

Desenvolvimento e avaliação de uma tecnologia de baixo custo para programação CNC em pequenas empresas

DALBERTO DIAS DA COSTA

ATHOS GLEBER PEREIRA

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Resumo

Apesar do grande desenvolvimento e disseminação da tecnologia de Comando Numérico (CN), a programação de máquinas-ferramenta ainda é uma tarefa difícil em algumas empresas. Este fato é confirmado pela baixa usabilidade de algumas interfaces CN e pela dificuldade de integrá-las aos sistemas a montante, por exemplo o CAD. Neste artigo, esse problema é tratado tendo como cenário pequenas empresas que ainda empregam a programação manual na fabricação de peças de baixa complexidade. Um protótipo de um *software* de baixo custo foi desenvolvido para possibilitar a programação CN baseada em microcomputadores. A implementação foi fundamentada em *features de programação* e dedicada à sintaxe de um comando comercial. Demonstrou-se que essa alternativa propicia uma grande redução de tempo quando comparada à programação manual. Além disso, sua curva de aprendizagem é extremamente reduzida em relação às tecnologias de ponta para manufatura, como por exemplo os sistemas CAM.

Palavras-chave

Gestão de tecnologias, usinagem e programação CNC.

Development and evaluation of a low cost technology for CNC programming in small companies

Abstract

Despite of the high development and dissemination of Numerical Control (NC), the programming of machine tools remains a hard task in some companies. This fact is confirmed by a low usability of some NC interfaces and the difficulty to integrate them to an upstream system, such a CAD one. In this paper we address this problem, taking with scenario small companies which still use manual programming and supply low complexity geometrical parts. For this group was developed a low cost software that allows a PC-based programming, instead of a direct one. This software was based on programming features and directed to a specific CNC syntax. It was demonstrated that the proposed alternative leads to a significant time reduction when compared to manual programming. Furthermore, its learning curve is smaller than that observed in high-end CAM's.

Key words

Technology management, machining and CNC programming.

APRESENTAÇÃO

Desde o surgimento do Comando Numérico (CN), em meados do século XX, diversas indústrias, em especial a aeronáutica e a automotiva, vêm auferindo ganhos significativos com a utilização dessa tecnologia. Sua aplicação no controle de máquinas-ferramenta permite a realização de tarefas repetitivas e de grande complexidade cinemática. Isto possibilita a reprodutibilidade de produtos de variadas formas geométricas. Além disso, empresas que produzem com alta diversificação e em pequenos lotes usufruem muito da flexibilidade inerente a esses equipamentos.

Apesar de não ter representado uma revolução nos processos de fabricação já conhecidos, pois não alterou o comportamento dos mesmos, a tecnologia CN, aliada a outros sistemas de informação, revolucionou o *modus operandi* nos sistemas de produção nos quais foi adotada. Essa revolução pode ser, de uma forma simplificada, avaliada pelo seu impacto no fluxo de informações dentro desses sistemas.

A tecnologia CN, associada à modelagem digital encontrada em sistemas CAD (Computer-Aided Design) e CAM (Computer-Aided Manufacturing), suporta em grande parte a transferência do modelo de um produto para a máquina com pouca intervenção humana, além de propiciar a substituição do meio de transmissão, papel ou verbal, para o eletrônico.

Essa pequena intervenção humana ainda se faz presente no planejamento da usinagem, atividade que ainda não foi automatizada, apesar dos enormes esforços da comunidade científica no desenvolvimento de sistemas CAPP's (Computer-Aided Process Planning) (YUEN *et al.*, 2003).

Essa revolução, propiciada por este tipo de tecnologia de informação, também pode ser avaliada pela substituição humana em atividades fabris. Outrora, em sistemas de manufatura complexos, empregavam-se várias pessoas em tarefas de projeto, desenho, conferência, arquivamento, interpretação, transferência, planejamento e execução. Atualmente, nesses mesmos sistemas empregam-se pessoas apenas nas tarefas de projeto e planejamento.

Apesar das tecnologias CAD-CAM-CN propiciarem essa revolução, fazendo-se uma análise espaço-temporal percebe-se que isso não ocorreu em todas as empresas de um mesmo segmento industrial. Seja por incapacidade de investir, ou por restrições impostas pela cadeia produtiva, algumas empresas ainda dependem fortemente da transmissão de informações em mídia escrita e falada.

Em um trabalho realizado entre empresas prestadoras

de serviços de usinagem (COSTA, 2001), observou-se que empresas consideradas fornecedores de terceira e quarta camada dentro da indústria automotiva, e metal-mecânica de um modo geral, ainda recebem desenhos de produtos impressos em papel e realizam a programação e (ou) operação de seus processos manualmente.

Isto contribui para a redução da competitividade dessas empresas, pois as impede de ascender na escala produtiva, tornando-se, por exemplo, fornecedores diretos em primeira ou segunda camada (FERRO, 2000).

Seja por incapacidade de investir, ou por restrições impostas pela cadeia produtiva, algumas empresas ainda dependem fortemente da transmissão de informações em mídia escrita e falada.

Uma alternativa freqüentemente recomendada para tais empresas é o investimento em tecnologias faltantes, por exemplo em sistemas CAM. Atualmente, pode-se encontrar uma extensa gama desse tipo de *software*, sendo que a maioria é dirigida aos processos de usinagem. Alguns são modulares, possibilitando ao usuário adquirir módulos de acordo com os processos de seu interesse, por exemplo, torneamento, fresamento ou eletroerosão. Outros são mais abrangentes e contemplam mais de um processo. Em alguns casos pode-se adquirir uma plataforma CAD-CAM completa. Essa última opção evita alguns aborrecimentos durante a transferência de dados entre sistemas de fabricantes diferentes.

Salvo algumas limitações de formatação, uma vez modelado o produto, pode-se escolher o processo de fabricação, entre aqueles disponibilizados pelo CAM, selecionar a máquina, informar a seqüência de fabricação, escolher ferramentas e condições de corte. A partir disso o sistema calcula, automaticamente, a trajetória das ferramentas, transferindo-as, na forma de um programa CN, para a máquina-ferramenta determinada *a priori*.

Esse conjunto de *softwares* (CAD-CAM-CNC) é condição necessária, porém não suficiente, para que uma dada empresa possa ter um sistema integrado de manufatura. Não obstante, esse “pacote tecnológico” propicia um diferencial competitivo.

Entretanto, o investimento em *softwares* CAM é muito elevado. Nesse investimento, destacam-se dois componentes: o preço de aquisição e o valor desembolsado em treinamento de pessoal. Este custo pode variar de acordo

com o número de módulos que compõe o sistema. Em alguns produtos isso pode superar a importância de U\$ 20.000,00 (PEREIRA, 2003).

A amortização desse investimento não começa após a aquisição do *software*, mas sim após a empresa poder contar com um funcionário apto a operá-lo. Preston *et al.* (1984) apresentaram uma curva de aprendizagem comparando processos realizados de maneira convencional e com auxílio de determinadas tecnologias CAD-CAM. Os referidos autores observaram vantagens do processo automatizado sobre o convencional ao final dos primeiros seis meses de utilização. O domínio completo sobre todas as funções disponíveis ocorreu somente após um período superior a dezoito meses.

Dentro do setor de prestação de serviços de usinagem, em várias ocasiões os clientes não dispõem de seus produtos no formato digital. Ao enfrentar tal problema o prestador de serviços tem de arcar com o custo da digitalização desse produto para poder usiná-lo com os recursos do CAM. Na fabricação de peças de elevada complexidade, por exemplo as cavidades de moldes, é possível transferir esse custo para o cliente. No caso de peças mais simples isto não é possível. Para contornar esse problema, o prestador opta, na maioria dos casos, por realizar uma programação manual da máquina CNC ou por usiná-las em equipamento convencional.

Diante desse contexto, propõe-se, como objetivo deste trabalho, a apresentação e validação de uma alternativa de baixo custo para a programação CNC em pequenas empresas prestadoras de serviços de usinagem.

Além dessa introdução ao problema, este artigo contempla ainda os seguintes assuntos: caracterização da programação CNC na fabricação de produtos considerados simples; caracterização das pequenas empresas prestadoras de serviços de usinagem; apresentação de um editor/simulador baseado no conceito de *features* para programação em 2 ½ eixos; apresentação e discussão dos resultados obtidos na avaliação da alternativa proposta em três empresas do setor; conclusões e referências bibliográficas.

PROGRAMAÇÃO CN EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

Tratando-se de processos de usinagem, a tecnologia CN (Comando Numérico) pode ser interpretada como um sistema de informação que transforma uma descrição geométrica do componente a ser usinado, a partir de uma entrada simbólica da mesma, no controle de posição e velocidade de um ou mais servomotores (PRESSMAN & WILLIAMS, 1977; CHANG, 1998). Basicamente, o Controle Numérico compreende o comando dos movi-

mentos de aproximação, avanço e recuo de uma ferramenta de corte, de forma similar ao definido na NBR 6162, 1989.

O desenvolvimento da tecnologia CN iniciou-se em 1949 no MIT (Massachusetts Institute of Technology) e teve como ponto de partida uma metodologia proposta por J. T. Parsons baseada em cartões perfurados. O primeiro protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente foi uma fresadora de três eixos (DEGARMO, 1997; PRESSMAN & WILLIAMS, 1977; GROOVER, 1984).

A programação, não obstante seu sucesso inicial, revelou-se um grande empecilho para os técnicos e operadores acostumados a realizar manualmente o controle das máquinas. Para minorar esse problema foi desenvolvida a linguagem APT (Automatically Programmed Tool), também no MIT. Dentre as vantagens dessa linguagem destaca-se a boa correlação da sintaxe dos comandos com a semântica de manufatura. Além disso, ela possibilita a definição de diversas entidades geométricas, tais como: pontos, linhas, planos, vetores, círculos, cilindros, troncos de cones, esferas, quádricas (parabolóides e elipsóides), splines e recursos para definição de superfícies esculpidas. De maneira similar ao que acontece em linguagens de alto nível (p. ex.: Fortran, Basic e Pascal), o usuário pode implementar *loops*, subprogramas e macros. Uma macro possibilita ao programador predefinir operações repetitivas empregando variáveis ao invés de valores fixos (PRESSMAN & WILLIAMS, 1977).

Para que um programa gerado com a linguagem APT ou similar possa ser executado num tipo particular de CN, torna-se necessário seu pós-processamento. Isto pode ser entendido como uma transformação da sintaxe APT para uma sintaxe proprietária, i.e., definida pelo fabricante do CN. Essa necessidade foi decorrente, e ainda se observa em alguns comandos, da pequena disponibilidade de memória para armazenar e processar programas (CHANG, 1998).

Apesar do elevado potencial da linguagem APT, aliado ao aumento da capacidade de memória e velocidade dos processadores modernos, verifica-se sua inexistência, ou de similares, em um número significativo de comandos comerciais. Vários sistemas modernos só permitem ao usuário a programação baseada em primitivas codificadas, tais como aquelas definidas como “Padrão G” (ISO 6983, 1982).

Dependendo do tipo de máquina-ferramenta e da quantidade de eixos comandados, o padrão G é suficiente para a fabricação de uma gama elevada de componentes mecânicos. Como exemplo, pode-se citar os tornos com apenas 2 eixos (X e Z), os quais permitem a obtenção de

várias formas geométricas definidas por superfícies de revolução. Outro exemplo, é de um centro de usinagem com três eixos comandados (X, Y, Z). Neste caso, comandando-se apenas dois eixos simultaneamente, e mantendo o terceiro em posição constante, pode-se usar uma infinidade de entidades geométricas, tais como: furos lisos, furos roscados, superfícies planas e contornos compostos por arcos de circunferência e segmentos de reta. A este tipo de programação dá-se o nome de programação em 2 ½ eixos (OMIROU, 2004; HATNA, 1998).

Entretanto, caso seja necessária a usinagem de superfícies mais complexas, como aquelas encontradas em cavidades para moldes para injeção e (ou) conformação, deve-se investir em sistemas computacionais mais sofisticados, tais como os *softwares* para CAM. Nestes, verifica-se uma maior implementação da linguagem APT. Destaca-se apenas que ao invés da utilização de uma sintaxe baseada em linguagem natural, como originalmente proposto, os sistemas CAM modernos empregam recursos gráficos baseados em *features de manufatura* (entidades geométricas associadas a um processo de fabricação). Além disso, o modelo geométrico pode ser recuperado diretamente de um sistema CAD, como comentado no tópico introdutório deste trabalho.

Apesar da programação baseada no padrão “G” ser muito antiga e estar em vias de desaparecimento, devendo ser futuramente substituída pela norma ISO 14649 (XU 2004; FORTIN, 2004), a quantidade de máquinas equipadas com interfaces baseadas na ISO 6983 ainda é a maioria.

Em resumo, pode-se dizer que existe uma enorme gama de produtos que pode ser usinada somente com a programação em 2 ½ eixos. Alguns autores estimam que essa quantidade pode ser superior a 80%, em se tratando de componentes mecânicos fabricados em grandes lotes (HATNA, 1998; EVERSHEIM, 1994). Isto pode ser feito em tornos e centros de usinagem programando-se apenas com os recursos do “Padrão G” definidos na norma ISO 6983. Como são geometrias simples, sua programação pode ser feita manualmente, i. e., utilizando apenas o editor fornecido pelo fabricante do comando. Neste caso, cabe ao programador o cálculo da trajetória da ferramenta e o conhecimento dos códigos “Gs” equivalentes.

PROGRAMAÇÃO CN EM PEQUENAS EMPRESAS PRESTADORAS DE SERVIÇOS DE USINAGEM

Em um estudo sobre a competitividade do setor de serviços em usinagem no Estado do Paraná (COSTA, 2001; COSTA, 2002) propôs-se uma classificação para essas empresas. Quatro categorias foram assim definidas:

- i) produção seriada – composta de empresas fornecedoras de lotes grandes, geralmente em séries, para o setor automotivo, principalmente, e eletroeletrônico;
- ii) ferramentarias – fabricação e montagem de moldes, matrizes e dispositivos para injeção, conformação, fundição e usinagem conforme modelo enviado pelo cliente;
- iii) manutenção – recuperação e (ou) fabricação de peças de grandes dimensões em pequenos lotes de acordo com desenho ou modelo fornecido pelo cliente; e
- iv) usinagem não-convencional – empresas que empregam processos de usinagem por *laser*, jato d’água, eletroerosão, eletroquímica ou fotoquímica.

A partir da análise de uma amostra de 65 empresas no ano 2000 (COSTA, 2001) e 50 no ano de 2001 (COSTA, 2002), observaram-se, no tocante ao uso da tecnologia CN, os seguintes aspectos:

- Acima de 20% das máquinas cadastradas estavam equipadas com tecnologia CNC. Isto corresponde a um percentual significativo quando comparado ao cenário nacional (ver GONÇALVES, 2001);
- Apenas 5% das empresas pesquisadas declararam que possuíam sistema CAM próprio. Dessas, todas se enquadravam na categoria de ferramentarias. Isto é explicado pela complexidade elevada de seus serviços;
- Observou-se que nas demais empresas a programação era, quase sempre, realizada manualmente, sem o auxílio de *softwares* para geração e transmissão de programas. Além disso, em várias empresas, o programador introduz o programa elaborado via teclado da máquina, o que implica em aumento do tempo de preparação (*setup*). Para trabalhos mais complexos é comum a terceirização da etapa de programação; e
- A programação manual é justificada, na opinião de empresários e técnicos, pela simplicidade dos programas elaborados e pela baixa capacidade de investimentos. Nestas empresas, o ambiente de programação pode ser caracterizado como “2 ½ eixos”.

A qualidade do ambiente de trabalho nas pequenas empresas, quando associada aos quesitos de conforto e ergonomia, pode ser considerada como precária. De um modo geral, a programação manual é realizada em um “chão de fábrica” com ruído elevado e em teclados montados em painéis verticais, o que, além de contribuir para a fadiga do programador, também prejudica a atividade mental requerida neste tipo de tarefa (PEREIRA, 2003).

Apesar de o cenário descrito acima estar limitado pelo aspecto geográfico, basicamente o Estado do Paraná, observa-se que a programação manual não está relacionada somente com o porte da empresa, mas sim com a complexidade das peças a serem usinadas. Vonortas e Xue (1997) indicaram esta característica em um levanta-

mento realizado em pequenas empresas americanas do setor de usinagem. Além disso, eles constataram também que o grupo pesquisado não apresentava dificuldades de investimento em tecnologia CNC e CAM, o que contrasta com o cenário paranaense, onde a baixa quantidade de sistemas CAM adquiridos está relacionada com as limitações financeiras das empresas.

Um outro aspecto destacado no trabalho de Vonortas e Xue (1997) é o papel importante exercido pelas pequenas empresas, que fazem uso da programação manual, sobre o processo de melhoria contínua da tecnologia CN.

Nesta mesma linha de raciocínio, Djassemi (1998) e Abbas (2004) defendem que um bom comando numérico deve prover recursos para que o usuário possa desenvolver macros (ciclos fixos) para facilitar a programação manual. Na avaliação de Abbas (2004), por exemplo, isto implica em uma redução superior a 50% do tempo de programação.

Adamczyk (2000) apresentou alguns aspectos relacionados com a dificuldade de implementação dos atuais sistemas CAM em pequenas e médias empresas. Segundo o autor, além do elevado investimento inicial, a adoção dessa tecnologia, a qual ele denominou de “Monolithic applications”, implica nas seguintes limitações:

- i) dificuldade de integração em empresas com elevada diversificação de máquinas (comandos muito diferentes);
- ii) elevado custo de manutenção e atualização; e
- iii) número elevado de funções, porém com baixo uso devido à simplicidade do *mix* de produção.

Em resumo, pode-se dizer que existe uma enorme gama de produtos que pode ser usinada somente com a programação em 2 ½ eixos.

O referido autor propõe como alternativa um sistema denominado KSP-OSN/WIN desenvolvido basicamente para a programação em 2 ½ eixos. Segundo ele, o referido sistema pode ser executado em ambiente de redes (Internet ou Intranets) e as empresas usuárias não precisam investir na aquisição do *software*, mas sim no pagamento pelo tempo de uso. Além disso, a arquitetura do sistema facilita a formação de uma rede de pequenas e médias empresas que poderão atuar em um ambiente integrado. Neste caso, elas poderão compartilhar bases de dados e macros de programação desenvolvidas pelos seus integrantes.

A metodologia apresentada a seguir baseia-se na proposição de que ainda existe uma lacuna entre o elevado

investimento em sistemas CAD-CAM e a baixa produtividade da programação manual. Essa lacuna pode ser preenchida com a criação de sistemas computacionais simples, que apesar de não disporem dos recursos gráficos e matemáticos para a geração de trajetórias em superfícies, tais como aqueles observados nos sistemas CAM modernos, podem auxiliar o programador a editar, avaliar e transmitir programas para a usinagem de uma família extensa de peças cuja cinemática de usinagem esteja contida na movimentação simultânea de apenas dois eixos.

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM EDITOR E SIMULADOR PARA PROGRAMAÇÃO EM 2 ½ EIXOS

Independentemente da técnica a ser adotada, a elaboração de um programa CN deve passar pelas seguintes etapas: edição, simulação e transmissão do código para a máquina. O sistema aqui proposto compreende, basicamente, estes três recursos, como pode ser visto na representação esquemática apresentada na Figura 1.

O primeiro bloco representa o editor, que propicia ao usuário a edição de um programa a partir do acesso aos ícones gráficos relacionados com as *features* de programação. Após a edição, o programa deve ser depurado. Essa depuração é feita com o auxílio de um simulador gráfico para um dado plano geométrico. Após a verificação do programa, o usuário poderá transmitir o mesmo para o comando da máquina-ferramenta. Neste caso, adotou-se o protocolo RS-232C como meio de transferência de dados entre as portas seriais do computador e da máquina. Apresenta-se a seguir uma descrição de cada um desses blocos, os quais constituem os módulos do sistema.

Edição de Programas

A norma brasileira NBR 6162 (1989) define seis tipos de movimentos fundamentais na definição dos processos de usinagem. No contexto da programação, pode-se reduzi-los, sem perda significativa, a três tipos: o movimento de corte, o de posicionamento e o de avanço.

A definição das direções e velocidades desses três movimentos é, em essência, o conteúdo de um programa CN. De um modo geral, o movimento de posicionamento é sempre retilíneo e executado com a velocidade máxima disponível na máquina, cabendo ao programador apenas a tarefa de determinar sua direção, o que é feito pela informação das coordenadas do ponto final.

No caso de centros de usinagem, ou fresadoras, o movimento de corte é sempre resultante do movimento circular da ferramenta, definido pelo sentido (horário ou

anti-horário) e pela velocidade. Para a programação em 2 ½ eixos, o movimento de avanço resulta das interpolações lineares – a trajetória é um segmento de reta – e (ou) circulares onde a ferramenta descreve um arco ou um círculo completo. Na interpolação linear deve-se informar a velocidade e as coordenadas do ponto final. No movimento circular informa-se, além da velocidade, o centro do arco (ou círculo) e as coordenadas do ponto final.

Baseando-se nisso pode-se definir um conjunto de 05 primitivas de programação, as quais se encontram de acordo com as definições da ISO 6983-1 e são apresentadas na Tabela 1.

Entretanto, na maioria dos casos práticos, os programas baseados apenas nas primitivas apresentadas na ta-

bela 1 são muito extensos e, quando feitos manualmente, implicam em um grande dispêndio de tempo, além do aumento da possibilidade de erros. Dessa forma, os CNs comerciais dispõem de macros de programação, também chamadas “ciclos fixos”, as quais compreendem uma seqüência lógica de várias primitivas. Um exemplo disso é a macro para furação, geralmente representada pelo código “G81” na maioria dos comandos.

O módulo de edição ainda possui recursos geométricos que permitem, por exemplo, a compensação do raio da ferramenta nas operações de fresamento de contornos. Além disso, possibilita também a inclusão de funções miscelâneas e auxiliares para a realização de operações secundárias, tais como: o controle do fluido de corte e a troca de ferramentas.

Figura 1: Fluxograma do sistema proposto.

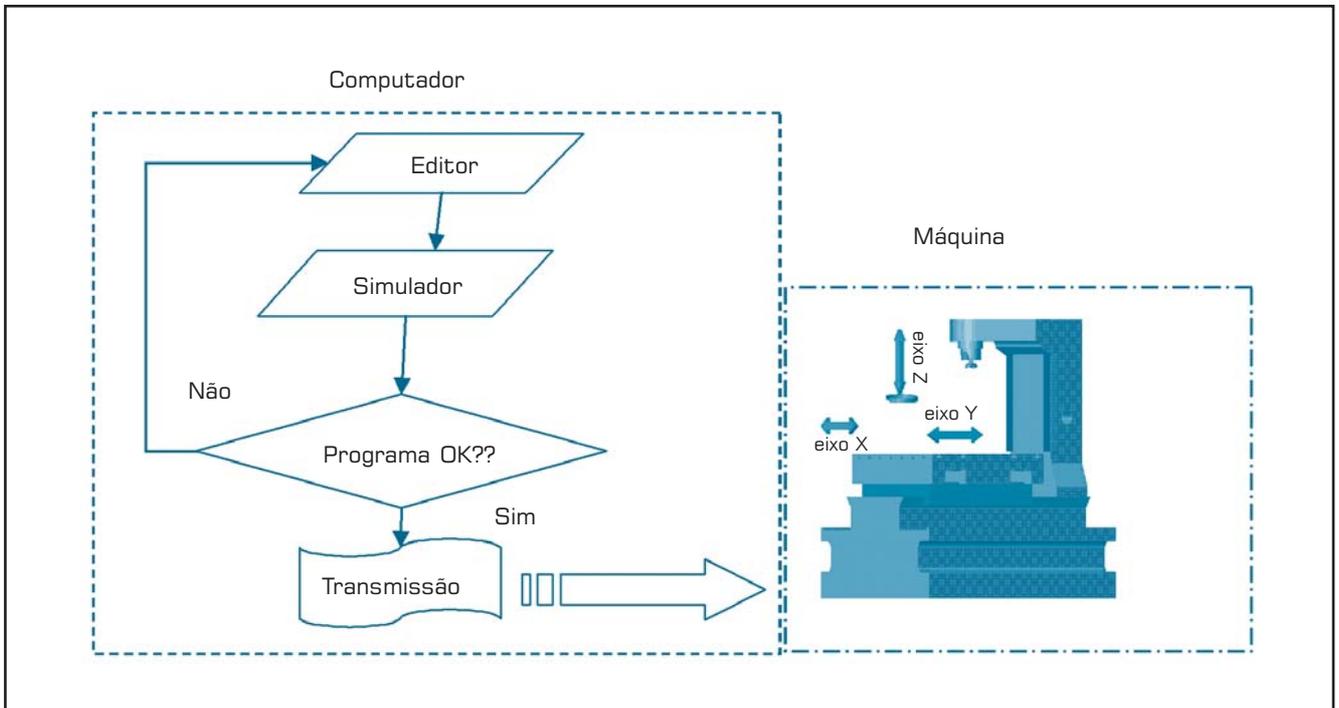


Tabela 1: Trajetórias e códigos de programação dos movimentos de usinagem.

MOVIMENTO		CÓDIGO ISO	TRAJETÓRIA	VELOCIDADE
Corte		—	horário	M3
			Anti-horário	M4
Posicionamento		G0	$X_f Y_f Z_f$	—
Avanço linear		G1	$X_f Y_f Z_f$	F
Avanço circular (no plano “X-Y”)	horário	G2	$X_f Y_f IJ$	F
	Anti-horário	G3	$X_f Y_f IJ$	F

O editor aqui proposto é baseado em “*features de programação*” relacionadas diretamente com as primitivas apresentadas na Tabela 1 ou com suas combinações. Essas *features* devem ser representadas por ícones gráficos, para os quais são criados “formulários” contendo campos que deverão ser preenchidos pelo usuário de acordo com a seqüência de usinagem.

O que se defende aqui é que o uso de recursos gráficos associados com campos pré-definidos reduz a necessidade de memorização de códigos, os quais são desprovidos de semântica, e elimina erros de sintaxe de programação.

Simulação gráfica dos programas

Os recursos de simulação propostos aqui são muito simples e baseiam-se na representação gráfica da trajetória das ferramentas em um plano escolhido. Essa trajetória está sempre relacionada com o centro da ferramenta e não propicia nenhum tipo de correção em função do diâmetro da mesma. Na simulação de macros de furação, um círculo correspondente ao diâmetro do furo é gerado quando o plano de simulação escolhido contiver a secção transversal do mesmo.

Observou-se que, nas demais empresas, a programação era, quase sempre, realizada manualmente, sem o auxílio de *softwares* para geração e transmissão de programas.

Para a geração de uma trajetória corrigida, isto é, que inclua a compensação do diâmetro da ferramenta, caberá ao usuário incluir as funções de programação disponibilizadas pelo comando no momento da edição.

Os movimentos de posicionamento e avanço são identificados com cores diferentes com o intuito de facilitar a visualização da simulação. O movimento de avanço pode ser composto de retas e (ou) arcos, dependendo do contorno a ser gerado. Por outro lado, o movimento de posicionamento será sempre em trajetória retilínea.

Nos movimentos de posicionamento e avanço linear, uma reta é gerada a partir do ponto atual da ferramenta até as coordenadas do ponto final no plano de simulação escolhido. Para as interpolações circulares, executa-se um pré-processamento para converter as informações iniciais do arco (coordenadas do centro, sentido e coordenadas do ponto final) em raio, arco inicial e arco final. Isto é proposto tendo como base a estrutura mais usual para a implementação computacional.

Na simulação das macros (ou ciclos fixos) faz-se tam-

bém um pré-processamento para decompô-las em uma seqüência de primitivas de programação (G0, G1, G2/G3).

As funções auxiliares, ou aquelas que não implicam em movimentos, são ignoradas durante a simulação. Deve-se observar que não existe a necessidade de se efetuar uma avaliação da sintaxe do programa durante a simulação, pois isto está implícito no preenchimento dos formulários associados às *features de programação*. A representação esquemática do algoritmo para simulação é apresentada na Figura 2.

Transferência de programas

O objetivo da criação de um módulo para a transferência direta de programas é a redução do tempo, quando comparado à introdução via teclado da máquina, e a eliminação de eventuais erros de digitação. Em grande parte dos comandos comerciais ainda se faz necessária a parada do processo e a preparação da máquina para o modo de recepção antes que a transferência possa ser feita. Apesar disso, pode-se considerar, dada a velocidade de transmissão, que o tempo total é drasticamente reduzido com o auxílio deste recurso.

De um modo geral, as máquinas atuais dispõem de outras interfaces para transferência de dados, além da porta serial RS232. Entretanto, devido a sua grande disseminação, optou-se pela utilização da mesma no desenvolvimento do módulo de transferência.

Os parâmetros de comunicação, tais como velocidade, paridade, tamanho de palavra, *bits* de parada, modo de transferência e o número da porta serial devem ser previamente definidos pelo usuário. O arquivo a ser transmitido deve conter apenas caracteres ASCII e possuir tamanho compatível com a memória disponível na máquina.

Implementação

A tecnologia de baixo custo aqui proposta foi implementada com o intuito de reduzir o tempo de programação e, por conseguinte, reduzir o custo dos processos de usinagem, quando comparados àqueles observados em empresas que ainda fazem uso da programação manual.

Além disso, procurou-se dirigir a implementação para um comando nacional e ainda muito utilizado nas empresas do setor metal-mecânico, o ROMI MACH9-MP utilizado em centros de usinagem verticais. Não obstante, esta especificidade da metodologia aqui proposta não a invalida na geração e simulação de programas formatados de acordo com o padrão ISO (ISO 6938-1).

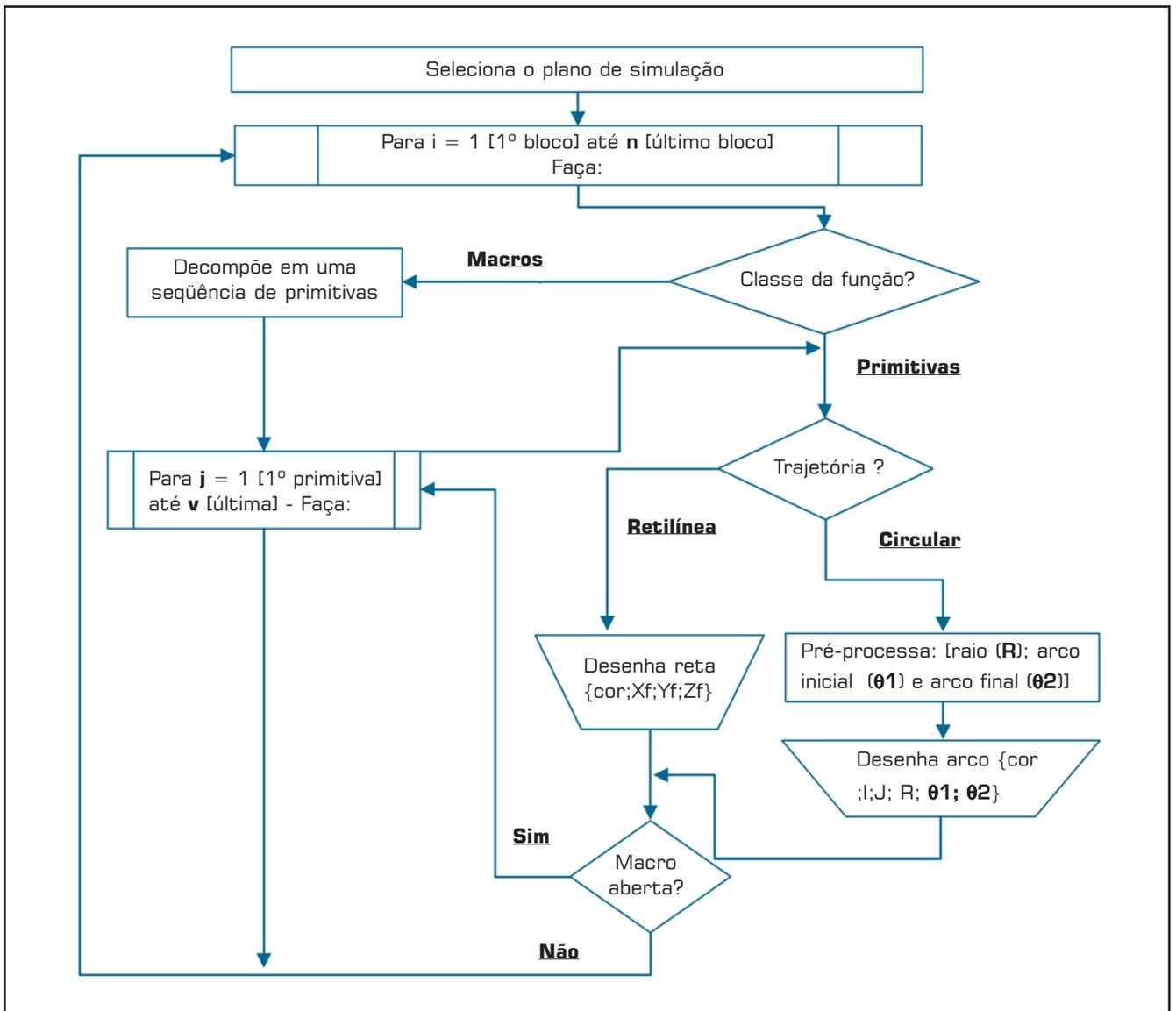
Outra característica desta implementação foi a preocupação com a utilização de recursos gráficos. Inicialmente foram propostas duas abordagens complementares. A primeira, a qual já faz parte do protótipo apresentado a seguir, baseia-se no uso de ícones gráficos relacionados com as principais funções de programação, tais como aqueles apresentados na Figura 3. Na segunda abordagem, a ser finalizada futuramente, utilizar-se-á o conceito de *features* de usinagem, especificamente *features* de furação, mandrilamento e fresamento. Segundo Shah (1992), *features* são formas genéricas para as quais pode-se associar um conceito de engenharia ou, como neste caso, um código CN para usinagem.

Adaptando-se recursos já existentes, tais como a ferramenta RAD (MS-Visual Basic® baseada na linguagem “basic”) e um módulo para comunicação serial, o MSCOMM® do Windows®, implementou-se um protótipo para edição, simulação e transmissão de programas CN dirigido ao Comando Romi Mach-9®. Como pode ser visto na Figura 3, toda a interface é baseada em ícones associados às primitivas e algumas macros de programação.

Além das funções “Gs”, criou-se também ícones representativos para as funções auxiliares e miscelâneas, o que permite o desenvolvimento de um programa completo.

O protótipo propicia boa usabilidade e incorpora todos os recursos gráficos disponíveis no sistema operacional

Figura 2: Fluxograma do processo de simulação.



Windows®, tais como o *mouse*, janelas do tipo *pull-down*, caixas de diálogo, barras de menu, etc. A implementação foi dividida, conforme a metodologia proposta, em três módulos básicos: edição, simulação e transferência.

No módulo de edição, ao invés de memorizar o léxico e a sintaxe da linguagem de programação, o programador faz uso dos ícones (elementos gráficos) associados às funções primitivas e ciclos fixos. Para uma utilização satisfatória dessa interface o usuário deverá possuir, além dos conhecimentos relacionados aos processos de usinagem, domínio sobre os comandos básicos do sistema operacional Windows®. Esses comandos resumem-se à utilização de barras de rolagem, navegação com o auxílio do *mouse*, ou via teclas de atalho, abrir, gravar e imprimir arquivos, conforme apresentado na Figura 3.

O lado esquerdo da tela de edição (ver Figura 3) contém os ícones representativos das diversas *features de programação*, relacionadas com as funções primitivas e as macros. O usuário poderá ter acesso às outras fun-

ções de programação, bastando acionar as fichas “MISCELÂNEAS” E “AUXILIARES”.

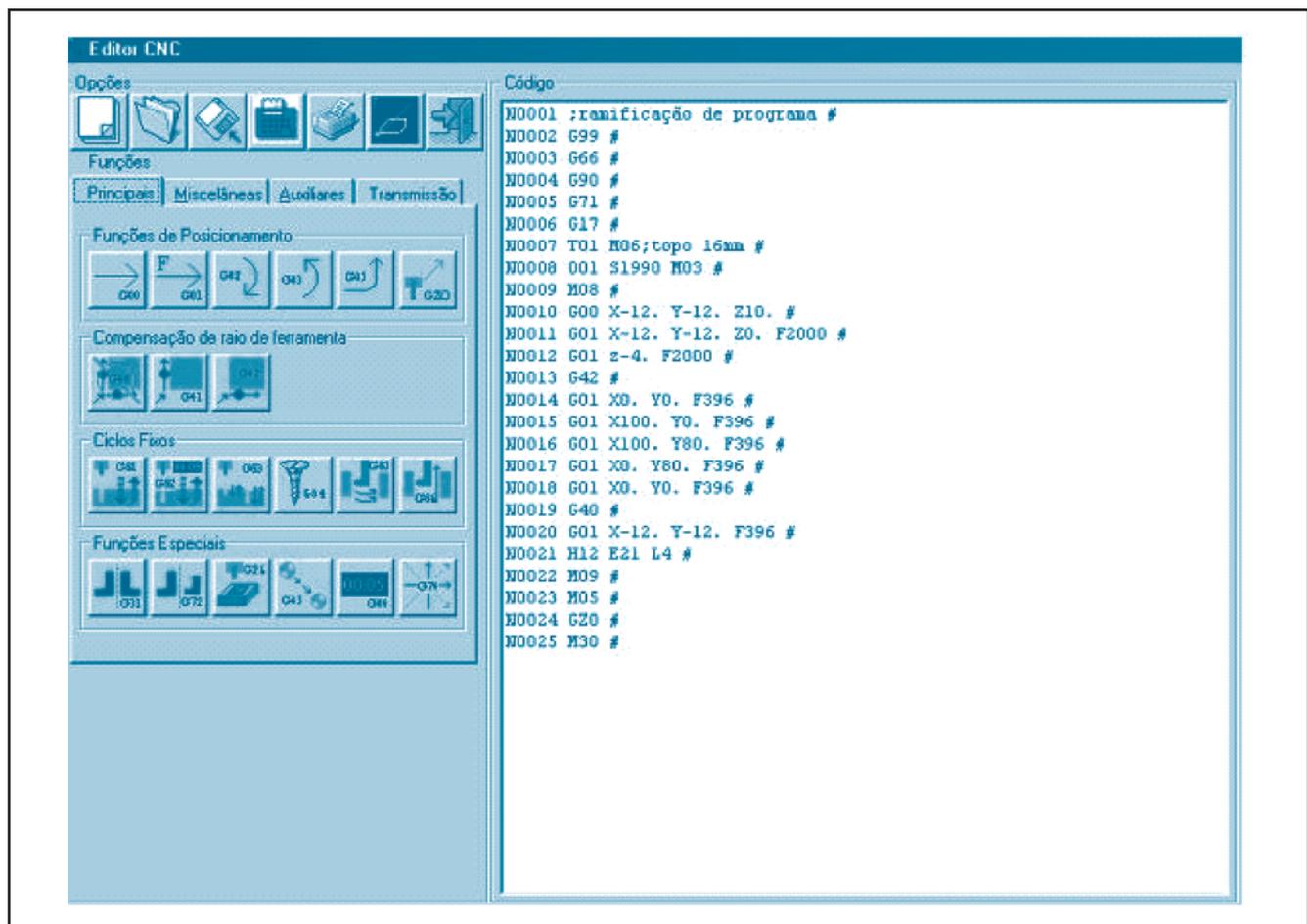
Para cada ícone associou-se uma caixa de diálogo contendo as instruções necessárias para a programação da respectiva *feature de programação*. A Figura 4 contém, como exemplo, a tela de preenchimento para programação de um movimento rápido (G00).

Terminada a etapa de edição, conforme apresentado no lado direito da Figura 3, o programador poderá, a seu critério, realizar a simulação gráfica do programa.

A visualização da trajetória da ferramenta acontece apenas em duas dimensões, de forma similar ao simulador gráfico existente no Comando MACH9-MP. A Figura 5 contém uma ilustração desse recurso gráfico.

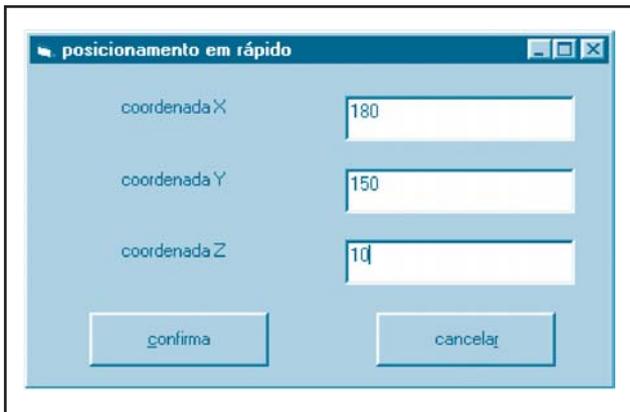
Após a edição e simulação gráfica de um programa, pode-se imprimi-lo, gravá-lo em disco ou transmiti-lo diretamente para o *buffer* ou memória da máquina-ferramenta. Esta última opção é muito importante pois contribui para a redução do tempo de preparação. Neste módulo,

Figura 3: Módulo de Programação.



o envio do programa CN para a memória da máquina é feito via interface serial RS 232C a uma distância inferior a 10 metros e com uma taxa de transmissão de 9600 bytes por segundo. A transmissão, nos dois sentidos, pode ser feita para qualquer máquina-ferramenta, após a definição dos parâmetros de comunicação, conforme apresentado na Figura 6. No caso de recebimento de programas existentes no CNC, o usuário poderá, após o recebimento dos mesmos, gravá-los no computador.

Figura 4: Caixa de diálogo para a função posicionamento em rápido.



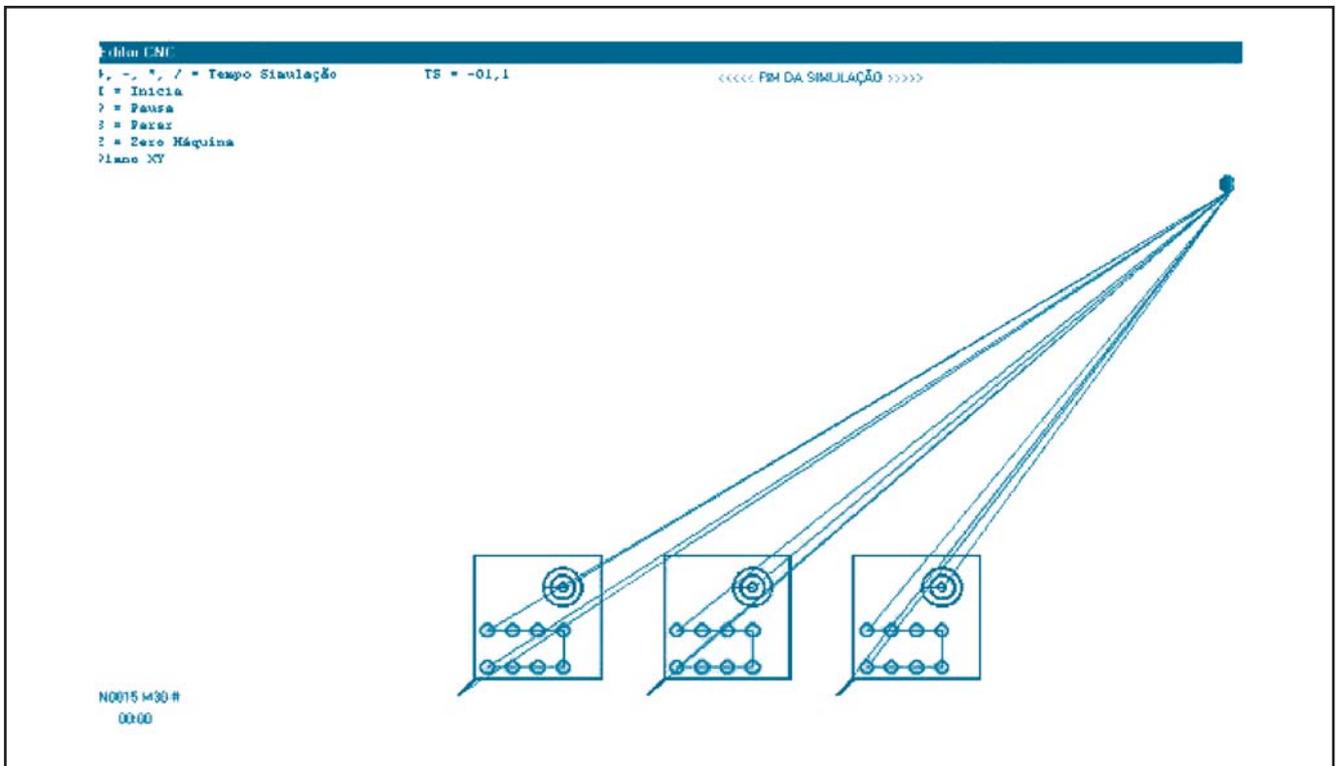
AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

O objetivo desta avaliação foi verificar se o protótipo implementado poderia contribuir na redução do tempo de elaboração e testes de programas CN e, por conseguinte, reduzir tempos de preparação em ambientes fabris. A avaliação foi realizada em três etapas:

Figura 6: Tela de comunicação Comando Numérico — Microcomputador.



Figura 5: Tela de simulação.



- i) seleção de empresas que atendessem a um determinado perfil;
- ii) treinamento de técnicos dessas empresas e avaliação de seus desempenhos; e
- iii) teste do protótipo no chão de fábrica.

As empresas foram pré-selecionadas a partir de uma base de dados sobre prestadores de serviços de usinagem no Estado do Paraná (ver COSTA, 2001) e também disponível no site www.usidados.com.br. Em um primeiro momento, foi enviada a essas firmas uma carta-convite para participação desta avaliação. Dentre as respondentes, selecionaram-se aquelas que atenderam aos seguintes requisitos:

- 1- possuir em seu parque fabril no mínimo um centro de usinagem marca Romi, equipado com o comando MACH9-MP;
- 2- disponibilizar técnicos para participarem do treinamento;
- 3- permitir a utilização de seus centros de usinagem para testes práticos.

Dentre as empresas convidadas, seis responderam e indicaram os técnicos para o treinamento durante 5 dias, perfazendo um total de 20 horas.

O treinamento foi realizado tendo apenas o protótipo como material didático. Um questionário foi aplicado antes e após o treinamento com os seguintes quesitos de avaliação: familiaridade com microcomputadores; conhecimentos prévios sobre o sistema operacional Windows®; experiência em processos de usinagem; experiência em programação CNC; e desempenho na utilização do protótipo.

A avaliação do protótipo no chão de fábrica foi realizada em apenas três empresas, denominadas aqui simplesmente de empresas A, B e C. Nestas escolheram-se componentes cuja produção era realizada em centros de usinagem com programação em apenas 2 ½ eixos. O teste prático foi conduzido nas seguintes etapas:

- 1- Selecionar peça da linha de produção;
- 2- Confeccionar o programa manualmente;
- 3- Digitar o programa utilizando apenas a interface da máquina;
- 4- Registrar tempos;
- 5- Confeccionar o programa com auxílio do protótipo;
- 6- Enviar programa via RS232;
- 7- Registrar tempos; e
- 8- Comparar os tempos gastos no processo manual em relação àqueles obtidos com auxílio do protótipo.

A empresa A é uma empresa dedicada à produção de peças automotivas, comercializadas como “segunda linha” para equipamentos do setor automotivo. Seu par-

que de usinagem conta com as seguintes máquinas-ferramenta:

- 3 centros de usinagem CNC;
- 3 mandriladoras CNC;
- 9 tornos CNC;
- 3 fresadoras convencionais;
- 1 brunidora;
- 1 mandriladora convencional; e
- 8 retificadoras.

Essa empresa possui sistema integrado de projetos via CAD/CAM e DNC (Direct Numerical Control) para transferência de programas para as máquinas, mas faz uso, também, da programação manual.

A peça escolhida, ver Figura 7, é utilizada em caixas de transmissão de máquinas para terraplanagem. Essa peça foi usinada em quatro etapas descritas a seguir:

- 1- Desbaste do canal central largura 15 mm e profundidade 10 mm;
- 2- Acabamento do canal;
- 3- Furação de centros; e
- 4- Usinagem dos furos com broca helicoidal $\phi 12$ mm.

As ferramentas utilizadas foram:

- 1- fresa de topo diâmetro 12 mm para desbaste e acabamento do canal; e
- 2- broca helicoidal de aço rápido $\phi 12$ mm e broca de centro.

A velocidade de corte (V_c) e a velocidade de avanço (V_f) empregadas foram:

- 1- Para desbaste: $V_c = 150$ m/min e $V_f = 700$ mm/min
- 2- Para acabamento: $V_c = 180$ m/min e $V_f = 500$ mm/min
- 3- Para as furações: $V_c = 45$ m/min e $V_f = 100$ mm/min

A empresa B é de pequeno porte e também usina produtos automotivos. Ela produz um sistema completo de freios para carretas e caminhões. Além desse produto, ela realiza também serviços de usinagem para terceiros. Atualmente, encontram-se em seu parque fabril:

- 6 tornos CNC;
- 1 centro de usinagem CNC;
- 4 fresadoras convencionais;
- 2 rosqueadeiras automáticas; e
- 2 retificadoras.

Nesta empresa, a programação é feita de modo totalmente manual, já que a mesma não possui sistema CAD/CAM/DNC. Por este motivo, a memória da máquina CN estava constantemente cheia, obrigando o programador a apagá-la antes de inserir um novo programa. Para a realização dos testes foi necessário instalar o protótipo em um microcomputador disponível no almoxarifado da

empresa, confeccionar o cabo e configurar os parâmetros de comunicação.

A peça escolhida para o teste, ver Figura 8, foi usinada nas seguintes etapas:

- 1- Fresamento do canal com largura de 10 mm e profundidade de 3 mm;
- 2- Furação com $\phi 7$ mm;
- 3- Execução do furo com $\phi 19$ mm.

As ferramentas utilizadas foram:

Para o canal: fresa de topo f10mm;

Para os furos $\phi 7$ mm: broca de centro e broca helicoidal 7 mm;

Para o furo $\phi 19$ mm: broca de centro, broca helicoidal e alargador $\phi 19$ mm.

A empresa C é de pequeno porte e se dedica exclusivamente à usinagem para terceiros. Seu parque fabril conta

Figura 7: Peça avaliada na empresa "A" denominada Garfo.

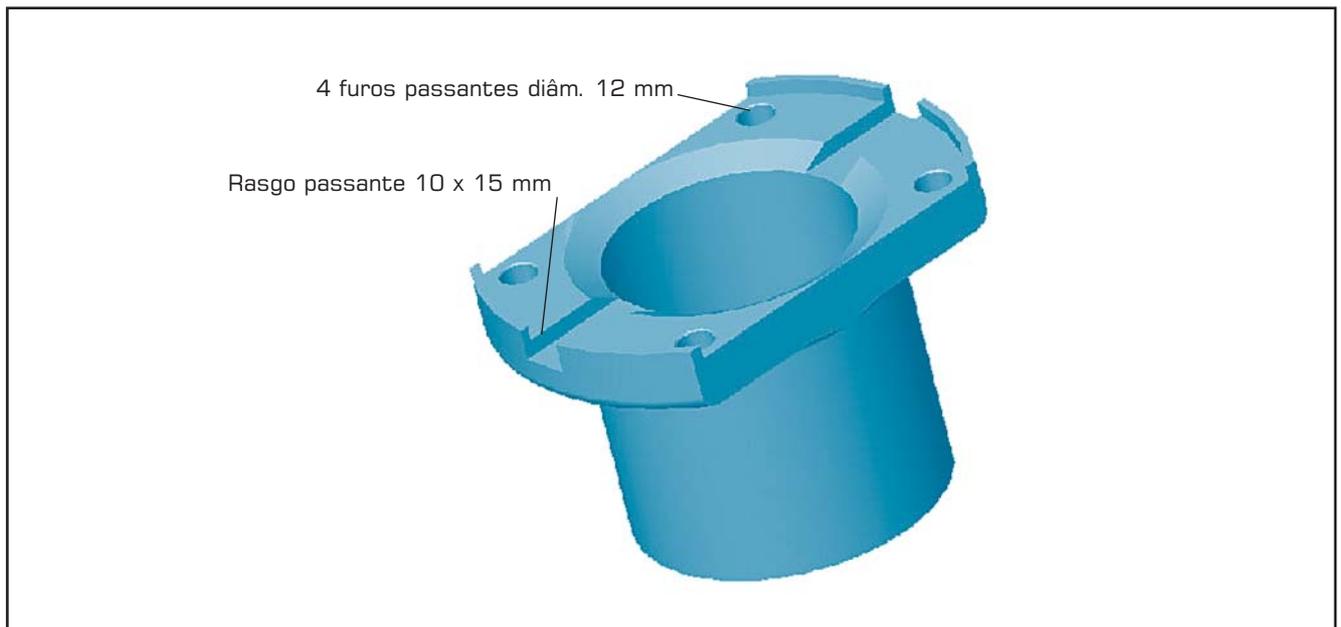
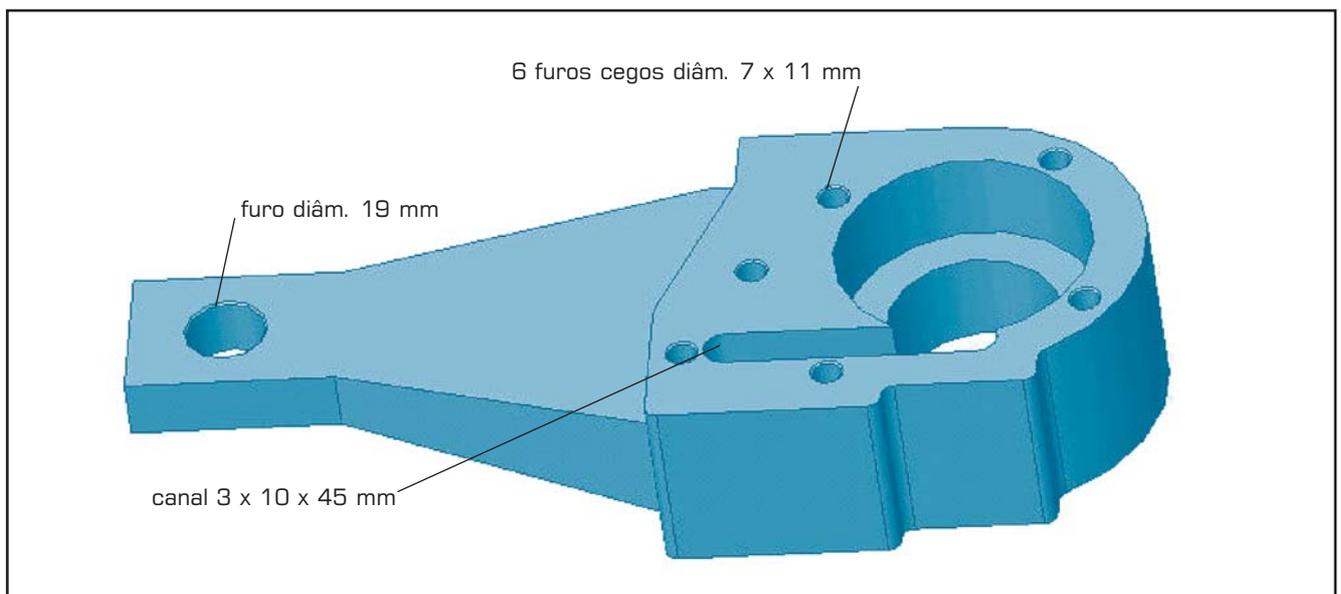


Figura 8: Peça usinada na empresa "B" - Carcaça 3069.



apenas com um centro de usinagem CNC e máquinas convencionais: fresadoras, tornos, retificadoras e furadeiras. A empresa não possui sistema CAD/CAM. Toda a programação é feita em papel e posteriormente digitada na máquina. O programador possui grande experiência tanto em programação, quanto na utilização de microcomputadores.

A peça escolhida, aqui denominada “tampa”, pode ser vista na Figura 9.

As etapas de usinagem foram as seguintes:

- 1- Faceamento da superfície;
- 2- Execução dos furos com $\phi 3$ mm;
- 3- Execução da usinagem do contorno da peça;
- 4- Usinagem da cavidade.

As ferramentas utilizadas foram:

- 1- Para a superfície: fresa de facear $\phi 63$ mm;
- 2- Para os furos $\phi 3$ mm: broca de centro e broca helicoidal 3 mm;
- 3- Para o contorno e a cavidade: fresa de topo $\phi 8$ mm.

Análise dos Resultados

Os resultados discutidos a seguir referem-se, primeiramente, à etapa de treinamento e, por último, aos testes realizados dentro das empresas.

Ao final do treinamento, os seis participantes foram avaliados individualmente, de acordo com os quesitos

propostos anteriormente. Os resultados são apresentados graficamente nas Figuras 10 a 13. Observa-se que, com exceção dos participantes 2 e 6 (Figura 10), os demais possuíam experiência igual ou superior a 12 meses na elaboração de programas. No quesito “experiência na utilização de microcomputadores” (Figura 11), verifica-se que metade do grupo tinha pouco, ou nenhum, contato com este tipo de tecnologia. Isto implicou em um aumento do tempo de aprendizagem do protótipo. Os participantes que declararam e demonstraram experiência em microcomputadores possuíam-na em outros sistemas para edição e simulação de programas CNC, como pode ser visto na Figura 12. Apesar da grande heterogeneidade do perfil dos participantes no tocante ao uso das tecnologias básicas – programação CNC e microcomputadores – observou-se que o desempenho do grupo, ver Figura 13, foi bom. Essa avaliação foi feita via exercícios propostos aos alunos e por uma ficha de auto-avaliação fornecida ao final do treinamento.

Em resumo, pode-se afirmar que o protótipo possui boa usabilidade até para usuários inexperientes. Isto conduz a uma curva de aprendizagem pequena, quando comparada àquela observada em softwares CAM de alto desempenho (PRESTON *et al.*, 1984).

Os resultados dos testes realizados nas empresas foram sintetizados em “tempos para programação manual” e “tempos para programação com auxílio do protótipo” conforme Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Comparando as duas formas de programação avaliadas, observa-se um maior tempo na etapa “elaboração de programas” com auxílio do protótipo. Entretanto, nas etapas de “transmissão e depuração de erros” o protótipo apresenta vantagem significativa em relação à técnica de programação manual adotada nas três empresas. Durante os testes foi constatado também que o tempo de montagem do programa de usinagem utilizando o protótipo poderá ser reduzido drasticamente à medida que o usuário se habitua com seu ambiente de edição e simulação.

Na empresa “A” a máquina esteve parada por 27 minutos para a inserção manual do programa na memória e para a realização dos testes. Utilizando-se o protótipo este tempo foi de apenas 7 minutos, propiciando uma redução superior a 3,8 vezes.

Nos testes realizados na empresa “B”, o programador demonstrou pouca familiaridade com os recursos da máquina. Isto implicou na elaboração de um programa extenso, baseado apenas nas funções primitivas, tais como as interpolações lineares e circulares. Para a referida peça, ver Figura 8, exige-se a aplicação de ciclos fixos para as operações repetitivas de furação. O emprego de sub-rotinas ou subprogramas também implicaria em redução do tempo de programação. Entretanto, essas técnicas

Figura 9: Peça avaliada na empresa “C”.

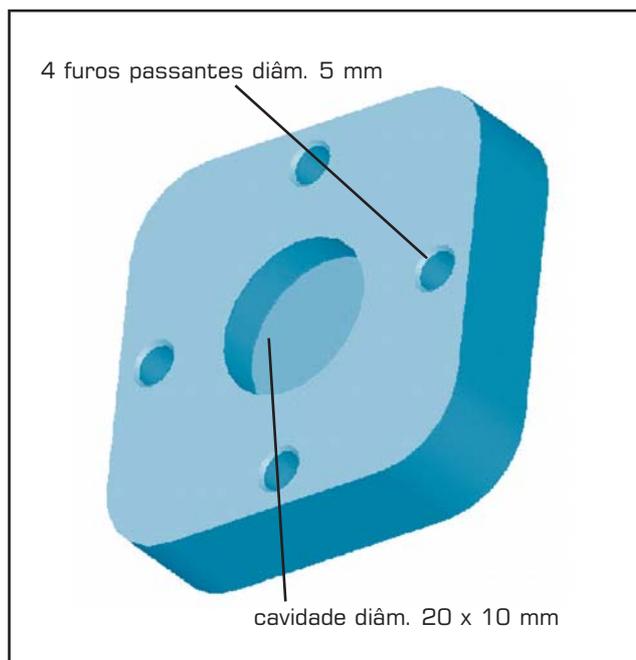


Figura 10: Tempo de experiência em programação, em meses, para cada um dos participantes.

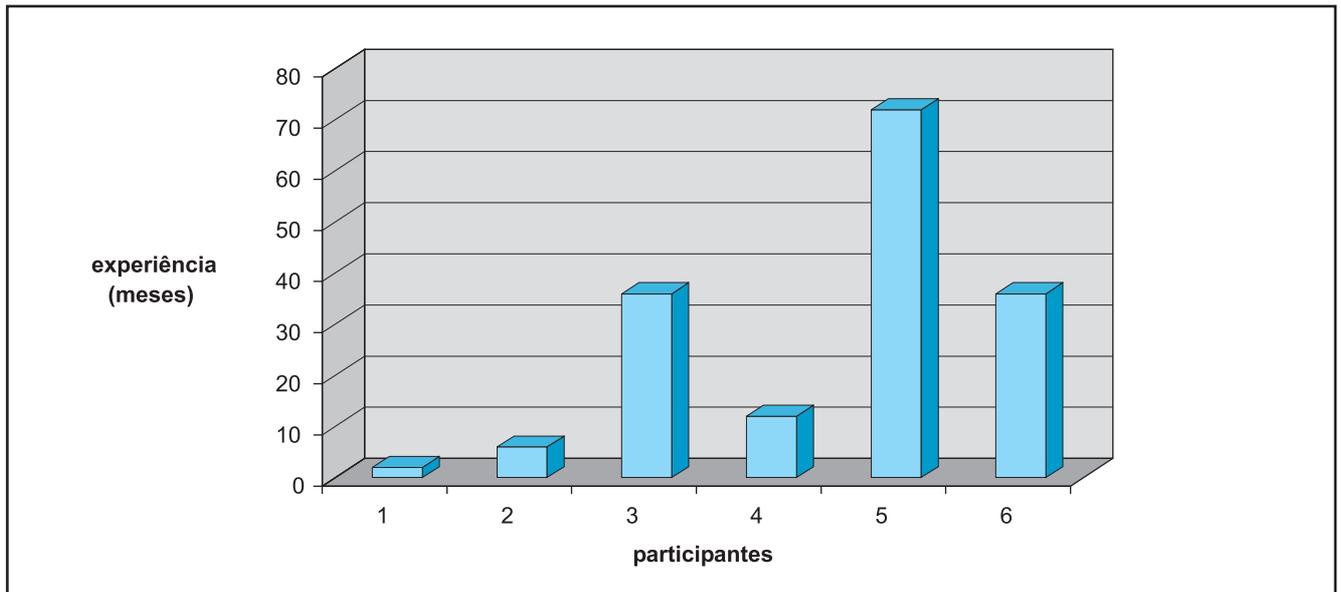


Figura 11: Experiência na utilização de microcomputadores.

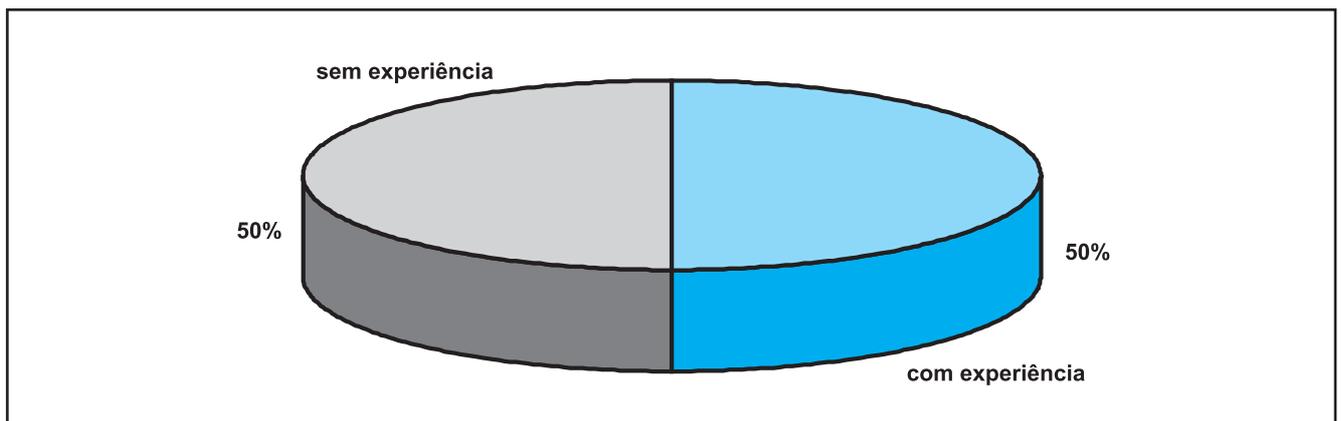
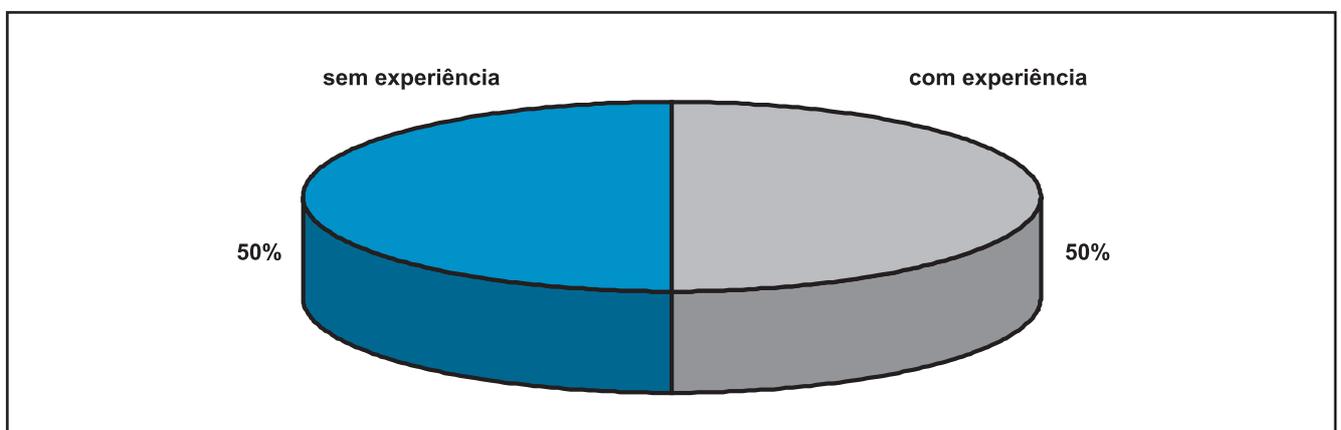


Figura 12: Experiência na utilização de outros softwares para simulação de programas CNC.



cas eram desconhecidas. Além disso, o programador ainda apresentava dificuldades na utilização do sistema operacional Windows®. Não obstante, observa-se que o simples fato de poder transmitir, via RS232, o programa do computador para o comando implicou, nessas circunstâncias, em uma redução significativa no tempo de máquina parada.

Na empresa “C”, constatou-se, novamente, a importância de eliminar a tarefa de digitação do programa diretamente na interface da máquina. Observa-se que esta etapa contribuiu significativamente para o aumento do tempo de preparação, pois a máquina permanece parada durante todo o processo de digitação.

Um aspecto peculiar do Comando MACH9-MP (ROMI, 1997) reside no formato de seus parâmetros relacionados com o sistema de coordenadas. Para a maioria desses parâmetros o formato é “3.3”, tendo o ponto como separador decimal. Caso o ponto não seja digitado, o comando alinha os dígitos da direita para a esquerda implicando em efeitos colaterais indesejáveis. Durante a avaliação na empresa “C”, verificou-se que o operador gastou um tempo bem elevado, ver Tabela 2, para obter uma simulação gráfica do programa, decorrente de erros de formatação. Com a utilização do protótipo este problema não existe, pois a formatação de todos os parâmetros de uma dada *feature de programação* é automática.

CONCLUSÕES

O propósito principal deste trabalho foi avaliar a possibilidade da adoção de uma tecnologia de baixo custo para auxiliar na programação CNC para 2 ½ eixos. Constatou-se que em várias empresas existe uma família bem expressiva de peças, de baixa complexidade geométrica, que pode ser usinada com este tipo de abordagem. Essas empresas, na maioria pequenas e médias, foram caracterizadas como prestadoras de serviços de usinagem para produtos seriados dentro da cadeia automotiva.

Figura 13: Desempenho dos participantes na utilização do protótipo.

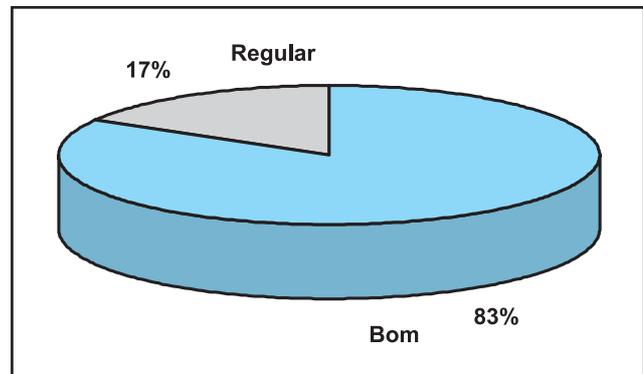


Tabela 2: Tempos registrados durante a programação manual nas empresas A, B e C.

ETAPA	TEMPOS NAS EMPRESAS (MINI)		
	A	B	C
Escrever o programa	25	50	20
Digitar o programa na tela da máquina	12	30	7
Simular o programa na máquina	2	5	15
Depurar erros do programa	10	0	0
Simular usinagem na máquina com avanço rápido	3	8	2
Tempo total para montagem e testes com o programa	52	93	44
Tempo de máquina parada	27	43	24

Tabela 3: Tempos registrados durante a programação com auxílio do protótipo nas empresas A, B e C.

ETAPA	TEMPOS NAS EMPRESAS (MINI)		
	A	B	C
Montar o programa, simular e retirar erros	36	75	12
Transmitir o programa via RS232	2	2	1
Simular o programa na máquina	2	5	2
Simular usinagem na máquina com avanço rápido	3	8	2
Tempo total para montagem e testes com o programa	43	90	17
Tempo de máquina parada	7	15	5

Dentro desse contexto, pode-se concluir que o protótipo computacional avaliado representa uma alternativa viável para redução do tempo total de usinagem, quando comparado à programação puramente manual. Apesar de não possuir recursos para uma simulação gráfica em três dimensões, o protótipo desenvolvido apresenta boa usabilidade, principalmente para usuários com pequena ex-

periência na utilização de computadores, o que implica em uma menor curva de aprendizagem em relação aos sistemas CAM comerciais.

Além disso, pode-se recomendar que tecnologias similares ao protótipo apresentado devam ser consideradas como alternativa de transição entre a programação manual e a consolidação de um grande investimento em sistemas CAM.

Artigo recebido em 01/07/2004

Aprovado para publicação em 28/07/2005

Referências Bibliográficas

- ABBAS, A. T., MEGAHED, S. M. *A general algorithm for drilling holes lying in a matrix*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. v. 21, p. 235-239, 2005.
- ADAMCZYK, Z. A new approach to CAM systems development for small and medium enterprises. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 107, p. 173-180, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6162: *movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais*. Rio de Janeiro, outubro de 1989.
- CHANG, T-C. *et al.* Computer-Aided Manufacturing. *Prentice Hall International Series*. Second edition, 1998.
- COSTA, D. D., da. Análise da Competitividade do Setor de Usinagem no Estado do Paraná. *Máquinas e Metais*. n. 426, p. 132-139, 2001.
- COSTA, D. D. da. *Empresas prestadoras de serviços de usinagem no Estado do Paraná – Rede Usidados*, 2002. Disponível em: www.usidados.com.br
- DEGARMO, E. P. *et al.* Materials and Processes in Manufacturing. *Prentice Hall*. 8 ed., 1997
- DJASSEMI, M. A parametric programming technique for efficient CNC machining Operations. *Computers & Industrial Engineering*, v. 35, n. 1-2, p. 33-36, 1998.
- EVERSHEIM, W. Information Modelling for Technology-Oriented Tool Selection. *Annals of the CIRP*. v. 43, n. 1, p. 429-432, 1994.
- FERRO, J. R. (Coord.). *Relatório anual do Programa Paraná Automotivo – Publicado pelo SEBRAE e SINDIMETAL do Paraná*, 2000.
- FORTIN, E. *et al.* An innovative software architecture to improve information flow from CAM to CNC. *Computers & Industrial Engineering*, v. 46, p. 655-667, 2004.
- GONÇALVES, R. J. Quantas são e onde estão as máquinas-ferramenta no Brasil. *Máquinas e Metais*, dezembro de 2001.
- HATNA, A. *et al.* Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v. 11, n. 4, p. 309-330, 1998.
- GROOVER, M. P. *et al.* CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing. *Prentice Hall International*, Inc. 1984.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6983-1: Numerical control of machines – Program format and definition of address words – Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. 1982.
- OMIROU, S. L.; BAROUNI, A. K. Integration of new programming capabilities into a CNC milling system. *Robotics and Computer Integrated Systems*. In press.
- PEREIRA, Athos G. *Desenvolvimento e avaliação de um editor para programação CN em centros de usinagem*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, 104 p., dissertação (mestrado), 2003.
- PRESSMAN, R. S., WILLIAMS, J. E., *Numerical Control and Computer Aided Manufacturing*, USA, Editora John Wiley & Sons, 307 p., 1977.
- PRESTON, E. J. *et al.* CAD/CAM Systems: Justification, Implementation, Productivity Measurement. New York: Marcel Dekker, Inc, 358 p., 1984
- ROMI. *Manual de Programação e Operação CNC MACH9-MP*, 185 p., 1997.
- SHAH, J. J. *Features in Design and Manufacturing in Intelligent Design and Manufacturing* – editado por Kusiak, A. – Editora John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- VONORTAS, N. S., XUE, L. Process innovation in small firms: case studies on CNC machine tools. *Technovation*. v. 17, n. 8, p. 427-438, 1997.
- XU, X. W., HE, Q. Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. v. 20, p. 101-109, 2004.
- YUEN, C. F. *et al.* Development of a generic computer-aided process planning support system. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 139, p. 394-404, 2003.

Sobre os autores

Dalberto Dias da Costa

Professor do Departamento de Engenharia – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Centro Politécnico – Jardim das Américas S/N

C. Postal: 19011 – CEP: 81531-990 – Curitiba – PR

Telefone/fax: (41) 361-3207

E-mail: dalberto@ufpr.br

Athos Gleber Pereira

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Universidade Federal do Paraná (UFPR)