



Departamento Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

1. INTRODUÇÃO

1.1 MANUFATURA ÁGIL

A introdução de máquinas-ferramentas controladas por computador há aproximadamente 40 anos, criou a necessidade de uma representação computacional para o projeto do produto. As gerações posteriores de tecnologia de produção avançada, tais como: máquinas DNC, sistemas de manufatura flexível (FMS), robôs, e sistemas de transporte, criaram uma demanda por informações cada vez mais completas e precisas sobre o produto a ser manufaturado.

Ao mesmo tempo, alterações sociais e econômicas em nossa sociedade e no mercado internacional modificaram significativamente a maneira pela qual as tecnologias de produção são utilizadas. As companhias se tornaram mais orientadas ao produto, objetivando a diminuição do tempo de produção, processos ótimos, fluxo de matéria *just-in-time*, alta eficiência e flexibilidade da utilização da capacidade de manufatura. O termo, **manufatura ágil**, incorpora todas estas características.

Para implementar a manufatura ágil, o projeto do produto e o planejamento devem se tornar integrados de forma muito estreita com a manufatura, e todos os gargalos no fluxo do produto e no fluxo das informações de engenharia devem ser minimizados. A integração estreita entre funções de projeto, planejamento e manufatura requer que informações precisas e suficientemente completas sobre todos os aspectos do produto, processos de produção e operações estejam disponíveis. Assim, espera-se que futuros sistemas de projeto e planejamento estejam estreitamente alinhados com a tecnologia de manufatura, e futuros sistemas de manufatura necessitarão de informações mais completas e mais precisas quando comparadas às informações disponíveis no momento.

A necessidade de integração vai além dos contornos de uma simples companhia; existe um aumento no número de companhias que trabalham em cooperação e sociedades com outras companhias, vendedores e subcontratadas, criando o que se entende por **empreendimento virtual** (*virtual enterprise*). A integração harmoniosa dos empreendimentos virtuais requer uma troca precisa das informações sobre os produtos e processos envolvidos. Junto com as características da manufatura ágil, empreendimentos virtuais formam a base do que vários especialistas acreditam será o próximo paradigma de manufatura dominante.

1.2 MODELO DO PRODUTO

À primeira vista, a estreita integração entre as funções de projeto, planejamento e manufatura conflitam com o objetivo de manter a independência saudável entre o projeto do produto e os detalhes de sua manufatura. Esta separação ainda é importante, pois alguns produtos viverão mais que a tecnologia utilizada para a sua realização. A independência entre o projeto e a manufatura fornece graus de liberdade adicionais para os especialistas da área de manufatura. Um projetista de produto, que pode não possuir conhecimentos sobre as possibilidades e limitações da tecnologia de manufatura, não deve desnecessariamente diminuir a liberdade do engenheiro da área de manufatura. Ele deve deixar para o último a liberdade de escolher a proposta mais apropriada para manufaturar o produto projetado.



Departamento Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

A solução lógica para o dilema entre a integração e a separação das informações, é utilizar modelos do produto de alto nível para comunicar as informações de projeto com o planejamento e a manufatura. Enquanto armazena-se precisamente e de forma completa todas as propriedades essenciais sobre o produto como definido pelo projetista, o modelo do produto não deve especificar detalhes insignificantes para a sua função. Isto é, o princípio do menor comprometimento deve ser seguido.

O modelo do produto é apenas uma fonte de informações necessárias para realizar a total integração das operações de manufatura de uma companhia. Entretanto, especula-se que um sistema de software para projeto, planejamento e manufatura segundo o futuro paradigma de manufatura, será baseado em quatro tipos de modelos:

- **Conhecimento genérico sobre o produto**, que armazena informações genéricas dos produtos e forma um repositório básico de engenharia. O conhecimento deve ser sistematizado – isto é, deve estar disponível, ser compreensível e ser verificável.
- **Modelo do Produto**, que representa todos os aspectos relevantes de um produto específico a ser manufaturado enquanto evita a prejudicial super-especificação de detalhes irrelevantes. Em particular, deve ser possível representar modelos vagos ou incompletos quando apropriado.

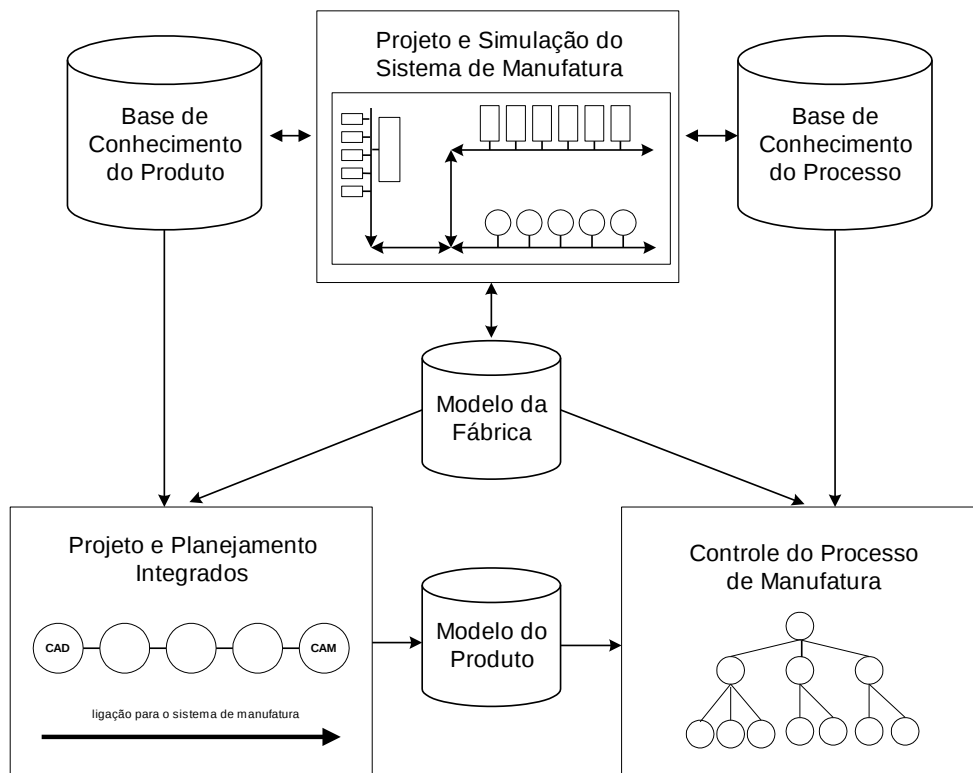


Figura 1-1. Arquitetura hipotética para um futuro sistema de engenharia de software.



Departamento Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

- **Modelo genérico de processo**, que armazena características genéricas dos processos de manufatura em uma forma sistematizada, incluindo necessidades de recursos, capacidades, custo e *lead time*.
- **Modelo da fábrica**, armazena uma coleção de instâncias de processos particulares que estão presentes em uma fábrica em particular. Um modelo da fábrica também representa um estado dinâmico de um sistema de manufatura.

A separação dos modelos genéricos e específicos objetiva separar as responsabilidades entre projeto, planejamento e manufatura. Os modelos genéricos agem como bases de conhecimento que armazenam informações relativamente estáticas. Este conhecimento é utilizado indiretamente por meio dos modelos específicos que instanciam as entidades armazenadas nos modelos genéricos.

A Figura 1-1 exhibe como estes modelos devem ser utilizados por meio de um sistema de software. Como os sistemas de manufatura se tornam cada vez mais complexos e dinâmicos, a modelagem formal e a simulação dos sistemas de manufatura se tornarão o componente central de tal sistema de software. Para manter a independência entre o projeto e a manufatura sem sacrificar a eficiência e a flexibilidade, as atividades de projeto e manufatura são reestruturadas como uma seqüência de etapas onde o projeto se torna muito limitado de acordo com a fábrica em particular representada no modelo da fábrica. Finalmente, o modelo do produto orientado à manufatura é utilizado como uma fonte de informações para o controle do processo de manufatura.

1.3 A IMPOSSIBILIDADE DE DEFINIÇÃO DE UM MODELO DO PRODUTO GENÉRICO

Para compreender melhor os objetivos relacionados aos modelos do produto, vamos discutir brevemente os requisitos apresentados pela atividade de projeto do produto. Os requisitos apresentados pela atividade de projeto do produto, considerando apenas o projeto mecânico, variam de forma muito ampla; tanto na sua concepção (nível abstrato) quanto no seu detalhamento. Portanto, está fora da realidade considerar que um único modelo do produto consiga satisfazer as necessidades de todos os tipos de projeto mecânico. Para ilustrar este ponto, consideremos três tipos de projeto mecânico:

- Configuração de sistema mecânico;
- Projeto de montagem;
- Projeto de peças mecânicas.

Para a configuração do sistema mecânico, o projetista define o sistema mecânico utilizando-se de componentes, considerando apenas as suas funcionalidades e seus parâmetros de entrada e saída que influenciam o sistema como todo. O que está ocorrendo internamente a cada componente não deve ser considerado. As variáveis de interação consideradas em grande número dos projetos são potência, fluxo, movimento e força. Os componentes podem ser eletro-mecânicos, hidráulicos, pneumáticos, térmicos ou mecânicos. Um elemento essencial à configuração do sistema mecânico é a seleção e o posicionamento dos componentes. Isto é precedido pela quebra das várias funções em sub-funções e pela procura de componentes e/ou sub-sistemas responsáveis por uma atividade. A configuração do sistema não é fixa; o projetista configura o sistema selecionando, excluindo ou modificando componentes interativamente.



Departamento Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

No caso de montagem, existem três tipos e as atividades de projeto para cada uma delas é diferente. Primeiro, existem montagens estáticas que, como o nome indica, não contém partes que se movimentam em relação uma a outra. Por exemplo, um trocador de calor, que envolve estruturas soldadas e peças com juntas mecânicas (parafusadas, rebitados ou rosqueadas) é uma montagem estática. Um segundo tipo de montagem é um que envolve movimento relativo entre as partes constituintes. A cinemática pode ser simples como um eixo rotacionando sobre uma luva, o movimento de um pistão sobre um atuador, ou o propulsor de uma bomba. Estas montagens são chamadas de montagens dinâmicas. Quando a cinemática é complexa como mecanismos abertos ou fechados, o problema da síntese cinemática deve ser resolvido primeiro. Montagens cinemáticas são hierárquicas de modo que elas podem ser decompostas sucessivamente em montagens menores contendo cada vez menos elementos. Eles possuem um conjunto de graus de liberdade de movimento; ativando estes graus de liberdade significa que estamos alterando a posição relativa e a orientação de alguns elementos ou sub-montagens em relação aos outros.

Em alguns casos de montagem pode ser possível desacoplar o projeto de peças do projeto de montagem ou da configuração do sistema. Isto é usualmente verdadeiro no projeto de mecanismos onde os estudiosos da cinemática raciocinam em termos de articulações rígidas e juntas, por exemplo. Nos estágios seguintes o projetista deve estar seguro de que as articulações e outras partes estão estruturalmente coerentes sem violação das condições do projeto da montagem ou mecanismo. Nestas circunstâncias o projeto das peças pode ser considerado como o ato de acrescentar detalhes ao projeto. Nos outros casos, montagens complexas, onde projeto da peça e o projeto da montagem não podem ser desacoplados, é necessário interagir entre os dois projetos. O projeto da peça envolve análise de engenharia de vários tipos: estudos paramétricos, otimização, seleção de material, determinação da forma, dimensões e tolerâncias. Ao nível de projeto da peça trabalha-se com a geometria real, ao invés de representações abstratas como em montagem ou configuração do sistema. Todos os detalhes da geometria da peça podem não estar disponíveis (ou podem não ser importantes) nos níveis iniciais. A forma e algumas dimensões são definidas por decisões iniciais ao nível de configuração do sistema e são parcialmente determinadas por análise de engenharia para satisfazer alguns objetivos de projeto (mínimo peso, etc). Frequentemente é necessário selecionar uma peça padrão disponível; nestes casos, o projeto da peça e a análise determinam qual peça (tipo, dimensões, etc) se aproxima mais do desempenho requisitado.

Vários tipos de sistemas de CAD estão disponíveis, ou em desenvolvimento, baseados em várias metodologias de modelagem do produto tais como: Modelagem de Sólidos, Modelagem Geométrica, Modelagem por Features ou Modelos Paramétricos. Como o projeto avança em um vasto domínio, um único tipo de ferramenta, ambiente, ou modelo do produto não pode satisfazer todas as necessidades. Muitos sistemas de CAD enfatizam o projeto detalhado, e suportam pouco as fases iniciais do projeto. Por exemplo, modeladores de sólidos são úteis quando o projeto envolve um arranjo geométrico ou relacionamento de objetos geométricos. Infelizmente, os modeladores de sólidos são de pouco uso na configuração de sistemas mecânicos.

1.4 BREVE HISTÓRICO SOBRE OS SISTEMAS DE CAD/CAM

Pode se dizer que o desenvolvimento das facilidades para modelagem de peças para aplicações de CAD foram iniciadas ao final dos anos 50 e início dos anos 60 quando o primeiro sistema de CAD/CAM foi desenvolvido. Logicamente, estes sistemas CAD eram apenas um conjunto de



Departamento Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

ferramentas para aplicações muito específicas. O desenvolvimento dos sistemas CAD reflete o desenvolvimento de suas possíveis aplicações. É possível identificar quatro áreas que influenciaram os sistemas CAD como nós os conhecemos hoje:

- Máquinas NC foram propostas no início dos anos 50 pelo MIT. A existência de ferramentas controladas numericamente criou a necessidade de modelos de peças numéricas que poderiam ser utilizadas para guiar as máquinas NC.
- Como as primeiras máquinas NC eram utilizadas pelas indústrias automotivas e aeronáuticas, o interesse por modelagem de superfícies esculpidas foi logo despertado. As pesquisas nesta área culminaram com os trabalhos de Bezier, Coons, Gordon e Ferguson, na primeira metade dos anos 60. Companhias como Douglas, Lockheed, Boeing, McDonnell Aircraft e General Motors nos Estados Unidos e Renault e Citroën na Europa, foram as pioneiras neste desenvolvimento.
- A tecnologia de computação gráfica foi criada no início dos anos 60. O interesse inicial era focado em modelos que consistiam de faces planas poligonais. O primeiro algoritmo de eliminação de linhas escondidas para tais modelos foi publicado por Roberts em 1963. Um marco na área de computação gráfica interativa foi o trabalho apresentado por Sutherland no MIT, intitulado “*Sketchpad: a man machine graphical communication system*” em 1963. Este trabalho demonstrou que a computação gráfica interativa era viável. As técnicas apresentadas neste trabalho continuam a serem ré-inventadas até hoje. No lado da aplicação, a disponibilidade de ferramentas para computação gráfica interativa viabilizaram o desenvolvimento do primeiro sistema bi-dimensional para detalhamento de desenho.
- Uma outra área que apresentou um desenvolvimento paralelo foi a análise em engenharia baseada em métodos de elementos finitos (FEM). As aplicações de FEM requerem programas denominados por pré- e pós-processadores. O primeiro é utilizado para definir a geometria, gerando a malha de elementos finitos, e aplicando as condições de contorno. O último é utilizado para exibir os resultados da análise segundo várias formas. Durante os anos 70, a geração interativa de malhas se tornou disponível comercialmente. Desde então os vendedores de software de FEM estão continuamente melhorando as capacidades dos pré- e pós-processadores dos seus sistemas, que podem, eventualmente, estar integradas a modeladores geométricos.

Os primeiros sistemas CAD foram direcionados para a área de desenho técnico, suportando inicialmente apenas funções de desenho 2D. Ao final dos anos 60 e início dos anos 70, surgiu o desejo de estender os sistemas CAD iniciais para três coordenadas. Isto se tornou muito mais complexo que apenas acrescentar uma terceira coordenada. Era esperado que existisse um modelo tri-dimensional central, permitindo a geração automática de todas as projeções bi-dimensionais desejadas.

Utilizando as técnicas para eliminação de linhas e superfícies escondidas já desenvolvidas, os trabalhos para definir os sistemas de modelagem de sólidos se iniciaram durante os anos 70. Duas áreas de atuação foram logo propostas: Ian Braid e seus colegas na Universidade de Cambridge, trabalharam na representação B-Rep (*Boundary Representation*), modelos consistindo apenas por faces que poderiam ser planas, quádricas ou toroidais; Voelcker e Requicha na Universidade de Rochester, apresentaram os modelos CSG, consistindo de um número finito de operações booleanas



Departamento Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

aplicadas a semi-espacos definidas por desigualdades algébricas. Independentemente, Okino desenvolveu um outro tipo de sistema baseado em semi-espacos. Estes grupos, em Cambridge e Rochester, foram seguidos por vários outros, e ambas as linhas de desenvolvimento permitiram que aplicações comerciais surgissem ao final dos anos 70 e início dos anos 80.

A principal vantagem dos sistemas de modelagem de sólidos é que objetos sem sentido não podem ser criados. O projetista tem a opção de trabalhar com volumes sólidos ao invés de primitivos de baixo nível, como linhas, arcos e pontos. Proponentes da tecnologia de modelagem de sólidos, esperavam que ao superar todos os problemas técnicos, os modeladores de sólidos poderiam substituir rapidamente os sistemas de desenho técnico nas atividades de projeto. Infelizmente isto não ocorreu. Mesmo hoje, a maioria dos sistemas CAD são baseados em técnicas de desenho técnico. Ao invés de auxiliar as atividades de projeto, os sistemas de modelagem de sólidos encontram uso na documentação do projeto, estudos de montagem, robótica, definição de geometria para malhas de FEM e geração do caminho de usinagem para máquinas NC.

Ao longo dos anos, os quatro campos que originaram o progresso inicial dos modelos CAD continuaram a influenciar o desenvolvimento posterior dos sistemas CAD. Durante os anos 80, as pesquisas se voltaram para incorporar as facilidades de superfícies esculpidas aos modelos B-Rep, resultando que a Modelagem Geométrica e a Modelagem de Sólidos foram quase que completamente fundidas. Um outro desenvolvimento significativo foi a proposta de superfícies NURBS (*nonuniform rational B-Splines*) para homogeneizar as várias representações de curvas e superfícies utilizadas em sistemas CAD.