



## MANUFATURA VIRTUAL: CONCEITUAÇÃO E DESAFIOS

**Arthur José Vieira Porto**

**Mariella Consoni Florenzano Souza**

Departamento de Engenharia Mecânica – SEM,  
Escola de Engenharia de São Carlos – USP,  
Av. Trabalhador Sancarlenense, 400,  
CEP 13566-590, São Carlos, SP,  
e-mails: ajvporto@sc.usp.br e mariella@sc.usp.br

**Carlos Alberto Ravelli**

Caterpillar do Brasil Ltda.,  
Rod. Luiz de Queiroz, km 157, Unileste,  
CEP 13420-900, Piracicaba, SP,  
e-mail: ravelli\_carlos\_a@cat.com

**Antonio Batocchio**

Faculdade de Engenharia Mecânica,  
Unicamp, R. Mendeleiev, s/n,  
Cidade Universitária “Zeferino Vaz”,  
CEP 13083-970, Campinas, SP,  
e-mail: batocchi@fem.unicamp.br

### **Resumo**

*A Manufatura Virtual é uma nova proposta que está sendo utilizada por algumas empresas para revolucionar seus processos, visando introduzir no mercado produtos superiores, mais rapidamente e a um menor custo. A estratégia é criar um ambiente integrado, composto de diversos sistemas e ferramentas de software, com a finalidade de gerar um novo método de desenvolvimento de produto. Este artigo tem por objetivo apresentar o conceito de Manufatura Virtual, bem como os paradigmas envolvidos em sua definição, as aplicações potenciais e os benefícios esperados. Apresenta também os sistemas de suporte às atividades de Manufatura Virtual e uma análise dos desafios técnicos e socioculturais para sua implementação.*

**Palavras-chave:** *Manufatura Virtual, desenvolvimento de produto, simulação.*

### **1. Introdução**

O mercado atualmente é caracterizado por acirrada competição internacional, por produtos cada vez mais complexos e por grande dinâmica inovadora. Juntamente com os ciclos de inovação cada vez mais reduzidos, os ciclos de

vida dos produtos e o tempo para lançá-los no mercado são cada vez menores.

Considerando esse contexto, juntamente com o grande avanço tecnológico, cada vez mais as empresas estão buscando novas formas de alcançar vantagem competitiva e introduzir novos produtos no mercado mais rapidamente e a um

custo menor, como utilizando, por exemplo, o ambiente de Manufatura Virtual. A idéia é que esse novo ambiente proposto aborde todo o processo de desenvolvimento, simulação e fabricação do produto, possibilitando a execução dessas atividades no computador, ou seja, virtualmente, antes de realizá-las no mundo real, independentemente do grau de complexidade da forma e da estrutura de um produto.

A utilização dessas técnicas avançadas, mais especificamente da Manufatura Virtual, está sendo observada em algumas empresas, principalmente dos setores automotivo e aeroespacial, e o seu conceito tem-se desenvolvido em escopo, ganhado maior importância e aceitação internacional. Exemplos de empresas que vêm utilizando a Manufatura Virtual são: a Boeing, que desenvolveu o modelo 777 totalmente digital antes de fazê-lo fisicamente; a DaimlerChrysler, que produziu três veículos recentemente usando a Manufatura Virtual; e a John Deere, que também tem usado esse novo ambiente no desenvolvimento de seus produtos (WAVE, 2002).

Um maior interesse, por parte do mercado mundial, por essa nova proposta pode ser verificado, principalmente, devido a dois fatores: às melhorias no desempenho das tecnologias hardware e software requeridas, 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. E, quanto ao Brasil, pode-se afirmar que os conceitos da Manufatura Virtual se encontram em estágio inicial de utilização ou testes. Algumas empresas já estão reconhecendo o seu potencial, porém ainda não estão utilizando o ambiente integrado e completo proposto; o que se tem, na maioria dos casos, é a utilização de tecnologias e ferramentas individuais, específicas para cada área, e de forma isolada.

Portanto, o artigo tem por objetivo principal apresentar e divulgar os conceitos de Manufatura Virtual, visando despertar a iniciativa de pesquisas, principalmente no que se refere aos desafios para a sua implementação. Mais especificamente, o artigo apresenta a definição

de Manufatura Virtual dentro dos paradigmas “projeto, produção e controle”, abordando o relacionamento entre eles. Discute também como essa nova proposta pode ser aplicada e os benefícios esperados, como, por exemplo, a redução do tempo de ciclo e do custo de desenvolvimento de produto. Além disso, o artigo aborda os sistemas de suporte às atividades dentro do contexto da Manufatura Virtual, especialmente nas áreas de planejamento do processo, gerenciamento de recursos, programação de controle numérico (CN) e validações (simulação e realidade virtual). Outro objetivo não menos importante é apresentar uma análise dos principais desafios técnicos e socio-culturais existentes para a implementação efetiva da Manufatura Virtual.

## **2. Conceituação e paradigmas da Manufatura Virtual**

De acordo com Banerjee & Zetu (2001), o termo Manufatura Virtual passou a ser utilizado em meado dos anos 90, em parte como resultado da iniciativa do Departamento de Defesa dos EUA, pois a evolução do ambiente de defesa e as estratégias de aquisição propiciaram o desenvolvimento da capacidade de confirmar a manufaturabilidade e a possibilidade de novos sistemas de armas antes de comprometer recursos de produção. Até metade dessa década, os primeiros trabalhos nesse campo foram realizados por algumas organizações, principalmente as indústrias aeroespacial e automobilística, além de ser abordado como tema em alguns grupos de pesquisa acadêmica.

Para os autores, a Manufatura Virtual pode ser usada em uma grande variedade de contextos de sistemas de manufatura, e pode ser definida como a modelagem desses sistemas e de componentes com o uso efetivo de computadores, de dispositivos audiovisuais e sensores para simular ou projetar alternativas para um ambiente de manufatura visando, principalmente, prever problemas potenciais e ineficiência na funcionalidade e manufaturabilidade do produto antes que a manufatura real ocorra.

A Manufatura Virtual também pode 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*”, em que:

*Ambiente*: é o 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*: mistura do real com objetos, atividades e processo simulados.

*Exercido*: executar a simulação da manufatura utilizando o ambiente.

*Melhorar*: aumentar o valor, a precisão e a validade.

*Níveis*: do conceito do produto à sua disponibilização, do chão de fábrica à comitiva executiva, do equipamento de fábrica ao empreendimento, além da transformação de material à transformação de conhecimento.

*Controle*: prever os efeitos reais.

*Decisão*: entender o impacto da mudança (visualizar, organizar, identificar alternativas).

Desta forma, um projeto de Manufatura Virtual propõe: prover uma estratégia para a integração de vários processos de manufatura que produzem o Método Planejado e fornecer capacidade para “Manufaturar no Computador”, por intermédio de um ambiente tão poderoso de modelagem e simulação que a fabricação e a montagem de um produto, incluindo os processos de manufatura associados, podem ser simuladas em um computador. Essa capacidade considera todas as variáveis do ambiente de produção, dos processos de chão de fábrica às transações empresariais, ou seja, considera as interações dos processos de produção, planejamento do processo e da montagem, programação, logística das linhas da empresa e os processos associados, como contabilidade, compras e gerenciamento.

O escopo do projeto da Manufatura Virtual engloba três diferentes paradigmas, dentro dos quais ela é definida. São eles:

- **Manufatura Virtual orientada para o projeto**: fornece informações sobre a manufatura ao processo de desenvolvimento, permitindo a simulação de diversas 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 em uma meta específica da manufatura, como, por exemplo, 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 reais, permitindo a otimização durante o ciclo de produção existente.

A Figura 1 apresenta o ambiente da Manufatura Virtual proposto e a inter-relação entre seus paradigmas.

Em resumo, o paradigma **orientado para o projeto** fornece um ambiente para que os projetistas projetem os produtos e avaliem sua manufaturabilidade e viabilidade. Os resultados deste paradigma incluem basicamente: informações sobre a manufatura, modelo do produto e protótipos “soft”. Visando manter a competência da manufatura sem construir produtos reais, o paradigma **orientado para a produção** fornece ambiente para a geração de planos de processo e de produção, para o planejamento de recursos necessários e para a avaliação desses planos. Fornecendo capacidade para simular os sistemas produtivos existentes, o paradigma **orientado para o controle** oferece ambiente para a avaliação de projetos de produtos novos ou revisados em relação às atividades de chão de fábrica.

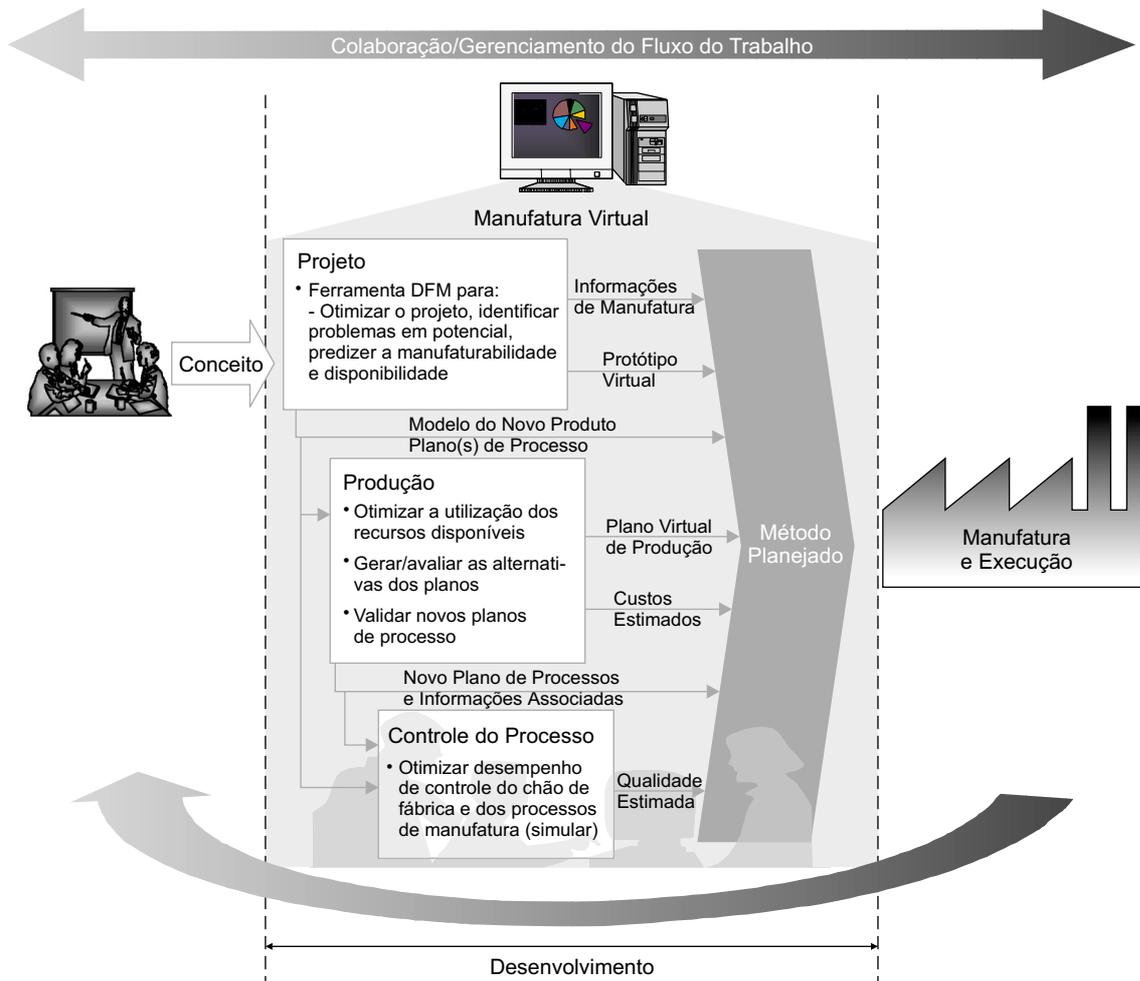


Figura 1 – Ambiente da Manufatura Virtual. Fonte: Porto & Palma (2000).

### 3. Aplicação potencial da Manufatura Virtual e seus benefícios

Existem diversas áreas nas quais a Manufatura Virtual pode ser aplicada. De acordo com Lee *et al.* (2001), as suas aplicações incluem principalmente a análise da manufaturabilidade de uma peça ou de um produto; a avaliação e validação das possibilidades dos planos de processos e de produção; e a otimização dos processos de produção e do desempenho do sistema de manufatura. Desde que a Manufatura Virtual utilize modelos baseados nas instalações reais da manufatura e dos processos, ela fornecerá não apenas informações reais sobre o

produto e seus processos de manufatura como também permitirá a avaliação e validação destes. Além disso, ela pode ser usada para prever os riscos do negócio, fornecendo suporte à administração na tomada de decisões e no gerenciamento da estratégia de uma empresa.

Dentre suas aplicações destacam-se:

- Avaliação da viabilidade de um projeto do produto, validação de um plano de produção e otimização do projeto do produto e dos processos, resultando na redução do custo no ciclo de vida do produto.
- Teste e validação da precisão dos projetos do produto e dos processos, envolvendo atividades como, por exemplo, analisar a

possibilidade do projeto do produto, realizar análise dinâmica das características, verificar a trajetória da ferramenta durante o processo de usinagem, validar programas de controle numérico, checar problemas de colisão na usinagem e na montagem, etc.

- Realização de treinamento por intermédio de um ambiente virtual e distribuído para os operadores, técnicos e gerência no uso das instalações de manufatura. Os custos de treinamento e produção podem, assim, ser reduzidos.

Diversos benefícios derivados da utilização da Manufatura Virtual podem ser citados. Segundo Lee *et al.* (2001), o principal benefício esperado é a *redução do tempo de ciclo e do custo de desenvolvimento de produto*. Quando novos sistemas ou produtos são desenvolvidos, os custos do ciclo de vida são determinados por diversas decisões tomadas nas primeiras etapas do ciclo de desenvolvimento (fase de definição do conceito). Corrigir erros encontrados nas etapas finais do processo de desenvolvimento, causados por decisões tomadas nas etapas iniciais, envolve mudanças no projeto que consomem tempo e custo. Mesmo que as mudanças necessárias sejam pequenas, o efeito de rede pode ser substancial (Committee, 1999).

Uma forma de reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento é desenvolver ambientes de Manufatura Virtual que permitam aos projetistas determinar rápida e precisamente como os projetos propostos afetarão o desempenho dos novos sistemas e produtos e como as mudanças afetarão as perspectivas de sucesso da missão. Este ambiente permitirá o desenvolvimento e a prototipagem de mais modelos baseados em computador nas etapas iniciais do processo de desenvolvimento do produto, reduzindo a necessidade de construir um grande número de protótipos físicos nas etapas posteriores do processo de desenvolvimento para validar modelos do produto e novos projetos. Assim, a empresa reduz seu tempo de desenvolvimento de produto, como, por exemplo, a Embraer que,

utilizando protótipos virtuais no desenvolvimento do ERJ 170, passa a completar seu processo de desenvolvimento em 38 meses, enquanto foram necessários 60 meses para desenvolver o modelo ERJ 145 (Embraer, 2002).

Além disso, a Manufatura Virtual complementa o processo de desenvolvimento integrado do produto e do processo, pois proporciona uma maneira de as informações da manufatura serem passadas às fases iniciais do desenvolvimento (Lin *et al.*, 1995). Em outras palavras, ela proporciona a introdução de um nível muito mais preciso e verificável de as informações da manufatura estarem disponíveis nas fases iniciais do processo de desenvolvimento, permitindo a expansão do “espaço de soluções” disponíveis na fase de projeto, pois tornará possível a verificação rápida de projetos. O objetivo é expandir o espaço de decisões, capacitando o projetista para a avaliação mais efetiva dos custos de diversos projetos via simulação de diversas alternativas de manufatura e criação de protótipos “*soft*” pela manufatura no computador. Segundo estimativas da montadora Ford, que já vem aplicando técnicas de Manufatura Virtual, os resultados esperados compreendem redução de 20% nas ocorrências de mudanças na manufatura durante o lançamento de novos produtos e redução nos custos de mais de US\$ 200 milhões anualmente (TMR, 1998).

A Manufatura Virtual pode proporcionar também a *inclusão do cliente e de seus requisitos no processo de desenvolvimento* e gerar, assim, melhor resposta às perguntas “e se” dos clientes sobre as mudanças nos prazos de entrega e orçamentos. Além disso, facilita a *integração funcional* dentro das empresas, promovendo o compartilhamento de informações e melhorando o relacionamento do trabalho interfuncional dentro do processo de desenvolvimento (Lawrence Associates Inc., 1994).

Outra contribuição importante é na *formação da Empresa Virtual*. Segundo Lin *et al.* (1995), a Empresa Virtual é uma rede multidisciplinar de pequenas empresas formada para alcançar oportunidades de desenvolver e produzir um produto específico. Os membros dessa empresa, para satisfazer uma necessidade de mercado,

podem compartilhar suas competências, ferramentas de software, dados e informações do produto com outros membros em um ambiente de Manufatura Virtual.

Com o uso desse ambiente virtual e colaborativo, os clientes podem participar do processo de desenvolvimento de produto e os engenheiros de projeto podem responder mais rapidamente às necessidades dos clientes e lhes fornecer uma solução ótima, reduzindo, dessa forma, o tempo de ciclo e os custos de desenvolvimento. E, conseqüentemente, a vantagem competitiva de uma empresa no mercado pode ser melhorada.

Como ilustração, pode-se citar o caso da Boeing, que também utilizou a Manufatura Virtual para o desenvolvimento do modelo 737. Nesse processo, a empresa desenvolveu o protótipo virtual, incorporando as leis físicas e da ciência dos materiais, e avaliou esse modelo por meio da simulação no túnel de vento virtual. Como resultado, os engenheiros puderam testar uma quantidade muito maior de protótipos, a um custo menor e com maior velocidade. Além disso, na medida em que a empresa moveu suas atividades de desenvolvimento do mundo real para o virtual, ela passou a envolver os clientes no desenvolvimento da aeronave, compartilhando informações por intermédio da simulação via computador (Balceiro & Cavalcanti, 1999).

Porém, para que o desenvolvimento desse ambiente seja possível, algumas características e funcionalidades são requeridas dos sistemas a serem utilizados. A seguir, são apresentados os principais sistemas de suporte às atividades, dentro do contexto da Manufatura Virtual.

#### **4. Sistemas de suporte às principais atividades na Manufatura Virtual**

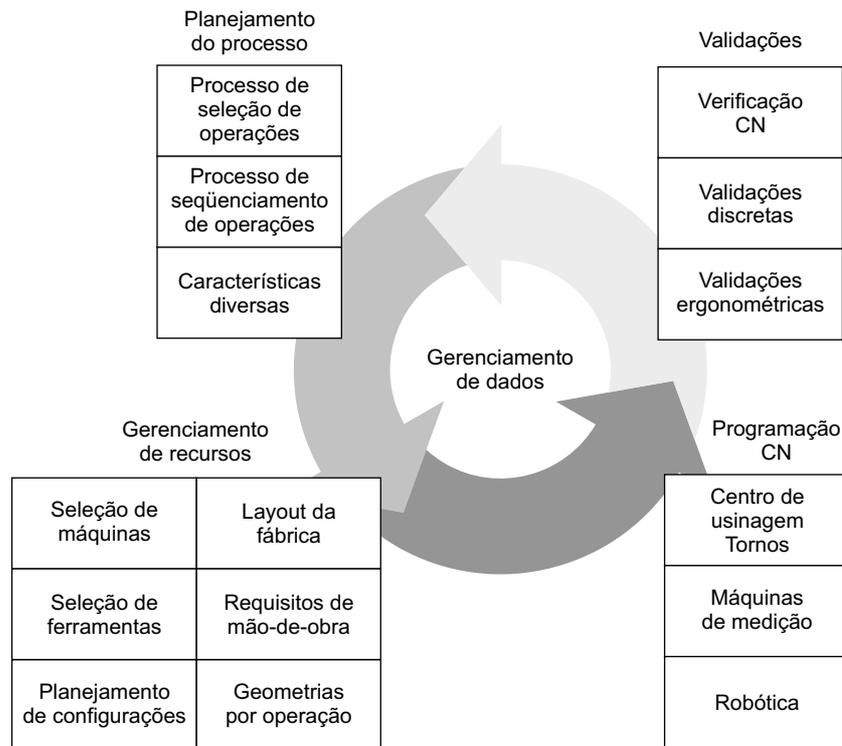
O ambiente de Manufatura Virtual compreende: a utilização de sistemas para a elabora-

ção dos planos de processos macro e detalhado, tanto de processos de fabricação como de montagem, todas as atividades de identificação de recursos de máquinas, ferramentas e dispositivos, a programação de controle numérico de máquinas de usinagem, robôs, máquinas de medição, simulação e realidade virtual.

Busca-se, segundo Porto & Palma (2000), a integração de dados e sistemas e a padronização de ferramentas e programas. Não há um único produto que domine o mercado da família de softwares que compõem este novo ambiente, e como os pacotes variam consideravelmente em muitos aspectos – custo, funcionalidade, flexibilidade, facilidade de uso e plataforma –, a seleção das ferramentas deverá ser direcionada para aquelas que permitam:

- melhorar a tecnologia para obter recursos;
- associatividade gerenciável;
- reduzir a recriação de geometria, em que os projetos de produtos, máquinas, ferramentas e outras entidades são baseados em modelagem sólida;
- eliminar desenhos em papel;
- trabalho em paralelo, ou seja, simultâneo;
- integrar ferramentas de software de ERP (*Enterprise Resources Planning*);
- acesso de fornecedores usando o Portal Web;
- usar modelos em fase de desenvolvimento (trabalho em processo);
- fluxo de trabalho integrado com sistemas de gerenciamento de projeto.

Pode-se afirmar que existem soluções isoladas ou parciais para cada uma das tarefas relacionadas ao ambiente de Manufatura Virtual. A seguir, são apresentadas características funcionais básicas desejadas desses sistemas para cada um dos principais grupos de tarefas, listados na Figura 2.



**Figura 2 – Principais atividades a serem cobertas pelos sistemas no ambiente de Manufatura Virtual.**

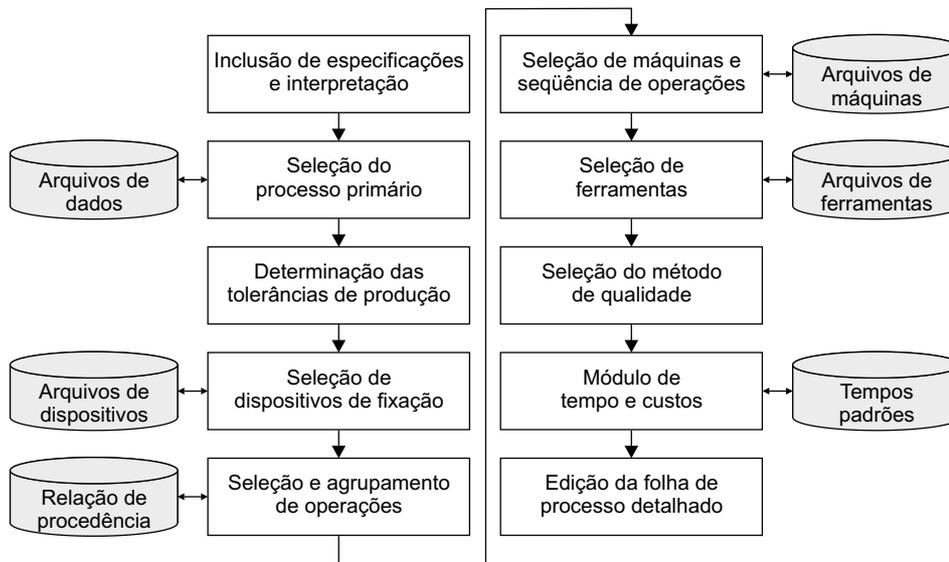
#### 4.1 Planejamento do Processo

O sistema de Planejamento do Processo é a aplicação central que permite aos engenheiros de manufatura elaborarem o processo completo de manufatura e identificarem os elementos que definem os produtos. Um modelo genérico de dados do processo de manufatura é um componente essencial de tal aplicação. O modelo de dados deve dar suporte ao planejamento macro e detalhado dos processos. Um ambiente integrado de manufatura engloba dados do processo que descrevem como os produtos são fabricados usando os recursos disponíveis. Isto impõe que o modelo de dados proposto habilite a colaboração de dados do produto, dados do processo e dados dos recursos. A Figura 3 mostra as atividades básicas envolvidas no desenvolvimento do Planejamento do Processo.

O sistema para o desenvolvimento do Plano de Processo, integrado a outras aplicações específicas, deve permitir ao usuário elaborar as instruções detalhadas de trabalho para um processo de operação específico, como, por exemplo, tratamento térmico, solda por robô e usinagem.

As principais funcionalidades que os softwares devem proporcionar são:

- Definir necessidades geométricas – habilidade de definir requisitos baseados no projeto do produto (arquivo CAD) – e necessidades não geométricas – habilidade de definir o consumo do material que não é detalhado no projeto do produto.
- Criar listagem de material de manufatura (MBOM) e informações associadas, como listagem das estações de consumo e datas de efetivação.



**Figura 3 – Atividades básicas do Planejamento do Processo. Fonte: Halevi & Weill (1995).**

- Planejar o ponto de uso (como componentes comprados devem ser entregues ou armazenados).
- Definir roteiro primário (seqüência primária de operações a serem realizadas).
- Definir máquinas e estações para fabricação/montagem e suas configurações (*setups*).
- Definir listagem de material processado (componentes consumidos em uma operação).
- Determinar submontagens para melhorar o processo de manufatura.
- Definir seqüência relativa de operações, tempo de ciclo de cada operação e instruções textuais e gráficas.
- Emitir o Método Planejado.
- Elaborar instruções detalhadas de primeiras operações (corte e dobra de chapas), soldagem, pintura, tratamento térmico.
- Aplicar tempos-padrão.

Um exemplo de aplicação é mostrado na Figura 4, em que as principais funcionalidades anteriormente apresentadas, incluindo imagens em diferentes formatos, descrição detalhada da operação a ser executada, dados do local de execução da operação, tempos-padrão e de *setup*, podem ser observadas. Diversas ferra-

mentas para o planejamento do processo podem ser encontradas no mercado, como, por exemplo, o *eM-Planner* da Tecnomatix e o *E-Factory Process Planner* da UGS/EDS.

## 4.2 Gerenciamento de recursos

Neste contexto, recursos incluem máquinas de controle numérico, máquinas de manuseio manual, espaço no chão de fábrica, células de fabricação e montagem, equipamentos especiais, dispositivos de suporte e requisitos de mão-de-obra (especialização do trabalho e carga de trabalho).

As principais funcionalidades requeridas desses sistemas são:

- Avaliar recursos de chão de fábrica para determinar se são suficientes para atender às necessidades do Método Planejado.
- Elaborar o *layout* da fábrica.
- Gerenciar ferramentas e calibradores.
- Selecionar ferramentas e calibradores similares e existentes: verificar a existência de ferramentas e calibradores; pesquisar a disponibilidade nos almoxarifados; usar referências do modelo geométrico e requisitos da manufatura.

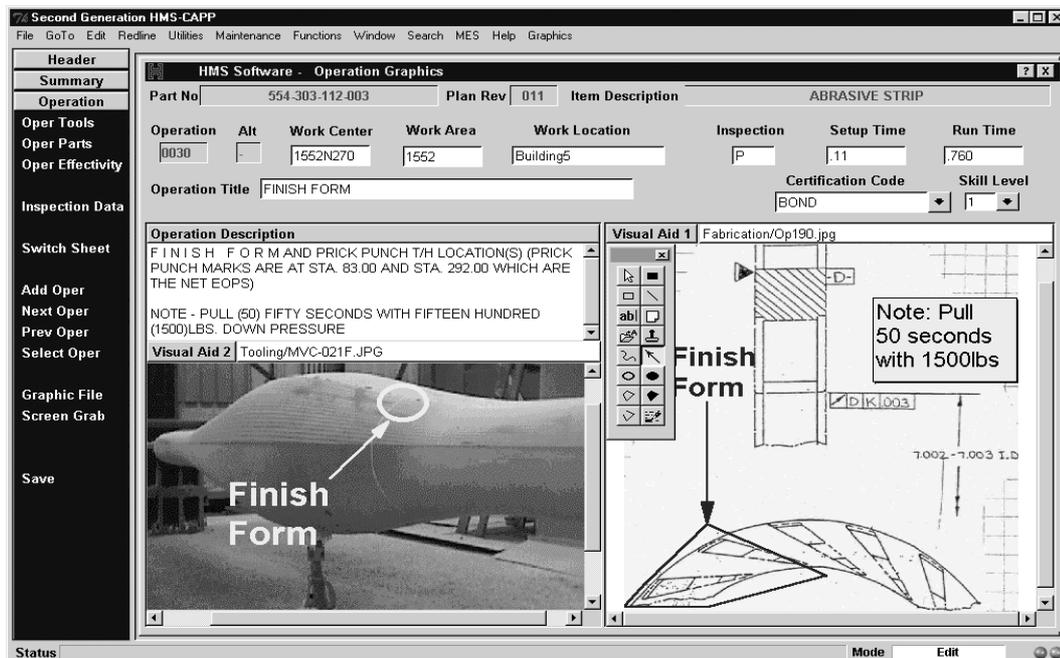


Figura 4 – Exemplo de um sistema de Planejamento do Processo. Fonte: HMS (2000).

- Projetar ferramentas e calibradores.
- Solicitar serviços de projetos de ferramentas e calibradores.
- Escrever ordens de serviços para a execução de atividades no chão de fábrica não especificadas no Método Planejado.
- Definir localizações de ferramentas e calibradores no chão de fábrica.
- Realizar a comunicação com o sistema de controle de chão de fábrica (MES – *Manufacturing Execution System*).

Um exemplo de software nessa área é o *E-Factory Resource Manager* da UGS/EDS, que provê um mecanismo integrado para classificar e armazenar informações de recursos de manufatura, incluindo ferramental, dispositivos, calibradores, máquinas e equipamentos.

### 4.3 Programação de controle numérico

De maneira geral, os programas de controle numérico devem ser criados e simulados em um

ambiente virtual 3D, usando modelos visuais para eliminar colisões da ferramenta ou ponta de prova, assim como problemas de programação que podem estar presentes, antes de executá-los fisicamente no equipamento. As funcionalidades de programação de controle numérico relacionadas neste item englobam aplicativos nas seguintes áreas:

- Programação de centros de usinagem.
- Programação de robôs (solda, pintura, montagem, corte).
- Programação de máquinas de medição por coordenadas (MMC).

Como operações de manufatura demandam maior eficiência, os softwares CAM empregados para usinar ou medir devem apresentar ferramentas mais precisas para o corte ou medição de peças complexas. As novas tendências em software CAM são:

- Associatividade completa entre a geometria do modelo e os caminhos das ferramentas (programação CN) e ponta de prova.

- Usinagem ou medição baseada no conhecimento (captura técnicas de usinagem de um operador experiente ou de um programador de controle numérico).
- Conhecimento de *feature*, que permite ao sistema automaticamente reconhecer “*features*” da peça e configurar padrões de operação.
- Usinagem de alta velocidade, com realização de cortes pequenos e leves em vez de grandes e pesados.
- Capacidade de usinagem e medição de modelos sólidos.

Essas novas tendências requerem o uso de modelos sólidos ou superfícies de precisão. O uso dessas novas tendências em CAM, em conjunto com a simulação de processos, pode reduzir drasticamente o tempo de programação e a correção de erros.

#### 4.4 Validações

Validações de processos e sistemas de manufatura, de programação CN, de ergonomia e de eventos discretos podem ser realizadas com a aplicação de softwares de simulação e realidade virtual.

##### 4.4.1 Simulação

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

De acordo com Jain (1999), a simulação se tornará a forma de fazer negócios no futuro, na qual todas as decisões serão avaliadas usando essa tecnologia em todos os aspectos das operações. O uso da simulação não tem se limitado às aplicações tradicionais na manufatura e logística, e cada vez mais engloba processos de negócios, aplicações

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

Os sistemas de simulação para suporte às atividades de Manufatura Virtual podem ser distribuídos em quatro grandes grupos:

- Simulação de sistemas de manufatura.
- Simulação de processos de manufatura.
- Simulação de sistemas mecânicos.
- Simulação de elementos finitos.

Os softwares de simulação de sistemas de manufatura incluem:

- *Processos de fabricação e de montagem*, os quais fornecem um método sistemático para o projeto de fábrica (criação, análise e apresentação visual do modelo), habilitando a engenharia simultânea de toda a fábrica. Pode-se citar, como exemplos, o *VisFactory* da UGS/EDS e o *DELMIA Process Enginer*.
- *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 do sistema e entender o impacto de possíveis mudanças. Exemplos de softwares nessa área são o *eM-Plant* da Tecnomatix, o *FactoryFlow* e o *FactoryCAD* da UGS/EDS e o *Factor/AIM* da Pristsker.
- *Eventos discretos*, que permitem modelar questões complexas de manuseio de material e manufatura, provendo animações em escala real 3D enquanto o modelo está sendo executado. Como exemplo de softwares pode-se citar o *AutoMod* da Autosimulations, o *Quest* da Delmia, o *Witness* da Lanner Group Ltda. e o *Arena* da Rockwell.

A simulação de processos de manufatura e de sistemas mecânicos engloba:

- *Programação de controle numérico*, que simula interativamente o processo de remoção de material e o caminho da ferramenta e detecta automaticamente colisões de ferramentas, interferências entre peças e condições de corte inadequadas. Alguns softwares disponíveis nessa área são o *Vericut* da CGTech, o *Virtual NC* da Delmia e o *NC Simul* da Spring.
- *Programação de robôs*, para o desenvolvimento, programação e otimização de aplicações em pintura, MMC, solda e células de manufatura, como, por exemplo, o *UltraArc* e o *UltraPaint* da Delmia, o *CimStation Robotics* e o *CimStation Inspection* da Silma.

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 Manufatura Virtual é que, para a grande maioria dos casos, diferentes tipos de ferramentas de simulação – simulação de eventos discretos, simulação de fluxo de material, simulação de células de trabalho – operam independentemente umas das outras.

#### 4.4.2 Realidade Virtual

A Realidade Virtual, por sua vez, também é uma tecnologia-chave no desenvolvimento do produto e no processo. A Realidade Virtual pode ser definida como “a habilidade em criar e interagir no espaço cibernético, isto é, um espaço que representa um ambiente muito similar ao ambiente em torno de nós” (Banerjee & Zetu, 2001).

De fato, a realidade virtual e a simulação podem ser utilizadas em diferentes áreas, incluindo a Manufatura Virtual, mas há diferenças entre elas. Ambas, simulação e realidade virtual, são ferramentas que podem ser usadas para análise e teste de materiais, treinamento de

pessoas e projeto e implementação de novas idéias e conceitos (NASA, 2001).

Uma distinção importante entre elas está na forma de operação da tecnologia. A realidade virtual frequentemente requer mais interação física da parte do usuário, enquanto a simulação é tipicamente mais passiva. A Realidade Virtual é um processo tátil, incorporando luvas, controle *joysticks*, telas em capacetes, óculos estéreo 3D e paredes e telas para projeção de vídeo. A simulação envolve software de visualização com gráficos de alta resolução, usando modelos CAD 3D que operam em estações gráficas de alto desempenho. Ambas podem ser usadas em conjunto por projetistas e engenheiros para criar praticamente qualquer tipo de mundo artificial. Nesses ambientes digitais, diversas situações do mundo real, variáveis e reações podem ser duplicadas.

A principal vantagem dessa tecnologia é o desenvolvimento e análise do projeto colaborativo, habilitando grupos de engenheiros a visualizar e manipular, em tempo real, um objeto virtual tão facilmente como seria com um objeto físico.

Para dar suporte à criação de ambientes virtuais, diversas ferramentas de software estão disponíveis no mercado, como *dVise*, *Superscape* e *World Toolkit*.

A Realidade Virtual tem sido usada por empresas como a General Motors e a Caterpillar para a construção de protótipos digitais de veículos, em vez de protótipos físicos, reduzindo significativamente o tempo de desenvolvimento de produto. A BMW usa a Realidade Virtual para explorar a visualização de novos *layouts* de veículos com o objetivo de melhorar a comunicação e a simulação dos processos. A Rolls Royce Aeroengines and Associates usa essa tecnologia para verificar antecipadamente os procedimentos de manutenção, treinar os engenheiros de manutenção em novos procedimentos e visualizar ambientes complexos (Peng *et al.*, 2000). A Embraer utiliza o Centro de Realidade Virtual no desenvolvimento de uma aeronave, o qual permite aos engenheiros visualizar, em três dimensões, por meio de modelos eletrônicos, toda a estrutura da aeronave em fase de projeto. A empresa usa o

*WorkWall* da Fakespace Systems, que é uma solução de visualização ideal para apresentações em grupo e projeto colaborativo. Quando usado com um software de modelagem 3D como o *CATIA* da Dassault Systems, e visualizado usando o *DMU Navigator* da Dassault Systems e *Division Reality* da PTC, o *WorkWall* torna mais fácil para as equipes multidisciplinares avaliarem *mock-ups* digitais e protótipos virtuais nas etapas iniciais do ciclo de projeto. Para os clientes, fornece fácil entendimento do *layout* do modelo e das opções de configuração, facilitando decisões de compra (Fakespace, 2002). Com o Centro de Realidade Virtual e o *CATIA*, pode-se detectar, corrigir e eliminar falhas eventuais e montagens incorretas antes que qualquer peça ou conjunto seja encaminhado para a produção. A prototipagem virtual e a visualização reduzem significativamente o tempo de lançamento de uma nova aeronave no mercado e o retrabalho durante o projeto, juntamente com a expansão das linhas de produto e da capacidade de produção.

## 5. Principais desafios na implementação da Manufatura Virtual

Embora o desenvolvimento da Manufatura Virtual possa ser considerado uma evolução de diversas tecnologias e do ambiente de negócios, existem diversos desafios técnicos e socioculturais que dificultam sua implementação, como:

- integração das ferramentas, sistemas e dados;
- gerenciamento das informações;
- gerenciamento da configuração;
- velocidade operacional do sistema;
- *know-how* em manufatura, modelagem e representação;
- capacidade de aprendizado e aquisição de conhecimentos;
- questões culturais, de gerenciamento, econômicas e de treinamento.

Um dos principais desafios técnicos para alcançar um ambiente ideal de Manufatura Virtual refere-se à necessidade de alcançar um elevado nível de *integração das ferramentas, sistemas e dados* presentes nesse ambiente, conforme apresentado na Seção 4.

Um processo de desenvolvimento de produto efetivo deve balancear diferentes fatores, como requisitos dos clientes, desempenho, custo, segurança, integração do sistema, manufaturabilidade, confiabilidade e manutenibilidade. Softwares relevantes para a Manufatura Virtual têm sido desenvolvidos como uma coleção de ferramentas individuais com pouca ou nenhuma ligação entre elas. A integração entre ferramentas de software é uma área de ativa pesquisa acadêmica, industrial e governamental, porém, soluções aplicáveis não estão totalmente disponíveis para uso operacional (Committee, 1999).

Os problemas de integração são causados por diversos fatores. Um deles diz respeito à incompatibilidade das ferramentas de software. A menos que a interoperabilidade tenha sido um objetivo específico do processo de desenvolvimento de software usado para criá-lo, para a maioria das empresas desenvolvedoras a interoperabilidade tem obtido pouca prioridade. Vendedores de softwares comerciais tendem a operar em segredo para proteger as informações, especialmente quando um novo produto está sendo desenvolvido. A incompatibilidade também ocorre, pois, na maioria das empresas, engenheiros e gerentes buscam no mercado a melhor solução para cada aplicação específica, ou, então, quando essas soluções não estão disponíveis comercialmente, são desenvolvidas *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 a eficiência de produtos e processos individuais encoraja a proliferação de novas ferramentas e, conseqüentemente, resulta na falta de interoperabilidade entre elas.

Essa falta de interoperabilidade inibe o uso de ferramentas tradicionais em ambientes de Manufatura Virtual, os quais, por natureza,

requerem alto grau de integração. Melhorar 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. Um estudo realizado recentemente por uma das principais montadoras do setor automotivo revelou que a falta de interoperabilidade tem custado para as empresas desse setor entre U\$ 200 milhões e U\$ 400 milhões por veículo desenvolvido. A falta de eficiência na troca de dados do produto com empresas da cadeia de fornecimento tem gerado custos de U\$ 1 bilhão por ano para a indústria (NIST, 1999).

O mesmo problema de integração se aplica aos sistemas hardware. Sistemas fornecidos por diferentes vendedores às vezes são incompatíveis, e softwares escritos para sistemas hardware de um vendedor podem ser incompatíveis com sistemas de outros vendedores.

Padrões têm sido usados em muitos campos para prevenir ou corrigir problemas de interoperabilidade associados com, por exemplo, interfaces de ferramentas, arquivos e terminologia e definições de dados. Alguns padrões são formalmente aprovados por aplicações industriais. Porém, para assegurar eficiência operacional de um ambiente de Manufatura Virtual, é necessário estabelecer um padrão de dados único ou, ainda, um software para a conversão de dados, facilitando, dessa forma, a troca de dados entre sistemas desse ambiente. De acordo com Lee *et al.* (2001), embora muitos padrões sejam desenvolvidos pela organização ISO, as empresas continuam usando padrões de dados e software diferentes, gerando problemas para utilização da Manufatura Virtual pela Internet.

Uma forma de criar um ambiente altamente integrado é pelo uso de arquiteturas abertas que permitam a inserção de novos elementos, usando interfaces projetadas de acordo com padrões predefinidos. Essa alternativa reduz o custo de implementação e treinamento, pois possibilita que sejam realizadas mudanças nas

capacidades dos sistemas com mínimo impacto 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 essa proposta em um ambiente de desenvolvimento de produto já existente.

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. Por exemplo, a DaimlerChrysler recomenda que os fornecedores de primeiro nível usem o mesmo software CAD/CAM (Committee, 1999).

Outro desafio é o *gerenciamento das informações*. Primeiramente, porque, com a Manufatura Virtual, novos projetos e processos são construídos, analisados e testados em um ambiente simulado. Conseqüentemente, há a geração de grande quantidade de informações, pois a coleta de dados de teste não é limitada a um produto ou processo físico. Segundo, porque a integração não só deve ocorrer entre diferentes e independentes bancos de dados para informação e conhecimento dentro da empresa como também entre bancos de dados de fornecedores, clientes e outras empresas. É necessário estabelecer uma base de dados completa para dar suporte à operação da Manufatura Virtual.

As tecnologias para gerenciamento de banco de dados têm alcançado sucesso substancial e as bases de conhecimento para tecnologias de manufatura estão se expandindo bastante. Porém, uma pequena porção desses recursos está sendo convertida para bases de dados de computador. A conversão bem-sucedida do *know-how* em manufatura para base de dados computacional demanda investimento e grande esforço humano. Além disso, trabalho adicional ainda é requerido para

atualizar as tecnologias de base de dados a fim de atender a demandas futuras.

Outro desafio associado ao desenvolvimento e uso de ambientes virtuais e distribuídos é o *gerenciamento da configuração*, ou seja, a tarefa de assegurar que todas as ordens de engenharia e mudanças de projeto sejam refletidas nas simulações e modelos usados para criar e avaliar novos projetos. O gerenciamento da configuração tem sido tradicionalmente usado para produtos, mas está se expandindo para incluir processos e recursos.

Segundo Lee *et al.* (2001), a *velocidade operacional do sistema* também pode constituir uma barreira à implantação da Manufatura Virtual. A utilização desse ambiente envolve grande quantidade de trabalho em computação matemática, processamento gráfico de imagens, troca de dados e comunicações remotas. Isso inclui a construção de modelos sólidos 3D, animação 3D, realidade virtual, planejamento de recursos de manufatura, processamento das características do produto, aquisição de *know-how* em manufatura, etc. Apesar do rápido avanço do poder computacional e das tecnologias de informação, ainda assim não são suficientes para satisfazer as necessidades de um ambiente de Manufatura Virtual.

Outro desafio refere-se ao *know-how em manufatura, modelagem e representação*. O rápido desenvolvimento da comunicação digital via rede e das ciências da computação forneceu ferramentas indispensáveis à aplicação da Manufatura Virtual. De qualquer forma, ela é desenvolvida com base em *know-how* humano e no entendimento dos processos de manufatura. Seu desenvolvimento depende muito do conhecimento presente e da capacidade de aplicar ferramentas matemáticas modernas para descrever e apresentar o conhecimento de maneira sistemática. Embora algumas pesquisas se concentrem em estudar teorias dos processos de manufatura, um grande número de problemas ainda não foi resolvido e continua dependendo do julgamento pela experiência.

Como já mencionado, um sistema de Manufatura Virtual absorve grande quantidade de informações. Isso demanda maior *capacidade de*

*aprendizado e aquisição de conhecimentos* das instalações reais da manufatura, facilitando monitorar o desempenho operacional das instalações, bem como prever e tomar decisões mais precisas. Há muitos estudos na aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial, como redes neurais e algoritmos genéricos no controle do processo. Recomenda-se que aplicações de Inteligência Artificial sejam consideradas pela Manufatura Virtual.

Além dos desafios técnicos, algumas dificuldades socioculturais para a implementação do ambiente da Manufatura Virtual podem ser destacadas. Diversas *questões culturais, de gerenciamento, econômicas e de treinamento*, que surgem quando tecnologias e métodos inovadores são usados, devem ser superadas. O desenvolvimento de um sistema de Manufatura Virtual demanda alto investimento de capital e esforço administrativo. Implementar novas tecnologias requer investimento em treinamento de 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 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 dessa ferramenta no alcance das metas. Mas essas métricas não estão disponíveis e precisam ser definidas.

Além disso, segundo Lee *et al.* (2001), a Manufatura Virtual, apesar de oferecer solução atrativa para a empresa melhorar sua eficiência e produtividade, ela não pode ser vista como uma solução para melhorar o estado atual da empresa de forma imediata; é uma solução que traz benefícios futuros.

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 produto para

tratar das sofisticadas análises e simulações presentes nesse novo ambiente. Suporte ativo de organizações de pesquisa, de empresas e do governo também se torna importante, pois para a implantação da Manufatura Virtual diversas empresas, setores de negócio e eras tecnológicas estão envolvidos. Além disso, dentro do mesmo setor de negócios, ainda há diferenças e, dessa forma, desenvolver um regulamento e um padrão unificado também é um problema social que precisa ser desenvolvido.

## 6. Considerações finais

Cada vez mais a vantagem competitiva das empresas depende da utilização de novas metodologias e de novos ambientes de desenvolvimento de produto, apoiados principalmente pela utilização de ferramentas e tecnologias computacionais.

O ambiente proposto pela Manufatura Virtual envolve grande quantidade de sistemas e ferramentas computacionais que devem agir de forma integrada, sendo necessário para tanto um conjunto de características e requisitos, tanto em nível tecnológico quanto funcional, ainda não totalmente encontrado nas soluções comercialmente disponíveis. Um dos principais desafios é desenvolver tecnologias novas e melhoradas e integrá-las efetivamente com tecnologias atualmente disponíveis para criar ambientes de Manufatura Virtual abrangentes e interoperáveis.

Além disso, a aplicação bem-sucedida de um ambiente de Manufatura Virtual requer um *know-how* multidisciplinar que envolve 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 ganhou

grande importância nos métodos convencionais, torna-se essencial para permitir que sejam simulados na Manufatura Virtual. Já a inclusão da Realidade Virtual nesse ambiente proporciona ao desenvolvimento de produto uma nova tecnologia de interface com o usuário, permitindo ao homem maior interação com o objeto simulado e possibilitando 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.

Os diversos exemplos de aplicação da Manufatura Virtual mostram que ela vem sendo empregada principalmente por grandes empresas internacionais, pois requer grande esforço para superar os desafios de integração e as mudanças culturais, bem como o alto investimento.

Apesar do crescente interesse por esse novo ambiente, por parte das empresas mundiais, no Brasil, a Manufatura Virtual ainda é pouco conhecida. O que se tem, na maioria dos casos, é a utilização de algumas tecnologias e ferramentas individuais e específicas para certas aplicações; dificilmente verifica-se o uso do ambiente integrado e completo proposto.

Mesmo sabendo dos desafios existentes 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 essas mudanças.

Agradecimentos à Fapesp.

## Referências Bibliográficas

BALCEIRO, R. B.; CAVALCANTI, M. C. B. *O desenvolvimento de produto no mundo virtual: o caso Boeing 737*. 1999. Disponível em: <<http://www.jsmnet.com/clippings/art028.htm>>. Acesso em: 6 jun. 2002.

BANERJEE, P.; ZETU, D. *Virtual manufacturing*. New York: John Wiley & Sons, 2001. 320p.

COMMITTEE on Advanced Engineering Environments. *Advanced Engineering Environments: Achieving the vision, Phase 1*. Washington, D. C.: National Academy Press, 1999. 58p.

- EMBRAER. *Centro de Realidade Virtual*. 2002. Disponível em: <<http://www.embraer.com.br/portugues/content/empresa/tecnologia/default.asp>>. Acesso em: 10 jul. 2002.
- FAKESPACE Systems. *Manufacturing Case Study*. 2002. Disponível em: <<http://www.fakespace.com/pdfs/EmbraerCStudy.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2002.
- HALEVI, G.; WEILL, R. D. *Principles of process planning: a logical approach*. London: Chapman & Hall, 1995. 349p.
- HMS Software Inc. HMS-CAPP second generation. *Manufacturing management information systems*, 2000. Disponível em: <<http://www.hmssoftware.com>>. Acesso em: 10 jun. 2000.
- JAIN, S. Simulation in the next millennium. In: Winter Simulation Conference. *Proceedings...* 1999.
- LAWRENCE ASSOCIATES INC. *Virtual manufacturing user workshop*. Technical report, Ohio, Jul. 1994. 27p. Disponível em: <<http://www.isr.edu/Labs/CIM/vm/lai1/final6.html>>. Acesso em: 17 jul. 2000.
- LEE, W. B.; CHEUNG, C. F.; LI, J. G. Applications of virtual manufacturing in materials processing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 113, p. 416-423, 2001.
- LIN, E.; MINIS, I.; NAU, D. S.; REGLI, W. C. *Contribution to virtual manufacturing background research*. University of Maryland, Institute of Systems Research, 1995. p. 44. Disponível em: <<http://www.isr.umd.edu/Labs/CIM/vm/report.html>>. Acesso em: 12 jun. 2000.
- NASA – National Aeronautics and Space Administration. Alternative Engineering: How virtual reality and simulation are changing design and analysis. *NASA Tech Briefs Engineering Solutions for Design & Manufacturing Magazine*, v. 25, n. 6, p. 16-24, Jun. 2001.
- NIST – National Institute of Standards and Technology. *99-1 Planning report: interoperability cost analysis of the U.S. Automotive Supply Chain*, 1999. Disponível em: <<http://www.mel.nist.gov/msid/sima/daratech/sld007.htm>>. Acesso em: 21 out. 2001.
- PENG, Q.; HALL, T. R.; LISTER, P. M. Application and evaluation of VR-based CAPP systems. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 107, p. 153-159, 2000.
- PORTO, A. J.; PALMA, J. G. Manufatura Virtual. In: *Fábrica do futuro: entenda hoje como sua indústria vai ser amanhã*. Ed. Banas, 2000. cap. 10, p. 89-97.
- TMR Show Report. *AUTOFACT97: Virtual manufacturing has become a reality*. Atlanta: Lionheart Publishing, 1998. Disponível em: <<http://www.lionhrtpub.com/tmr/showreviews98/122697autofact.html>>. Acesso em: 20 jul. 2000.
- WAVE Report. *3D – Points to Ponder*. 2002. Disponível em: <<http://www.wave-report.com>>. Acesso em: 2 jul. 2002.

## VIRTUAL MANUFACTURING: CONCEPTS AND CHALLENGES

### Abstract

*Virtual Manufacturing has been used by some companies to improve their processes, introducing more quickly new products in the market. The strategy is to create an integrated environment, composed by several software tools and systems, aiming at generating a new method to develop products. The purpose of this paper is to present the Virtual Manufacturing concept and the paradigms involved in its definition. Then the paper describes the potential application areas and the resulting benefits. In addition, the technical and social challenges in development of a Virtual Manufacturing system are discussed at the end of the text.*

**Key words:** *Virtual Manufacturing, product development, simulation.*