

EDITOR E SIMULADOR PARA AUXÍLIO À PROGRAMAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

João Walter Bruno Filho¹, jwbruno@inf.ufpr.br
Hélio Pedrini², helio@ic.unicamp.br
Dalberto Dias da Costa³, dalberto@ufpr.br

¹Universidade Federal do Paraná, Departamento de Informática, Curitiba-PR, 81531-990

²Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, Campinas-SP, Brasil, 13084-971

³Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba-PR, 81531-990

Resumo: A atividade de planejamento de processos é de grande importância para a fabricação mecânica, pois possibilita a racionalização das decisões a fim de obter eficazmente a peça a ser usinada de acordo com as especificações de projeto. Dessa forma, a redução do tempo de produção e dos custos com material e mão-de-obra torna-se uma questão fundamental. Esforços internacionais têm sido realizados para promover maior integração entre projeto, processo e fabricação. Uma iniciativa é a utilização de um conjunto de informações, conhecidas como features, para descrever a forma e os atributos de uma peça. As máquinas-ferramentas tradicionais executam comandos escritos em linguagem G/M, os quais correspondem aos movimentos de eixos da máquina e funções das ferramentas. O uso de features permite a usinagem da peça por meio de uma seqüência de operações de alto nível de abstração para a remoção de material. Este trabalho descreve uma metodologia para desenvolvimento de um protótipo para auxiliar a programação de máquinas-ferramentas. Os principais módulos que compõem o protótipo são o de edição da peça, simulação do modelo e transmissão do código para a máquina-ferramenta. O módulo de edição permite a inserção dos parâmetros geométricos relacionados com as features. Após a edição, o modelo pode ser visualizado e avaliado pelo usuário. Este modelo permite ainda a geração do código (programa) a ser interpretado pela máquina-ferramenta. A validação do programa é facilitada com o auxílio de um simulador gráfico. Os recursos de simulação propostos baseiam-se na representação gráfica da trajetória das ferramentas em um plano escolhido. Após a verificação do programa, o usuário pode transmiti-lo para o comando da máquina-ferramenta. Para a transferência de dados, adotou-se o protocolo RS-232C entre as portas seriais do computador e da máquina-ferramenta. O modelo da peça é descrito pela combinação de duas técnicas de representação, a geometria sólida construtiva e a enumeração de ocupação espacial, a partir de um conjunto de primitivas gráficas como cubos, cilindros, esferas, cones e elipsóides. As primitivas são combinadas para formar um novo objeto sólido por meio de uma seqüência ordenada de operações Booleanas. Uma estrutura hierárquica é usada para controlar a aplicação das operações Booleanas.

Palavras-chave: Usinagem, Máquinas-Ferramentas, Edição e Simulação de Peças, Modelagem Geométrica

1. INTRODUÇÃO

A utilização de um ambiente computacional é uma realidade em grande parte do cenário industrial. Entretanto, algumas tecnologias hoje empregadas ainda vêm de um ambiente pouco amigável e de técnicas que perduram desde a época dos cartões perfurados, como é o exemplo de algumas máquinas-ferramentas. As mais conhecidas delas, chamadas CNCs (Controle Numérico por Computador, do inglês *Computer Numerical Control*), embora sejam máquinas de alta precisão e desempenho e estejam bastante à frente de suas antecessoras, ainda são utilizadas de forma muito semelhante à época em que foram lançadas. Poucas mudanças ocorreram desde a sua criação até os dias de hoje. O emprego dos sistemas chamados CAD/CAM (do inglês *Computer-Aided Design* e *Computer Aided Manufacturing*) têm se tornado mais comuns, mas ainda assim não há uma grande integração entre esses sistemas, e muito menos entre eles e as máquinas utilizadas para a fabricação das peças finais, as máquinas-ferramentas.

O processo de manufatura com a utilização de CNCs pode ser realizado de várias formas, como a entrada de dados manual, programação manual ou programação assistida por computador (Chang et al., 1998). Todas elas necessitam de um alto grau de conhecimento técnico sobre o funcionamento dos CNCs e utilização dos softwares que apoiam o desenvolvimento de peças de manufatura, e não apenas de conhecimento sobre o produto. Além disso, adaptações são necessárias em todas as etapas da produção para atender às demandas de uma máquina-ferramenta e, mesmo que haja

um sistema ágil e de produtividade para uma determinada máquina-ferramenta, a cadeia anterior à ela geralmente é projetada para atender aos fins específicos daquela máquina, pois não há uma padronização entre as máquinas-ferramentas ou CNCs, isto é, não se consegue utilizar um mesmo código para mais de uma máquina-ferramenta.

Desde o projeto e a digitação do código como processo manual até o projeto digital em CAD (importação em um sistema CAM), depende-se muito tempo para planejar e desenvolver um bom produto. Hoje em dia, a necessidade de qualidade e agilidade em todo o processo de desenvolvimento é uma questão não somente de expansão de negócios, pois não há garantias de posição no mercado, mas da constante busca por novos meios e técnicas de produção.

O padrão ISO 14649 (Rosso e Newman, 2003; Weck e Wolf, 2001), comumente chamado STEP-NC, está sendo desenvolvido com o intuito de melhorar a integração das técnicas de manufatura, criando um padrão de dados baseado nas características dos produtos, as chamadas *features*. Por meio do emprego das *features*, pode-se explorar todo o processo de criação em uma só ferramenta, ao invés de necessitar da utilização de várias em conjunto, além de possibilitar o desenvolvimento de peças de manufatura com muito menos treinamento e especialização.

Este trabalho tem como principal objetivo investigar a criação de uma ferramenta computacional que incorpore algumas *features* descritas na norma ISO 14649 e desenvolver um protótipo para tal. Este sistema é composto, basicamente, por um editor, um simulador e um módulo de transmissão. O editor permite o projeto de uma peça a ser usinada baseando-se em algumas características da norma. O simulador permite a visualização de um modelo virtual da peça, além de gerar o código a ser executado na máquina-ferramenta. O módulo de transmissão permite o envio do código gerado à máquina ferramenta para execução.

Além disso, pretende-se responder algumas questões relativas ao processo de manufatura baseado em máquinas-ferramentas e nas *features* apresentadas na norma ISO 14969, aplicando-se conhecimento de recursos computacionais de forma a contribuir com a área de usinagem, sem a pretensão de se construir um protótipo superior aos aplicativos CAD e CAM disponíveis, os quais são mantidos e atualizados por empresas (corporações) especializadas nesse ramo de atividade industrial, mas sim a investigação e incorporação de novas funcionalidades, tanto com o emprego das *features* quanto de algoritmos para modelagem e simulação.

Um modelo é criado a partir de uma vista tridimensional de algumas das *features* encontradas na norma ISO 14649 para permitir a fabricação de peças de usinagem. Uma interface gráfica permite ao usuário a entrada dos valores dos atributos de cada *feature* e a sua exibição de acordo com os valores especificados. Pela aplicação de um conjunto de *features*, o projetista pode criar um modelo virtual da peça e, com o simulador, verificar se ele atende aos requisitos especificados no projeto. Caso seja necessário algum ajuste, o projetista tem a possibilidade de realizar as devidas modificações até que o modelo corresponda à peça desejada, reduzindo-se assim custos com material e mão-de-obra.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um programa NC é uma combinação de código de máquina-ferramenta e instruções específicas da máquina. Ele contém informação geométrica sobre a peça e informações de movimento para a ferramenta de corte.

Sob o aspecto da programação NC, pode-se citar algumas de suas características principais. Zeid (2005) apresenta quatro métodos comuns utilizados para criar programas NC:

- programação manual da peça: o programador NC escreve o código manualmente e o armazena em um arquivo, similar à programação C, C++ ou Java;
- programação da peça assistida por computador: o programador NC usa um software específico para gerar os programas NC;
- programação da peça usando um sistema CAD/CAM: o programador NC usa um pacote de sistema CAD/CAM para gerar programas NC. Esta abordagem é semelhante ao item anterior. Entretanto, o benefício aqui é que o programador utiliza uma base de dados geométrica de peças e operações, não havendo necessidade de traduzir e importá-la;
- entrada manual de dados: o programador NC usa o controlador de uma máquina-ferramenta para entrar com dados NC diretamente. O programador pode usar o controlador para verificar o caminho da ferramenta após a entrada dos dados para assegurar sua correção antes de usá-la na usinagem. O controlador ainda permite ao programador salvar os seus dados e programa.

Atualmente a operação de máquinas-ferramentas CNCs ainda necessita de um grande nível de especialização. A utilização da chamada linguagem G/M (ISO 6983), que se baseia em instruções de movimento (G1, G2, G3) e de troca (M1, M8) de ferramenta, embora esteja bastante próxima e de forma bastante clara dos princípios fundamentais da construção das peças ou partes de manufatura, ainda possui muitos problemas com relação à padronização da sua utilização. A utilização desse tipo de código produz programas muito extensos, difíceis de manter, corrigir e com limitado controle de execução.

A partir da metade da década de 1990, uma nova interface de dados, chamada STEP-NC (ISO 14649), passou a ser desenvolvida sob a direção do comitê técnico TC184 da ISO (do inglês *International Organization for Standardization*), dentro dos subcomitês SC1 e SC4 (Rosso e Newman, 2003), o que facilitou o desenvolvimento para a área de manufatura e, com isso, possibilitou a mudança de características que hoje estão presentes quando se fala em

máquinas-ferramentas. Buscou-se padronizar o processo de manufatura e, especificamente, estabelecer um modelo de dados para os controladores numéricos a serem criados.

Na norma ISO 14649, a geometria tanto do bloco bruto quanto da peça final é descrita pelo padrão conhecido como STEP (*STandard for Exchange of Product model data*), descrita na norma ISO 10303, inicialmente dedicado a aplicações de manufatura, que define um padrão para modelos de dados específicos para uma ampla variedade de produtos, tais como da indústria naval, automobilística e eletrônica (Loffredo, 2008). Com a utilização dessa sintaxe, pretende-se realizar troca direta de dados entre o software de CAD/CAM e o NC. Dados poderiam ser importados diretamente de sistemas CAD, sem a necessidade de transformação ou adaptação dos mesmos, eliminando a necessidade do pós-processamento.

Técnicas de modelagem geométrica permitem a representação de objetos completos, válidos e não ambíguos. Em meados dos anos 70, Brown et al. (1978) previram que sistemas de modelagem geométrica seriam reconhecidos como os componentes centrais dos sistemas flexíveis para projeto e produção automática de uma ampla variedade de bens mecânicos, por fornecerem meios para a criação, edição e manutenção de várias representações alternativas da geometria de objetos sólidos (partes móveis, ferramentas, entre outros) e servir como fontes de dados geométricos para um grande número de aplicações.

Ji e Marefat (1997) citam seis principais técnicas usadas para representar e manter um modelo 3D por um sistema de modelagem CAD: instanciação de primitivas puras (PPI, do inglês *Pure Primitive Instancing*), enumeração de ocupação espacial (SOE, *Spatial Occupancy Enumeration*), decomposição de células (CD, *cell decomposition*), varredura (S, *Sweeping*), Representação por Fronteiras (B-Rep, *Boundary Representation*) e geometria sólida construtiva (CSG, *Constructive Solid Geometry*).

A representação de objetos por instanciação de primitivas é uma das representações mais usadas devido a sua grande simplicidade e flexibilidade. Esse tipo de representação tem por base a definição de objetos geométricos tridimensionais (primitivas) que possuem atributos (parâmetros), cujos valores são definidos pelo usuário no momento da criação de uma nova instância.

A representação por enumeração de ocupação espacial (Mäntylä, 1988) subdivide o espaço 3D em volumes pequenos idênticos, chamados *voxels* que juntos representam o volume ocupado pelo sólido. Para representar um objeto, classifica-se esse volume como vazio ou contendo um sólido. A SOE é única e não ambígua, mas tem a falha de ser potencialmente prolixa, devido a sua natureza enumerativa.

O método de decomposição de células possui como base a representação do objeto final através de elementos primitivos paramétricos, sendo um recurso eficiente de geometria para cálculos de propriedade de massa e para alguns tipos de problemas de planejamento, mas, em algoritmos gerais para criação e combinação, tal representação não é disponível, e a validação não é trivial (Brown et al., 1978).

A representação de sólidos por varredura tem por base a descrição do volume gerada quando um objeto é deslocado segundo uma dada trajetória e forma um dado volume. Zeid (2005) considera a representação por varredura útil onde o seu domínio de modelagem pode ser estendido através de objetos $2^{1/2}D$ e também ressalta que peças, como parafusos e componentes que necessitam de formas helicoidais e especiais, podem ser representados por varredura.

A modelagem geométrica por fronteiras descreve os objetos por meio das superfícies que os delimitam. Representações por fronteiras são fontes eficientes de geometria para gráficos e, dada informação apropriada de dimensionamento e tolerância, para operações realizadas em máquinas NCs. Infelizmente, elas são difíceis de ser criadas e custosas para serem armazenadas, transmitidas e validadas (Benouamer e Michelucci, 1997).

A representação de objetos por geometria sólida construtiva (CSG) consiste em criar representações de objetos a partir de uma hierarquia de um conjunto de operações Booleanas (união, intersecção, diferença) aplicada a um conjunto de formas simples, chamadas primitivas. Internamente, um objeto CSG pode ser representado como uma árvore binária (árvore CSG), cujos nós folhas representam as primitivas sólidas e os nós internos (compostos) representam as operações Booleanas. Os nós internos representam os sólidos parciais resultantes da aplicação das operações Booleanas associadas a esses nós e aos dois subsólidos das árvores inferiores à esquerda e direita. O nó raiz representa o objeto composto resultante. O emprego de CSG é definido como uma das duas principais técnicas de modelagem de sólidos por vários autores (Leff e Yun, 1986; Leondes, 2001; Shiroma et al., 1991; Zeid, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta neste trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema que agrega as novas funcionalidades que as *features* de usinagem podem trazer à programação de máquinas-ferramentas. A ISO 14649 não foi abordada em sua totalidade, foi utilizada como base para o desenvolvimento da metodologia, apenas com o propósito de avaliar a possibilidade de sua utilização. O equipamento utilizado como base para o desenvolvimento e testes do protótipo foi o centro de usinagem ROMI Discovery 4022, uma máquina-ferramenta de 3 eixos com comando numérico MACH9.

Esta seção está dividida da seguinte forma. Primeiramente é apresentada uma visão geral do protótipo desenvolvido. Os componentes principais desse sistema são explicados mais detalhadamente quanto a sua subdivisão, suas funcionalidades e sua relação interna. Em seguida, a representação geométrica dos objetos é descrita, com demonstrações de sua utilização.

3.1. Componentes do Protótipo

Para uma maior compreensão do funcionamento do protótipo e de seu processo de desenvolvimento, em um nível alto de abstração, o sistema foi dividido em quatro entidades principais: os usuários, a norma ISO 14649, o sistema desenvolvido propriamente dito e a máquina-ferramenta (CNC). Tais componentes são descritos a seguir:

- **Usuários:** são os responsáveis pela entrada de dados e seleção de características do programa. Eles escolhem as *features* utilizadas, especificam valores aos atributos de cada uma delas e as posicionam em relação à peça. Os usuários também definem quais ações devem ser executadas para a modelagem da peça.
- **Norma ISO 14649:** fornece informações geométricas e restrições das *features* utilizadas no sistema.
- **CNC:** recebe o código com instruções para a usinagem. O fato de possuir algumas particularidades, como o número de eixos, número máximo de ferramentas no *magazine*, o espaço de trabalho é considerado como entrada de dados, pois são informações relevantes ao processo de uma peça de manufatura.
- **Sistema para Edição/Simulação/Transmissão:** permite ao processista que estiver familiarizado com o desenvolvimento modelar, simular e gerar o código para usinagem de uma peça, sendo uma interface entre os usuários, as *features* e a máquina-ferramenta.

Com base nessa divisão, o diagrama mostrado na figura 1 representa as entidades e a comunicação realizada entre elas, através das setas. Os principais módulos do protótipo são o de edição da peça, simulação da peça e transmissão do código para a máquina-ferramenta. O módulo de edição permite a inserção dos parâmetros geométricos relacionados com as *features*. Após a edição, o modelo pode ser visualizado e avaliado pelo usuário. Este modelo permite ainda a geração do código interpretado pela máquina-ferramenta. A validação do programa é facilitada com o auxílio de um simulador gráfico. Os recursos de simulação propostos baseiam-se na representação gráfica da trajetória da(s) ferramenta(s) de corte em um plano escolhido. Após a verificação do programa, o usuário pode transmiti-lo para o comando da máquina-ferramenta. Para a transferência de dados, adotou-se o protocolo RS-232C entre as portas seriais do computador e da máquina-ferramenta. A seguir encontra-se a descrição desses módulos.

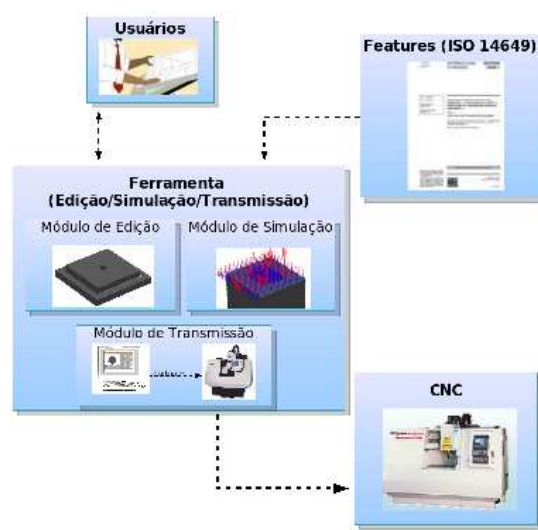


Figura 1. Componentes envolvidos no desenvolvimento do protótipo.

O sistema para edição/simulação é constituído pelos módulos de edição e simulação, e é chamado assim porque o conjunto desses módulos representa o núcleo do protótipo desenvolvido e há uma forte dependência entre eles. Neste sistema ocorre a maior interatividade com o usuário e, assim, requer um maior detalhamento devido à extensão de suas funcionalidades.

A interação inicial com o sistema é feita como o Módulo de Edição. Nesse módulo, o usuário tem como objetivo a modelagem da peça a partir da aplicação das *features* e dos parâmetros necessários para a usinagem. A figura 2 apresenta a arquitetura do Módulo de Edição. Esse módulo é composto de vários submódulos que, em conjunto, formam a interface para a modelagem da peça de manufatura.

O módulo de modelagem apresenta os seguintes componentes:

- Um submódulo, chamado Navegador do Produto, é utilizado para navegar sobre a estrutura de dados da peça. O navegador possui uma interface gráfica para permitir que o usuário visualize graficamente a estrutura da peça.
- Um submódulo chamado de Manipulador de *Feature* é responsável pela instanciação das *features*. O usuário pode selecionar dentre as *features* disponíveis e, então, fornecer os valores de seus atributos.

- Um submódulo de Funções Auxiliares inclui um conjunto de funções de suporte, como o mapeamento da estrutura da peça em uma estrutura gráfica.
- Um submódulo Atribuição de Informação é responsável por atribuir tolerâncias e definir a finalização de superfície a determinadas partes, baseado no tipo de ajuste desejado entre as *features* que constituem as peças. Esta função é realizada de acordo com a verificação das restrições estabelecidas pela norma, que definem a Base de Dados de Manufatura.

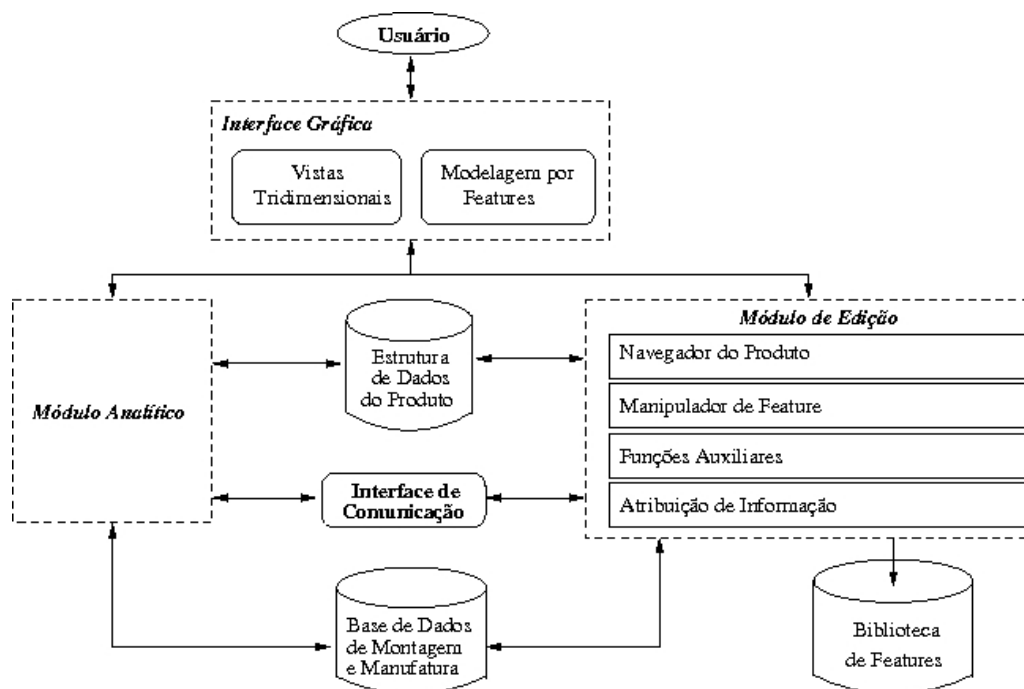


Figura 2. Arquitetura da interface de Edição. Adaptada de Maziero et al. (2000).

O Módulo Analítico realiza diferentes tipos de análise, que incluem: a) dimensionamento; b) análise de tolerâncias; c) identificação de acabamento de superfície. A descrição de um modelo analítico pode ser encontrado em Maziero et al. (2000). A Interface de Comunicação é responsável pela conexão entre os Módulos Analíticos e de Modelagem, transferindo os valores com as devidas proporções e limites da estrutura gráfica.

O usuário, ao desejar criar uma nova peça, deve inicialmente definir o tipo e as dimensões do bloco inicial. O bloco inicial deve representar o mais próximo possível as características da peça bruta a ser usinada. Após a definição dessas dimensões, o bloco bruto é demonstrado graficamente. Depois de definir o bloco inicial, o usuário escolhe qual *feature* de manufatura ele deseja incorporar ao bloco. Ao escolher a *feature* desejada, ele deve atribuir valores aos atributos da *feature*, e então definir o posicionamento da *feature* sobre o bloco, onde as estruturas geométricas serão mostradas ao usuário. Ao terminar a modelagem da peça de manufatura, o processista pode realizar a simulação da usinagem da peça. Para isto, a estrutura de dados da peça modelada é transferida ao Módulo de Simulação, gerando uma nova representação, baseada na trajetória da ferramenta de corte sobre o bloco inicial, possuindo um nível de detalhe superior ao anterior.

A figura 3 apresenta a arquitetura do Módulo de Simulação. A interface gráfica possui dois componentes principais: a simulação tridimensional da peça a ser usinada, com a trajetória da ferramenta de corte sobre o modelo tridimensional gerado no módulo de edição e características tais como precisão escolhida da ferramenta e a área reservada ao código G gerado e utilizado na simulação.

A Biblioteca de *Features* é única e compartilhada com o Módulo de Edição. Pode-se também verificar que alguns submódulos possuem a mesma nomenclatura entre os módulos de Edição e Simulação, mas estes apresentam diferenciações em suas funcionalidades, a citar, os submódulos analítico, a base de manufatura, a estrutura do produto e a interface de comunicação. As diferenças entre esses submódulos, bem como os submódulos exclusivos do Módulo de Simulação, estão descritas a seguir:

- submódulo Navegador do Produto, que utiliza uma estrutura de dados diferente, mesmo possuindo a mesma finalidade do Módulo de Edição.
- submódulo Interpretador de Superfície faz a conversão da estrutura de dados gerada pelo Módulo de Edição, a Base de Dados de Manufatura e o conjunto de *features*.
- submódulo Gerador de Código G faz a análise da estrutura de dados da peça através da Base de Dados de Manufatura em conjunto com o Módulo Analítico para gerar um código específico da máquina-ferramenta utilizada.

- submódulo Funções Auxiliares inclui funções de suporte tanto à estrutura gráfica da simulação quanto à geração do código G.

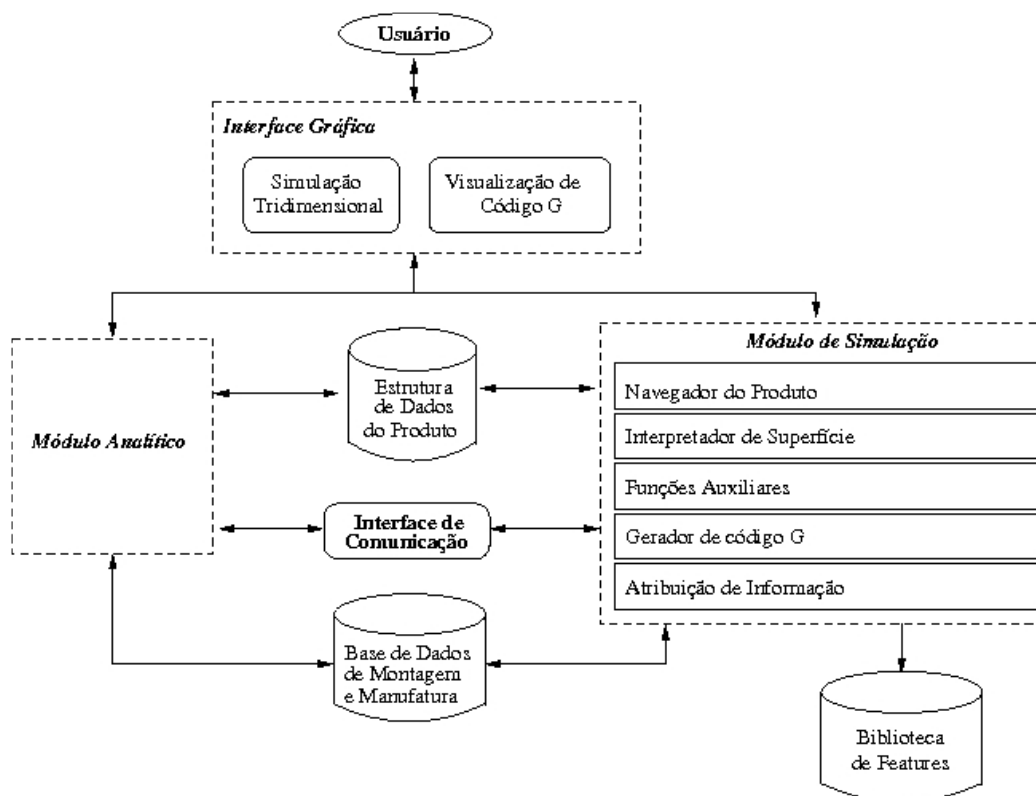


Figura 3. Arquitetura da interface de Simulação. Adaptada de Maziero et al. (2000).

O Módulo Analítico é responsável por análises direcionadas à Simulação, envolvendo as propriedades da máquina-ferramenta, do modelo gerado e das *features*. A Base de Dados de Manufatura contém as especificações e tolerância no que diz respeito às técnicas de manufatura. O método de representação utilizado na interface de simulação foi escolhido em razão da natureza do problema e ao grande nível de detalhe gerado na tarefa de simulação.

A simulação ocorre em conjunto com a geração de código G. Este processo se inicia quando o usuário define os valores ou as dimensões do bloco inicial da peça de trabalho. Então, o módulo de simulação define seus limites de trabalho, assim como os deslocamentos seguros em relação à peça e também as especificações referentes à ferramenta de corte (como diâmetro, profundidade, diâmetro máximo de corte, profundidade máxima de corte, velocidade de avanço, velocidade de posicionamento, etc) e aspectos de usinagem como plano de trabalho, utilização de fluido de corte, origem do sistema de coordenadas (absoluta e incremental), entre outros.

No Módulo de Simulação, a versão usinada da peça é apresentada. A geometria da ferramenta e aspectos como precisão são levados em consideração, assim os detalhes da usinagem poderão ser exibidos e modificados, antes da execução da peça na máquina-ferramenta.

Após a entrada de valores e confirmação da inclusão de uma *feature*, o número de passos necessários para concluir a operação é calculado, ou seja, a quantidade de movimentos que a ferramenta de corte necessita para remover todo o volume referente à *feature* escolhida. Esses passos são calculados com base nas dimensões da peça nas dimensões das ferramentas (os chamados diâmetro efetivo, profundidade efetiva, etc), nas dimensões da *feature* especificada e parâmetros de segurança, como plano de retração, utilizado para auxiliar na remoção de cavaco, entre outros. Cada ponto é então calculado com base na especificação da *feature* e no valor dos atributos selecionados pelo usuário.

Para diminuir a probabilidade de erros, em cada ponto calculado para a máquina, um ponto é atribuído à simulação gráfica do traçado da ferramenta. Nos casos onde uma função determina uma seqüência de pontos com características comuns, também há uma função que gera os pontos correspondentes para a simulação de traçado.

As estratégias de desbaste foram escolhidas pela sua simplicidade, visando sempre à segurança da máquina e da peça, procurando sempre posicionar a ferramenta de corte fora da peça, antes de iniciar qualquer movimento de corte. Alguns poucos movimentos são realizados em velocidade de posicionamento dentro da peça, como os movimentos de retração para a usinagem de furos. Mas estes movimentos são sempre executados em direção a um eixo livre.

A partir desses fatores é gerado o código G correspondente ao comando de corte/posicionamento necessário. Depois de gerado o código G, este mesmo ponto é inserido no conjunto de simulação de traçado, também levando em conta o tipo de operação realizado. Por razões de segurança, após a execução de toda *feature*, o código para o retorno da ferramenta de corte à posição de troca (ou à posição chamada G0Z00, como especificado para o comando MACH9) é incluído.

A interface do Módulo de Simulação permite ao usuário analisar a peça em diferentes ângulos de observação para verificar sua corretude e o detalhamento da usinagem, além de verificar o código de usinagem gerado para a máquina-ferramenta. A transmissão do código G para a máquina-ferramenta é uma característica importante para a conclusão do projeto da peça de manufatura. Embora seja possível a digitação do código diretamente no painel da máquina-ferramenta, isto se torna inviável devido ao tempo necessário para inserir a quantidade de informação gerada, visto também o desperdício de equipamento disponível (neste caso, o computador). A arquitetura da interface de transmissão é apresentada na figura 4.

Uma alternativa é a utilização de programas já existentes que realizam esta tarefa. Entretanto, é interessante que uma ferramenta consiga englobar todos esses processos. Visto isso, o módulo de transmissão tem como finalidade enviar para a máquina-ferramenta o código gerado para a usinagem da peça desejada.

O código G para a manufatura é gerado para cada *feature* independentemente. Como o número de funções ou arquivos que a máquina-ferramenta pode receber é limitado e não há como prever a quantidade de *features* utilizada na usinagem de uma peça, todo o processo de usinagem é enviado em apenas um arquivo para a máquina-ferramenta.

Diferente das etapas de Edição e Simulação, a Transmissão de dados apresenta uma arquitetura relativamente simples, como pode ser visto na figura 4, apresentando os seguintes componentes:

- submódulo Manipulador de Código controla o posicionamento dentro do código G para o envio do mesmo à máquina-ferramenta.
- submódulo RS-232 contém as funções de envio e recebimento do protocolo RS-232.
- submódulo Gerente de Conexão estabelece uma conexão entre o sistema e a máquina-ferramenta para o envio dos dados.

A transmissão dos dados entre o computador e a máquina-ferramenta ocorre de maneira simples. Como a máquina utilizada nos testes não possui um protocolo próprio para a transferência de dados e não oferece um tratamento detalhado de retorno, foi utilizado o protocolo RS-232C para realizar a entrega do programa.

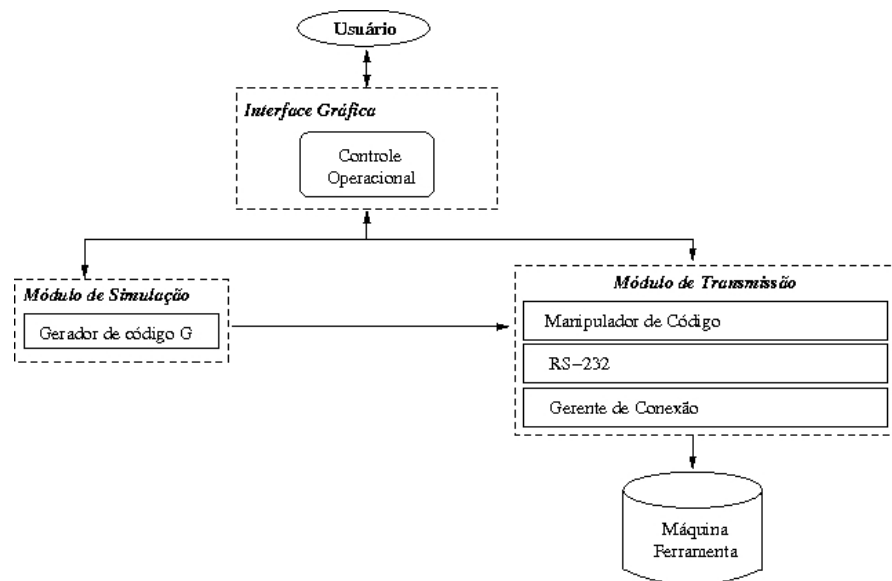


Figura 4. Arquitetura da interface de Transmissão. Baseado em Maziero et al. (2000).

Inicialmente, a máquina-ferramenta deve ser colocada em modo de recepção por meio da porta serial que possui. O usuário então deve escolher a opção de efetuar conexão com a máquina. O módulo de conexão tenta iniciar a comunicação entre a máquina-ferramenta e o computador e, assim que estabelecida, envia os dados gerados para a máquina-ferramenta. A velocidade da conexão foi estipulada em 19200 Kbps (Kilobytes por segundo), pois a quantidade de informação a ser enviada é relativamente pequena e esta velocidade oferece uma segurança relativa à entrega dos dados.

3.2. Representação Geométrica

Para representar a modelagem de objetos foi utilizada a técnica de enumeração de ocupação espacial, onde o espaço é subdividido em pequenos volumes de tamanho fixo (os chamados *voxels*), em conjunto com as operações de geometria sólida construtiva (CSG). A representação geométrica é realizada da seguinte forma. Primeiramente estabelece-se um valor para a resolução, que implicará no número de subdivisões do espaço e, conseqüentemente, na precisão da visualização. Esse número deve estar entre o intervalo aberto de extremos 0 e 1.

Embora esse intervalo esteja definido matematicamente, é importante ressaltar que a escolha desse valor deve ser realizada de forma lógica à precisão que se deseja encontrar na modelagem e que valores superiores a 0.1 são demasiadamente impraticáveis devido à baixa qualidade de representação que oferecem. Quanto maior proximidade do zero, maior a quantidade de *voxels* gerada, tal como a precisão do objeto modelado.

A criação do espaço inicial somente é dada quando da criação do objeto inicial ou bloco inicial. Ao definir esse objeto, ele é posicionado internamente ao espaço de trabalho, normalizando seus valores para que trabalhem dentro dos limites deste espaço, tomando-se o maior valor como referência, para que o modelo ocupe o maior volume possível, sem sofrer danos.

O objeto inicial pode possuir três formas principais: o cubo, o paralelepípedo ou o cilindro. Essas formas são utilizadas durante todo o processo de modelagem. Todas as *features* são compostas pela aplicação de operações de CSG a uma ou mais dessas formas.

A partir da geração do modelo desse bloco inicial, um conjunto de operações CSG é efetuado sobre o modelo. As operações utilizadas são união (ou adição), interseção e subtração. Essas operações são executadas sucessivamente de acordo com a especificação das *features* escolhidas para modelagem da peça de usinagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta alguns resultados experimentais obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta neste trabalho.

Ao iniciar o protótipo, o usuário terá acesso ao Módulo de Edição. O usuário deve especificar as dimensões de uma ferramenta de corte a ser utilizada. Essas serão as dimensões utilizadas para a simulação e geração da trajetória da ferramenta. O próximo passo para a criação da peça é a seleção das *features* que a descrevem. O usuário poderá escolher dentre um conjunto de *features* qual delas melhor se aplica. A modelagem por *feature* deve ser realizada por etapas, sempre uma a uma.

O usuário pode visualizar a simulação da usinagem selecionando a opção de simulação. O Módulo de Simulação é apresentado ao usuário e irá gerar uma representação tridimensional da peça usinada, e o percurso da ferramenta de corte para gerar a peça desejada sobre ela. As imagens da figura 5 foram obtidas a partir da simulação da peça.

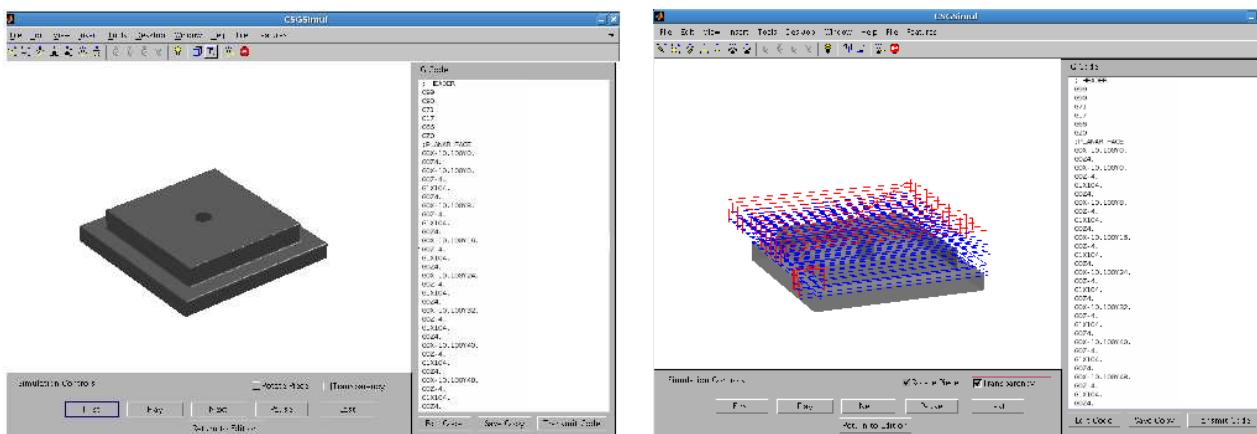


Figura 5. Simulação de peça.

O usuário pode observar linhas representando todo o trajeto da ferramenta de corte sobre o modelo gerado no Módulo de Edição. Para facilitar o entendimento, devido à complexidade da visualização, o usuário pode navegar pela simulação e seguir a ordem na qual as instruções das *features* foram geradas. Essa ordem é mostrada de acordo com o tipo de movimento executado, se movimento de posicionamento ou movimento de avanço, representados por cores distintas. Dessa forma, o usuário pode analisar cuidadosamente a peça, seu código e a usinagem proposta, permitindo retornar à modelagem para realizar as correções necessárias. O usuário pode alternar a utilização do Módulo de Edição com o Módulo de Simulação até que a peça esteja de acordo com o esperado. Após o processo de simulação, o código apresentado ao usuário pode ser enviado à máquina-ferramenta por meio do módulo de transmissão.

O uso das *features* incluídas neste trabalho visa à avaliação da viabilidade da implementação descrita pela norma ISO 14649, assim como a avaliação da possibilidade de utilizá-las em conjunto com a ISO 6983. Quanto à conversão para sua utilização em concordância com a ISO 6983, apenas as principais características de cada *feature* foram implementadas. Dessa forma, atributos como *bottom condition* (condições de fundo) e *tapered end* (tipo de furo onde o diâmetro final é diferente do inicial) não foram cobertos pela implementação, mesmo que descritos na norma 14649.

Devido à natureza do problema abranger tópicos multidisciplinares, particularmente nas áreas de Engenharia Mecânica e Computação, o desenvolvimento de uma ferramenta para edição e simulação de peças traz alguns desafios, relatados a seguir.

Um dos principais problemas relativos ao desenvolvimento de um simulador ou aplicativo para modelar uma peça em um centro de usinagem através de suas características (*features*) é a formulação de uma boa estratégia de desbaste.

Uma situação extremamente difícil relacionada ao desgaste é estabelecer um caminho ótimo para ferramentas e também verificar quais são as impossibilidades de desgaste diante de um conjunto de ferramentas. O processista deve ter a certeza de que, com o seu conjunto de ferramentas, todo o material seja retirado antes do processo de acabamento. A estratégia para o desgaste foi baseada no desgaste por contorno, por possuir relação com os métodos utilizados para a descrição dos modelos gráficos gerados e devido a sua segurança quanto à geração do trajeto da ferramenta de corte. Procurou-se estabelecer um valor limite para o máximo desgaste de cada ferramenta de corte, com relação ao raio de corte e a profundidade máxima de corte, para evitar a super-utilização e desgaste excessivo de cada uma delas.

Um outro problema inerente à usinagem, principalmente em peças com geometria complexa, é a fixação. Cada peça deve possuir em seu planejamento o uso de uma estratégia de fixação, e esta não deveria influir na usinagem. Apesar disso, algumas precauções devem ser tomadas. Um choque (contato) pode ocorrer entre a ferramenta de trabalho e o mecanismo de fixação durante os movimentos de posicionamento ou aproximação no processo de usinagem. Não foram inseridos na ferramenta final meios para o controle de adição ou choque aos fixadores, ficando a critério do usuário a análise desse risco.

A técnica de SOE provou ser eficiente por meio de sua representação matricial. Outras técnicas poderiam ser aplicadas com sucesso para a representação de sólidos. Métodos consagrados como os algoritmos de GoldFeather e SCS, além de alternativas a esses algoritmos como os descritos por Stewart et al. (1998, 2003) e Erhart e Tobler (2000), não foram testados devido à falta de recursos para a implementação desses algoritmos e métodos.

Em termos de usabilidade, alguns problemas foram encontrados para desenvolver o sistema de acordo com características padrões às ferramentas do tipo CAD/CAM, como, por exemplo, a não representação das dimensões dos modelos após terem sido gerados, sendo necessário ao usuário ter como verdadeiras as dimensões a ele apresentadas, sem possuir um retorno direto sobre elas. Finalmente, outra dificuldade foi o conjunto escasso de objetos para o desenvolvimento de uma Interface Gráfica de Usuário (GUI, do inglês *Graphical User Interface*) mais sofisticada.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para desenvolvimento de um protótipo para auxiliar a criação de peças de usinagem, utilizando um tipo especial de máquina-ferramenta, chamado CNC, por meio do emprego de *features* de usinagem.

Espera-se contribuir com o desenvolvimento do processo de manufatura atual por meio do uso de técnicas mais modernas e eficazes, como a utilização de *features* especificadas na norma ISO 14649, bem como a aplicação de abordagens para modelagem, programação, simulação e apresentação gráfica 3D das peças a serem usinadas.

O protótipo implementado permite o uso de *features* com uma máquina-ferramenta de grande utilização na indústria de manufatura, aproximando o desenvolvimento da tecnologia de manufatura atual às máquinas antigas, não descartando as máquinas-ferramentas hoje disponíveis no mercado e procurando adequá-las aos passos futuros que pretendem ser dados na área. O protótipo é composto por um Módulo de Edição para a modelagem da peça por meio de características da norma, um Módulo de Simulação com recursos gráficos para permitir a visualização e avaliação do modelo criado e um Módulo de Transmissão do código automaticamente gerado para execução na máquina-ferramenta.

A combinação das técnicas de representação por geometria sólida construtiva e enumeração de ocupação espacial, a partir de um conjunto de primitivas gráficas, mostrou-se adequada para a modelagem dos objetos. As primitivas foram combinadas para formar o objeto sólido resultante por meio de uma seqüência ordenada de operações Booleanas. Uma estrutura hierárquica, chamada árvore CSG, foi usada para controlar a aplicação das operações Booleanas.

6. REFERÊNCIAS

- Benouamer, M. O. and Michelucci, D., 1997, "Bridging the Gap between CSG and Brep via a Triple Ray Representation". Proceedings of the Fourth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, New York, NY, Estados Unidos, pp. 68-79.
- Brown, C. M., Requicha, A. A. G. and Voelcker, H. B., 1978, "Geometric Modelling Systems for Mechanical Design and Manufacturing". Proceedings of the 1978 Annual ACM Conference, New York, NY, Estados Unidos, ACM Press, pp. 770-778.
- Chang, T.-C., Wysk, R. A. and Wang, H.-P., 1998, "Computer-Aided Manufacturing", Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos, 748 p.
- Erhart, G., Tobler, R., 2000, "General Purpose Z-buffer CSG Rendering with Consumer Level Hardware". Relatório Técnico VRVis 003, VRVis Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschungs-GmbH.
- ISO 10303, "STEP Application Handbook - ISO 10303 - Version 3", International Boulevard. North Charleston, SC, Estados Unidos.
- ISO 14649, "Industrial automation systems and integration - Physical device control - Data model for computerized numerical controllers - Part 10: General process data", STEP Tools, Inc., Rensselaer Technology Park, Troy, NY, Estados Unidos.
- Ji, Q. and Marefat, M. M., 1997, "Machine Interpretation of CAD Data for Manufacturing Applications", ACM Computing Surveys, Vol. 29, Núm. 3, pp. 264-311.

- Leff, L. and Yun, D. Y. Y., 1986, "Constructive Solid Geometry: A Symbolic Computation Approach", Proceedings of the Fifth ACM Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, New York, NY, Estados Unidos, ACM Press, pp. 121–126.
- Leondes, C. T., 2001, "Computer Aided Design, Engineering, and Manufacturing: Systems Techniques and Applications", CRC Press, 368 p.
- Loffredo, D., "Fundamentals of STEP Implementation", Disponível em <http://www.steptools.com/library/fundimpl.pdf>.
Data de acesso: 29 de agosto de 2008.
- Mäntylä, M., 2003, "An Introduction to Solid Modeling", Computer Science Press, Rockville, MD, Estados Unidos, 401 p.
- Maziero, N. L., Ferreira, J. C. E., Pacheco, F. S. and Prim, M. F., 2000, "A Feature-Based Object-Oriented Expert System to Model and Support Product Design", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol 22, Núm. 4, pp. 523-543.
- Rosso Jr., R. S. U. and Newman, S. T., 2003, "Estrutura de Dados para Sistemas CAD/CAM Aderente à STEP", Proceedings of VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, pp. 1019-1024.
- Shiroma, Y., Kakazu, Y. and Okino, N. A., 1991, "Generalized Sweeping Method for CSG Modeling", Proceedings of the First ACM Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, New York, NY, Estados Unidos, ACM Press, pp. 149–157.
- Stewart, N., Leach, G. and John, S., 1998, "An Improved Z-Buffer CSG Rendering Algorithm", 1998 Eurographics/Siggraph Workshop on Graphics Hardware, pp. 25–30.
- Stewart, N., Leach, G. and John, S., 2003, "Improved CSG Rendering using Overlap Graph Subtraction Sequences", International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia - GRAPHITE 2003, pp. 47–53.
- Weck, M. and Wolf, J., 2001, "The STEP Compliant NC Programming Interface: Evaluation and Improvement of the Modern Interface", White paper presented in IMS Forum, Ascona, Switzerland.
- Zeid, I., 2005. "Mastering CAD/CAM", McGraw-Hill Inc., New York, NY, Estados Unidos, 947 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EDITOR AND SIMULATOR FOR MACHINE TOOL PROGRAMMING

João Walter Bruno Filho

Departamento de Informática, UFPR, Curitiba-PR, 81531-990

Hélio Pedrini

Instituto de Computação, UNICAMP, Campinas-SP, 13084-971

Dalberto Dias da Costa

Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba-PR, 81531-990

Abstract: *The activity of planning processes is of great importance for mechanical manufacturing, since it enables the rationalization of decisions in order to effectively produce parts to be machined in accordance with the design specifications. Thus, reduction of manufacturing time as well as material and labor cost becomes a key issue. International efforts have been made to promote greater integration related to design, process and manufacturing. One initiative is the use of a set of information, known as features, to describe the shape and attributes of a part. Traditional machine tools execute commands written in G/M language, which correspond to the machine axis movements and tool functions. The use of features allows the part machining through a sequence of high-level operations for the material removal. This paper describes the development of a prototype to aid the programming of machine tools. The main prototype modules include a part editor, a model simulator, and a code transmitter to the machine tool. The editing module allows the insertion of geometric parameters related to the features. After the editing process, the model can be visualized and evaluated by the user. Such model allows the generation of code (program) to be interpreted by the machine tool. The validation of the program is facilitated by means of a graphical simulator. The resources proposed for simulation are based on the graphical representation of the tool trajectory in a chosen plan. After verification of the program, the user can send it to the machine tool. For data transfer, RS-232C protocol has been used to provide the communication among the serial ports on the computer and the machine tool. The part model is described by the combination of two modeling techniques, constructive solid geometry and spatial partitioning from a set of graphical primitives such as cubes, cylinders, spheres, cones and ellipsoids. The primitives are combined to form a new solid object through an ordered sequence of Boolean operations. A hierarchical data structure is used to control the application of the Boolean operations.*

Keywords: *Machining, Machine Tools, Editor and Simulator, Geometric Modeling.*