ferramental</p>	<p>Especificações das ferramentas e calibradores; Localização no chão de fábrica; Ferramentas e calibradores que serão comprados.</p>	<p>* Resource Manager (UGS) * Walter TDM (CGTech)</p>
<p><b>Sistemas de Programação de CN</b></p>	<p>Ferramenta para o desenvolvimento de programas para máquinas de CN, Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) e robôs.</p>	<p>(1) Geração de programas para máquinas de CN, máquinas MMC e robôs; (2) Reconhecimento de features e hierarquia da parte; (3) Seleção de um conjunto de ferramentas e operações de biblioteca de conhecimento; (4) Cálculo do tempo de ciclo de operação; (5) Geração do caminho da ferramenta de CN; (6) Visualização do equipamento / máquina enquanto programa é criado; (7) Checar interferência / colisões e eliminar erros; (8) Permitir o carregamento de recursos de equipamentos e ferramentais de um catálogo; (9) Definir o material a ser removido; (10) Capacidade de acessar informações de dimensões e tolerâncias geométricas importadas com o modelo CAD; (11) Documentação de informações sobre nome da parte, data e nome do arquivo do programa; (12) Definição da geometria da peça bruta; (13) Definição das operações de processamento.</p>	<p>Modelo CAD 3D, Plano de Processo</p>	<p>Programas de máquinas de CN, Programas de MMC, Programas de robô.</p>	<p>* UG CAM (UGS) * Expert Machinist (PTC)</p>

<b>Sistema de Simulação de Máquinas CN</b>	Ferramenta para simulação, validação e otimização de processos de máquina de CN como um todo. Verifica se o código de CN pós processado irá produzir a parte projetada em uma máquina específica usando recursos projetados.	(1) Simulação, visualização e interação com o processo de máquina; (2) Simulação do processo de remoção de material; (3) Simulação do movimento da ferramenta de máquina e do controlador CN na célula de trabalho; (4) Identificação de erros nos programas CN; (5) Detecção automática de colisões de ferramentas, interferências entre peças e condições inadequadas de processamento; (6) Otimização do tempo de ciclo; (7) Simulação de características comportamental, cinemática, dinâmica e mecânica do modelo, seus componentes e subsistemas; (8) Definição de limites para os eixos ao longo da trajetória, velocidade e aceleração máxima; (9) Validação de novos ou modificados pós processadores; (10) Verificação da taxa de utilização da ferramenta; (11) Verificação da profundidade do corte.	Modelo CAD 3D; Fatores ergonômicos das tarefas humanas; Modelo da máquina CN; Programa CN, Recursos de processamento	Programa CN validado; Tempo de ciclo global de máquina; dimensões da célula de máquina	* Virtual NC (Delmia) * Vericut (CGTech) * eM-RealNC (Tecnomatix)
<b>Sistema de Simulação do Caminho da Ferramenta de Máquina</b>	Ferramenta para simulação 3D e análise da funcionalidade da ferramenta de máquina, controlador CNC e processo de remoção de material para o planejamento detalhado das operações da ferramenta, suas interações com o componente e programação das máquinas CNC.	(1) Execução do programa de CN em uma ferramenta de máquina virtual simulando cada movimento precisamente; (2) Visualização e otimização do caminho da ferramenta e da frequência de troca de ferramenta; (3) Detectar e corrigir interferências nos caminhos da ferramenta; (4) Detecção de colisões; (5) Verificação de erros no caminho da ferramenta; (6) Verificação da remoção de materiais; (7) Cálculo detalhado do tempo de ciclo; (8) Modificação do caminho da ferramenta para evitar colisões; (9) Validação dos processos durante o detalhamento.	Modelos CAD 3D; Modelo ferramenta.	Programa CN validado; tempo de ciclo detalhado de máquina	* Virtual NC (Delmia)



<b>Sistema de Simulação de Robôs</b>	Ferramenta de simulação 3D para projetar, analisar e programar off-line células robóticas (pintura, soldagem, usinagem e montagem).	(1) Simulação e visualização dos movimentos do robô em 3D; (2) Detecção de colisões em off-line, interferências e acesso; (3) Checar e otimizar dispositivos de fixação; (4) Análise e otimização dos tempos de ciclo; (5) Geração automática do caminho do robô; (6) Programação off line de robô; (7) Avaliação e otimização dos programas; (8) Download do programa usando pós processadores; (9) Otimização da geometria de entrada para preparar modelos de simulação; (10) Aplicação de cinemáticas aos modelos geométricos; (11) Atribuição de propriedades dinâmicas e capacidade de análises dinâmicas; (12) Tradução / Importação de dados de sistemas CAD; (13) Suporta equipamentos de realidade virtual.	Modelo CAD 3D, Plano do Processo, Fatores ergonômicos das tarefas, Modelo robô e ferramentas.	Tempo de ciclo do processo, dimensões da célula robótica, programa validado	* IGRIP (Delmia) * eM-Workplace (Tecnomatix)
<b>Sistema de Simulação de MMC</b>	Ferramenta para simulação 3D e otimização de programas de medição de partes e montagens de máquinas MMC	(1) Desenvolvimento de planos de inspeção que descrevem atividades que devem ser realizadas em máquinas MMC; (2) Simulação do processo de inspeção / medição; (3) Detecção de colisões, interferências e distâncias; (4) Definição de características de inspeção associadas ao desenho e tolerâncias.	Modelo CAD 3D, Plano de Processo, Fatores ergonômicos das tarefas, Modelo máquina, ferramenta e dispositivos.	Programa validado, tempo de ciclo do processo.	* CMM Inspection (Delmia) * eM-Probe (Tecnomatix)

<p><b>Sistema de Simulação das Operações Humanas</b></p>	<p>Simulação dos movimentos humanos, análise das tarefas e avaliação das estações de trabalho para as operações de manufatura.</p>	<p>(1) Simulação dos movimentos de um ou mais operadores na realização das tarefas; (2) Análise do conteúdo do trabalho em termos de ergonomia; (3) Avaliação de níveis de cansaço, esforços para braços e costas, postura e consumo de energia; (4) Checar colisões com outros operadores ou objetos no ambiente; (5) Definição e verificação do uso, posicionamento e acesso à ferramentas e equipamentos; (6) Análise da amplitude do movimento / mobilidade, alcance, folga, habilidade de levantamento e campo de visão; (7) Análise de força / esforço requerido para a realização das tarefas; (8) Otimização de tempos de ciclo; (9) Rotinas para gerar ações como caminhar, subir, levantar e carregar; (10) Análise da segurança na realização das tarefas; (11) Modelos humanos baseados em medidas de dimensões corporais antropométricas; (12) Capacidade de animação; (13) Suporte à dispositivos de realidade virtual.</p>	<p>Modelos CAD 3D, Instruções de trabalho das operações manuais, Layout das células de trabalho</p>	<p>Fatores ergonômicos das tarefas; dimensões das estações de trabalho; tempo de ciclo; habilidades requeridas.</p>	<p>* Envision / Ergo (Delmia); * Jack (UGS) * eM-Human (Tecnomatix)</p>
<p><b>Sistema de Projeto de Layout</b></p>	<p>Ferramenta para criação e simulação do layout de fábrica, permitindo análise espacial das instalações de manufatura e avaliação de interferências entre objetos de manufatura. Trata especialmente da organização espacial e dos componentes da planta, permitindo a criação rápida do layout.</p>	<p>(1) Criação de modelos 2D e 3D do layout das instalações de fábrica; (2) Análise das dimensões das células de trabalho; (3) Permite reservar espaços, analisar alocações de áreas e otimizar layouts 3D de plantas e equipamentos; (4) Identificação e resolução de problemas e falhas de projeto; (5) Detecção de espaço livre; (6) Definição de fatores de desempenho de equipamentos e recursos; (7) Visualização dos objetos em 2D e 3D; (8) Geração de relatórios de listas de materiais (BOM) de equipamentos; (9) Importação de objetos 3D de outras ferramentas de projeto; (10) Criação de modelos próprios de objetos específicos; (11) Verificação do impacto de mudanças no sistema de manufatura.</p>	<p>Dimensões das estações de trabalho, Dimensões das células robóticas, Dimensões das áreas de montagem, Dimensões das células de máquina</p>	<p>Layout de fábrica</p>	<p>* FactoryCAD (UGS)</p>

<b>Sistema de Simulação de Eventos Discretos</b>	Ferramenta gráfica de simulação 3D de eventos discretos para modelar e analisar sistemas de manufatura. Avaliações "e se", experimentos e análises de layouts para determinar layout ótimo, custo e fluxo de processo para sistemas.	(1) Visualização, animação e simulação 3D do sistema de fábrica; (2) Modelagem e análise dos sistemas de manufatura; (3) Análise da necessidade e quantidade de equipamentos ou pessoal; (4) Avaliação dos procedimentos operacionais; (5) Construção e exame de um modelo para avaliação de desempenho do sistema; (6) Verificação do layout de fábrica, fluxo de processo, sistemas de manuseio de materiais, planejamento da capacidade, uso de mão de obra, investimento em novos equipamentos e programação de produção; (7) identificação de gargalos de produção; (8) Condução de avaliações "e se"; (9) Análise de recursos de produção e de movimentação de materiais; (10) modelagem de equipamentos de manuseio complexo de material e manufatura, provendo animações em escala real 3D enquanto o modelo está sendo executado.	Layout da fábrica; tempos de ciclo (global, detalhado e combinado de máquina, do processo robótico, da montagem); movimento de máquinas, robôs.	Volume de produção; níveis de inventário; níveis de operadores; fluxo de materiais, utilização de equipamentos e recursos	* AutoMod (Autosimulations) * Arena (Rockwell) * Quest (Delmia) * Witness
<b>Sistema de Mock-up Digital da Fábrica</b>	Ferramenta para visualização, análise e comunicação do projeto de fábrica.	(1) Visualização, rotação e apresentação de modelos 3D de fábrica; (2) Permite fly through, walk through e navegar pela fábrica 3D; (3) Integração de dados de produto, ferramental e layout em um único modelo de fábrica; (4) Criação de animações 3D detalhadas; (5) Identificação de problemas de clearance; (6) Possibilita identificar e solucionar problemas de projeto antes da construção da fábrica; (7) Permite visualizar como ferramentas, equipamentos, layout e instalações se encontram na fábrica; (8) Criação de scripts dos movimentos para simular o produto ou equipamento, esteira, etc. (9) Detecção de colisões entre as partes que se movem pelo modelo da fábrica.	Layout de fábrica; Modelo do produto; Modelo de ferramentas e equipamentos	Layout completo da fábrica contendo produto, ferramentas, etc	* Factory Mockup (UGS)