

CAPÍTULO

7

Controle numérico

CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 7.1 Fundamentos da tecnologia de controle numérico
 - 7.1.1 Componentes básicos de um sistema de CN
 - 7.1.2 Sistemas de coordenadas do CN
 - 7.1.3 Sistemas de controle de movimento
 - 7.2 Controle numérico computadorizado
 - 7.2.1 Características do CNC
 - 7.2.2 A unidade de controle da máquina CNC
 - 7.2.3 *Software* de CNC
 - 7.3 Controle numérico distribuído
 - 7.4 Aplicações do controle numérico
 - 7.4.1 Aplicações de máquinas-ferramenta
 - 7.4.2 Outras aplicações do CN
 - 7.4.3 Vantagens e desvantagens do CN
 - 7.5 Análise de engenharia dos sistemas de posicionamento do CN
 - 7.5.1 Sistemas de posicionamento em malha aberta
 - 7.5.2 Sistemas de posicionamento em malha fechada
 - 7.5.3 Precisão no posicionamento por CN
 - 7.6 Programação das peças no CN
 - 7.6.1 Programação manual
 - 7.6.2 Programação assistida por computador
 - 7.6.3 Programação do CN usando CAD/CAM
 - 7.6.4 Entrada manual de dados
- Apêndice A7: Codificação para a programação manual
- Apêndice B7: Programação com APT

O controle numérico (CN, em inglês *numerical control* — NC) é uma forma de automação programável em que as ações mecânicas de uma máquina-ferramenta, ou

outro equipamento, são controladas por um programa contendo dados alfanuméricos codificados. Esses dados representam posições relativas entre um cabeçote (*workhead*)

e uma peça de trabalho, bem como outras instruções necessárias à operação da máquina. O cabeçote é um dispositivo com uma ferramenta de corte ou outro aparato de processamento, e a peça de trabalho é o objeto sendo processado. Quando o trabalho em andamento é terminado, as instruções do programa podem ser modificadas para o processamento de um novo trabalho. A capacidade de modificação do programa torna o CN adaptável para a pequena e a média produção. É muito mais fácil escrever novos programas do que fazer maiores alterações nos equipamentos de processamento.

O controle numérico pode ser aplicado a uma variedade de processos. As aplicações se dividem em duas categorias: (1) aplicações de usinagem, como furação, fresamento, torneamento e outros processos de metalurgia e (2) aplicações que não usam máquinas-ferramenta, como montagem, desenho e inspeção. A característica comum de operação do CN em todas essas aplicações é o controle do movimento do cabeçote em relação à peça. O conceito de CN data do fim dos anos de 1940, e a primeira máquina de CN foi desenvolvida em 1952 (veja a Nota histórica 7.1).

Nota histórica 7.1

As primeiras máquinas de controle numérico [1], [4], [8], [10]

O desenvolvimento do CN deve muito à Força Aérea dos Estados Unidos e às primeiras indústrias aeroespaciais. O primeiro trabalho na área do CN é atribuído a John Parsons e seu sócio Frank Stulen na Parsons Corporation, em Traverse City, Michigan. Parsons era empreiteiro da Força Aérea durante os anos de 1940 e tinha experimentado o conceito de utilização de dados de posicionamento coordenado, contidos em cartões perfurados para definir e usinar os contornos da superfície de aerofólios. Ele havia nomeado seu sistema de fresadora *Cardamatic*, uma vez que os dados numéricos eram guardados em cartões perfurados. Parsons e seus colegas apresentaram a ideia à base da Força Aérea Wright-Patterson em 1948, e o contrato inicial foi assinado em junho de 1949. Uma subcontratação foi feita por Parsons em julho de 1949 para os Laboratórios de Servomecanismos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology — MIT) para (1) realizar um estudo de engenharia de sistemas sobre controles de máquinas-ferramenta e (2) desenvolver um protótipo de máquina-ferramenta baseado no princípio *Cardamatic*. A pesquisa foi iniciada com base nessa subcontratação, que continuou até abril de 1951, quando um contrato foi assinado entre o MIT e a Força Aérea para completar o trabalho de desenvolvimento.

No início do projeto, tornou-se claro que as taxas de transferência de dados necessárias entre o controlador e a máquina-ferramenta não poderiam ser alcançadas usando cartões perfurados, então foi proposta a utilização de fitas de papel perfuradas ou fitas magnéticas para o armazenamento de dados numéricos. Esses e outros detalhes técnicos do sistema de controle para as máquinas-ferramenta foram definidos até junho de 1950. O nome *controle numérico* foi adotado em março de 1951, baseado em um concurso patrocinado por John Parsons entre "o pessoal do MIT que trabalha no projeto". A primeira máquina de CN foi desenvolvida por meio do reequipamento (*retrofitting*) de uma fresadora vertical *Hydra-Tel* da Cincinnati Milling Machine Company (uma fresadora convencional de 24 pol por 60 pol) que havia sido doada dos equipamentos excedentes da Força Aérea. O controlador combinava componentes analógicos e digitais, que consistiam de 292 válvulas eletrônicas e ocupavam um espaço maior do que a própria máquina-ferramenta. O protótipo realizou com sucesso o controle simultâneo do movimento de três eixos baseando-se nos dados de coordenada de fitas binárias perfuradas. Essa máquina experimental entrou em operação em março de 1952.

Uma patente para o sistema de máquina-ferramenta intitulada *Servossistema de Controle Numérico* foi requerida em agosto de 1952 e concedida em dezembro de 1962. Os inventores foram listados: Jay Forrester, William Pease, James McDonough e Alfred Susskind, todos integrantes da equipe do Laboratório de Servomecanismos durante o projeto. É interessante apontar que uma patente foi requerida por John Parsons e Frank Stulen em maio de 1952 para um *Instrumento Controlado por Motor para o*

Posicionamento de Máquina-ferramenta baseada na ideia de utilizar cartões perfurados e controlador mecânico em vez de eletrônico. Essa patente foi emitida em janeiro de 1958. Em retrospectiva, é claro que a pesquisa do MIT forneceu o protótipo para os desenvolvimentos subsequentes da tecnologia de CN. Até onde sabemos, nenhuma máquina comercial foi apresentada usando a configuração de Parsons-Stulen.

Quando a máquina de CN entrou em operação em março de 1952, peças de teste foram solicitadas por companhias de aviação de todo o país para que se conhecessem as características de operação e economia do CN. Várias vantagens potenciais do CN foram conhecidas com esses testes. Incluíam a boa precisão e repetibilidade, a redução do tempo sem corte no ciclo de usinagem e a capacidade de usinar geometrias complexas. A programação de usinagem (também descrita como programação de peças, programação CN ou, simplesmente, programação) foi reconhecida como uma dificuldade pela nova tecnologia. Uma demonstração pública da máquina aconteceu em setembro de 1952 para os fabricantes de máquinas-ferramenta (previstos para ser as empresas que desenvolveriam produtos na nova tecnologia), produtores de componentes de aviação (esperados como os principais usuários do CN) e outras partes interessadas.

As reações das companhias de máquinas-ferramenta que acompanhavam as demonstrações "variavam do otimismo cauteloso ao completo negativismo" [10, p. 61]. A maior parte das companhias se preocupava com um sistema que dependia de válvulas eletrônicas, sem perceber que elas seriam logo substituídas por transistores e circuitos integrados. Também se preocupavam com as qualificações de suas equipes para manter tal equipamento e eram de modo geral céticos com relação ao conceito de CN. Antecipando essa reação, a Força Aérea patrocinou duas tarefas adicionais: (1) disseminação de informação para a indústria e (2) um estudo econômico. A tarefa de disseminação de informação incluía várias visitas do pessoal do Laboratório de Servomecanismos aos fabricantes de máquinas-ferramenta bem como visitas ao laboratório por equipes das indústrias para observar demonstrações do protótipo da máquina. O estudo econômico mostrou de forma clara que as aplicações de máquinas-ferramenta de CN de uso geral estavam na produção de baixa e média quantidade, em oposição às linhas de transferência do tipo Detroit, que só podiam ser justificadas para quantidades muito grandes.

Em 1956, a Força Aérea decidiu patrocinar o desenvolvimento de máquinas-ferramenta de CN em várias companhias. Essas máquinas foram póstas em operação em companhias de aviação entre os anos de 1958 e 1960. As vantagens do CN logo se tornaram aparentes, e as companhias aeroespaciais começaram a fazer pedidos de novas máquinas de CN. Em alguns casos, até construíam suas próprias unidades. Isso serviu de estímulo para os fabricantes de máquinas-ferramenta restantes que ainda não haviam abraçado o CN. Os avanços em tecnologia da computação também estimularam mais desenvolvimento. A primeira aplicação do computador digital para o CN foi a programação. Em 1956, o MIT demonstrou a viabilidade de um sistema de programação assistido por computador usando um protótipo inicial de computador digital que havia sido desenvolvido. Baseado nessa demonstração, a Força Aérea patrocinou o desenvolvimento de uma linguagem de programação. Essa pesquisa resultou no desenvolvimento da linguagem APT em 1958.

O sistema de ferramenta automaticamente programável (do inglês, *automatically programmed tool* — APT) foi fruto do trabalho do matemático Douglas Ross, que trabalhava no Laboratório de Servomecanismos do MIT na época. Lembre-se de que esse projeto foi iniciado nos anos de 1950, tempo em que a tecnologia dos computadores digitais estava em sua infância, como estavam também as linguagens e os métodos de programação. O projeto APT foi um esforço pioneiro não apenas no desenvolvimento da tecnologia do CN, mas também em conceitos de programação de computadores, computação gráfica e projeto assistido por computador (CAD). Ross vislumbrou um sistema de programação, em que (1) o usuário prepararia instruções para operar a máquina-ferramenta usando palavras parecidas com o inglês, (2) o computador digital traduziria essas instruções para uma linguagem que o computador pudesse entender e processar, (3) o computador realizaria os cálculos aritméticos e geométricos necessários para executar as instruções e, então, (4) processaria (pós-processo) as instruções de modo que pudessem ser interpretadas pelo controlador da máquina-ferramenta. Depois, ele reconheceu que o sistema de programação devia ser expandido para além das aplicações consideradas inicialmente pela pesquisa do MIT (aplicações de fresamento).

O trabalho de Ross no MIT tornou-se um dos focos da programação de CN, e um projeto foi iniciado para desenvolver uma versão bidimensional da APT, com nove companhias de aviação mais a IBM Cor-

poration participando do esforço conjunto e tendo o MIT como coordenador do projeto. O sistema de 2D-APT ficou pronto para avaliação em campo nas fábricas de companhias participantes em abril de 1958. Os testes, a depuração e o refinamento do sistema de programação levaram aproximadamente três anos. Em 1961, o Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) foi escolhido como responsável pela manutenção e atualização de longo prazo da APT. Em 1962, o IITRI anunciou a conclusão da APT-III, versão comercial da APT para programação tridimensional de peças. Em 1974, a APT foi aceita como padrão dos Estados Unidos para programação de CN de máquinas-ferramenta de corte de metais. Em 1978, foi aceita pela ISO como padrão internacional.

A tecnologia de controle numérico estava em sua segunda década antes do emprego efetivo de computadores no controle dos movimentos das máquinas-ferramenta. Em meados dos anos de 1960, foi desenvolvido o conceito de *controle numérico direto* (do inglês, *direct numerical control* — DNC), no qual máquinas-ferramenta individuais eram controladas por um computador de grande porte, distante das máquinas. O computador ignorava o leitor de fita perfurada, transmitindo, em vez disso, instruções para as máquinas em tempo real, um bloco de cada vez. O sistema protótipo foi demonstrado em 1966 [4]. Duas companhias pioneiras no desenvolvimento do DNC foram a General Electric Company e a Cincinnati Milling Machine Company (que mudou seu nome para Cincinnati Milacron em 1970). Muitos sistemas de DNC foram demonstrados na Mostra Nacional de Máquinas-Ferramenta em 1970.

Os computadores de grande porte representavam a condição da tecnologia de meados dos anos de 1960. Não havia computadores pessoais ou microcomputadores naquela época. Entretanto a tendência na tecnologia da computação era para a utilização de circuitos integrados de crescentes níveis de integração, o que resultou em um aumento considerável no desempenho computacional ao passo que o tamanho e o custo do computador eram reduzidos. No início dos anos de 1970, a economia estava certa em usar um computador dedicado como a MCU (do inglês, *machine control unit*). Essa aplicação veio a se tornar conhecida como *controle numérico computadorizado* (CNC). No começo, minicomputadores eram usados como os controladores; depois, foram usados conforme a tendência desempenho/tamanho continuava.

7.1 FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DE CONTROLE NUMÉRICO

Para introduzir a tecnologia do CN, primeiro definimos os componentes básicos de um sistema de CN, depois descrevemos os sistemas de coordenadas de CN de uso comum e tipos de controle de movimento usados no CN.

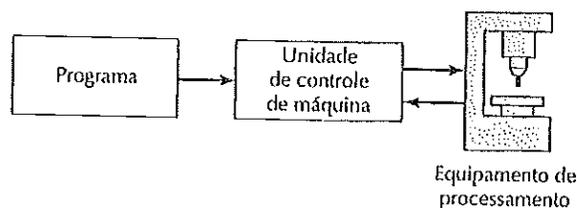
7.1.1 Componentes básicos de um sistema de CN

Um sistema de CN consiste de três componentes básicos: (1) um programa de instruções de usinagem, (2) uma unidade de controle de máquina e (3) um equipamen-

to de processamento. A relação comum entre os três componentes é ilustrada na Figura 7.1.

O *programa de usinagem* é o conjunto de comandos passo a passo detalhados que dirigem as ações do equipamento de processamento. Em aplicações de máquinas-ferramenta, a pessoa que prepara o programa é chamada *programador*. Nessas aplicações, os comandos individuais se referem a posições de uma ferramenta de corte em relação à mesa de trabalho na qual a peça a ser usinada é fixada. Instruções adicionais são geralmente incluídas, como a velocidade do eixo, a velocidade de avanço, a seleção da ferramenta de corte e outras funções. O programa é codificado em um meio adequado para a apresentação à unidade de controle da máquina. Por muitos anos, o meio comum

Figura 7.1 Componentes básicos de um sistema de CN



era uma fita perfurada, com uma polegada de largura, usando um formato-padrão que poderia ser interpretado pela unidade de controle da máquina. Nos dias de hoje, nas fábricas modernas, as fitas perfuradas foram substituídas por tecnologias de armazenamento mais atuais. Essas tecnologias incluem fita magnética, disquetes e transferência eletrônica de programas do computador.

Na tecnologia moderna de CN, a *unidade de controle da máquina* (MCU) é um microcomputador, e seus periféricos, que armazenam as instruções do programa e as executam convertendo cada comando em ações mecânicas do equipamento de processamento, um comando por vez. Os periféricos relacionados à MCU incluem componentes de comunicação com o equipamento de processamento e elementos de controle de realimentação (*feedback*). A MCU também inclui um ou mais dispositivos de leitura para a entrada de programas na memória. Os *softwares* residentes da MCU incluem o sistema de controle, algoritmos de cálculo e *softwares* de tradução para converter o programa CN em formato utilizável pela MCU. Por ser a MCU um computador, o termo *controle numérico computadorizado* (CNC) é usado para distinguir esse tipo de CN de seus precedentes tecnológicos, que eram inteiramente baseados em eletrônica de componentes discretos. Hoje, praticamente todas as MCUs novas são baseadas em tecnologia da computação; por isso, quando nos referirmos a CN, queremos dizer CNC.

O terceiro componente básico de um sistema de CN é o *equipamento de processamento*, que executa o real trabalho produtivo (por exemplo, a usinagem). Ele realiza os passos do processamento para transformar a peça inicial em uma peça terminada. Sua operação é dirigida pela MCU, que por sua vez é dirigida pelas instruções contidas no programa da peça. No exemplo mais comum de CN — a

usinagem, o equipamento de processamento consiste da mesa de trabalho e do eixo, bem como dos motores e controles que os dirigem.

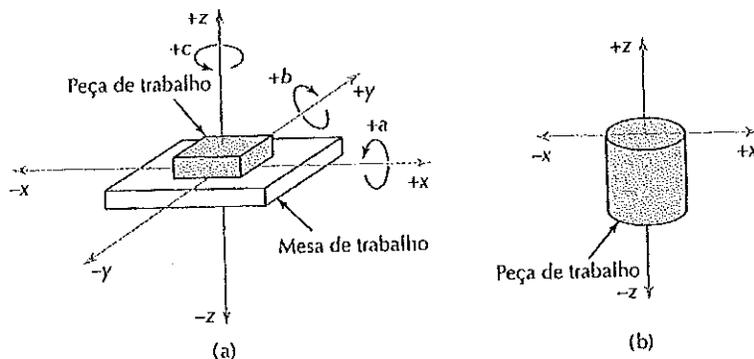
7.1.2 Sistemas de coordenadas do CN

Para programar o equipamento de processamento de CN, um programador deve definir um sistema de eixos padrão pelo qual a posição do cabeçote em relação à peça possa ser especificada. Há dois sistemas de eixos usados no CN, um para peças de trabalho planas e prismáticas e outro para peças rotacionais. Os dois são baseados no sistema cartesiano de coordenadas.

O sistema de eixo para peças planas e prismáticas consiste dos três eixos lineares (x , y , z) do sistema cartesiano de coordenadas e de mais três eixos rotacionais (a , b , c), como mostra a Figura 7.2(a). Na maioria das aplicações de máquinas-ferramenta, os eixos x e y são usados para mover e posicionar a mesa de trabalho na qual a peça é presa, e o eixo z é usado para controlar a posição vertical da ferramenta de corte. Um esquema de posicionamento como esse é adequado para aplicações simples de CN como a furação de folhas de metal. A programação dessas máquinas-ferramenta consiste de algo além da especificação de uma sequência de coordenadas x - y .

Os eixos rotacionais a , b e c especificam posições angulares sobre os eixos x , y e z respectivamente. Para distinguir os ângulos positivos dos negativos, a *regra da mão direita* é usada: usando a mão direita com o polegar apontado na direção linear positiva do eixo ($+x$, $+y$ ou $+z$), os dedos da mão são dobrados na direção da rotação positiva. Os eixos rotacionais podem ser usados para o seguinte: (1) orientação da peça para apresentar diferentes superfícies para a usinagem e/ou (2) orientação de ferramenta ou ca-

Figura 7.2 Sistemas de coordenadas usados no CN (a) para trabalhos planos e prismáticos e (b) para trabalho rotacional. (Na maioria das máquinas de torneamento, o eixo z é horizontal em vez de vertical, como mostramos)



beçote em algum ângulo relativo à peça. Esses eixos adicionais permitem a usinagem de geometrias complexas da peça. As máquinas-ferramenta com capacidade de eixos rotacionais geralmente têm quatro ou cinco eixos: três eixos lineares mais um ou dois eixos rotacionais. A maior parte dos sistemas de CN de máquinas-ferramenta não requer todos os seis eixos.

Os eixos de coordenadas para um sistema de CN rotacional estão ilustrados na Figura 7.2(b). Esses sistemas estão associados com tornos e centros de torneamento de CN. Ainda que a peça gire, esse não é um dos eixos controlados na maioria das máquinas de torneamento. Como consequência, o eixo y não é usado. O caminho da ferramenta de corte relativo à peça sendo rotacionada é definido no plano $x-z$, em que o eixo x é a localização radial da ferramenta e o eixo z é paralelo ao eixo de rotação da peça.

O programador deve decidir onde a origem do sistema de eixos de coordenadas deve estar localizada. Essa decisão normalmente é baseada na conveniência da programação. Por exemplo, a origem pode estar localizada em um dos extremos da peça. Se a peça for simétrica, o ponto zero pode ser definido mais convenientemente como o centro da simetria. Seja onde for a localização, esse ponto zero é comunicado ao operador da máquina-ferramenta. No início do trabalho, o operador deve mover a ferramenta de corte sob controle manual para algum *ponto-alvo* na mesa de trabalho, onde a ferramenta pode ser posicionada de maneira fácil e precisa. O ponto-alvo foi referenciado anteriormente à origem do sistema de eixos de coordenadas pelo programador. Quando a ferramenta estiver posicionada corretamente no ponto-alvo, o operador indica para a MCU onde a origem está localizada para os movimentos subsequentes da ferramenta.

7.1.3 Sistemas de controle de movimento

Alguns processos de CN são realizados em lugares discretos da peça (por exemplo, furação e solda ponto).

Outros são executados enquanto o cabeçote está em movimento (por exemplo, torneamento, fresamento e soldagem por arco contínuo). Se o cabeçote está se movendo, pode ser necessário seguir um caminho reto ou circular ou outro caminho curvilíneo. Esses diferentes tipos de movimento são realizados pelo sistema de controle de movimentos, cujas características são explicadas a seguir.

Controle ponto a ponto versus caminho contínuo. Os sistemas de controle de movimento para CN (e robótica, Capítulo 8) podem ser divididos em dois tipos: (1) ponto a ponto e (2) caminho contínuo. *Sistemas ponto a ponto*, também chamados de *sistemas de posicionamento*, movem a mesa de trabalho para uma posição programada sem levar em consideração o caminho tomado para chegar até ela. Uma vez que a movimentação termina, alguma ação de processamento é realizada pelo cabeçote no local, como a perfuração de um orifício. Dessa maneira, o programa consiste de uma série de localidades pontuais nas quais as operações são realizadas, como mostra a Figura 7.3.

Os *sistemas de caminho contínuo* são capazes de controle simultâneo contínuo de dois ou mais eixos. Isso oferece controle do trajeto da ferramenta em relação à peça. Nesse caso, a ferramenta realiza o processo enquanto a mesa de trabalho é movimentada, permitindo ao sistema gerar superfícies angulares, curvas bidimensionais, ou contornos tridimensionais na peça. Esse modo de controle é necessário em várias operações de fresamento e torneamento. Uma operação simples de fresamento de perfil bidimensional é mostrada na Figura 7.4 para ilustrar o controle de caminho contínuo. Quando o controle de caminho contínuo é utilizado para mover a ferramenta paralela a apenas um dos eixos principais da mesa de trabalho da máquina-ferramenta, isso é chamado *CN de corte reto*. Quando o controle de caminho contínuo

Figura 7.3 Controle ponto a ponto (posicionamento) em CN. Em cada posição $x-y$, o movimento da mesa é interrompido para realizar a operação de usinagem do furo

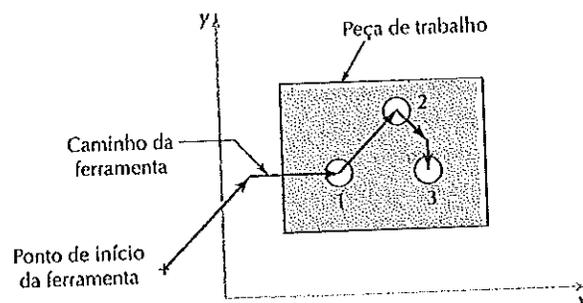
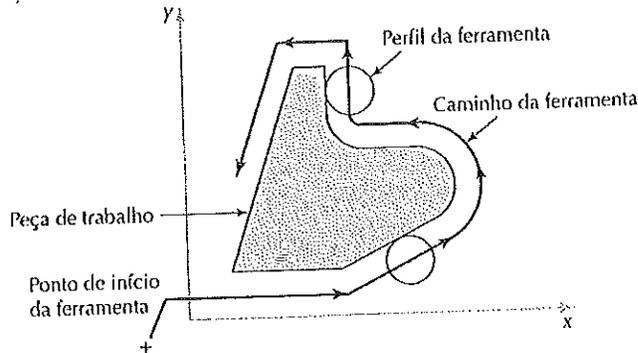


Figura 7.4 Controle de caminho contínuo (contorno) em CN (plano x-y apenas). Note que o caminho da ferramenta de corte deve ser afastado da linha externa da peça por uma distância igual a seu raio.



nuo é usado para o controle simultâneo de dois ou mais eixos em operações de usinagem, o termo *contorno* é usado.

Métodos de interpolação. Um dos aspectos importantes do contorno é a interpolação. Os caminhos que um sistema de CN do tipo contorno precisa gerar muitas vezes consistem de arcos circulares e outras formas lisas não lineares. Algumas dessas formas podem ser definidas matematicamente por fórmulas geométricas simples (por exemplo, a equação para um círculo é $x^2 + y^2 = R^2$, em que R é o raio do círculo, e o centro do círculo está na origem), enquanto outras não podem ser definidas matematicamente exceto por aproximação. Em qualquer dos casos, um problema fundamental na geração dessas formas usando equipamentos de CN é que eles são contínuos, enquanto o CN é digital. Para cortar por um caminho circular, o círculo deve ser dividido em uma série de segmentos de linhas retas que se aproximam da curva. A ferramenta é ordenada a usinar cada segmento de linha em sucessão de modo que a superfície usinada corresponda à forma desejada. O erro máximo entre a superfície nominal (desejada) e a real (usinada) pode ser controlado pela extensão dos segmentos de linha individuais, como explicado na Figura 7.5.

Se fosse solicitado ao programador especificar os pontos de finalização para cada um dos segmentos de linha, a tarefa de programação seria extremamente árdua e carregada de erros. Além disso, o programa da peça seria muito longo por conta do grande número de pontos. Para diminuir esse fardo, foram desenvolvidas rotinas de interpolação que calculam os pontos intermediários a ser se-

guidos pelo cortador para gerar um caminho particular definido matematicamente ou aproximado.

Vários métodos de interpolação estão disponíveis para lidar com os variados problemas encontrados na geração de caminhos contínuos suaves e contorno. Eles incluem (1) interpolação linear, (2) interpolação circular, (3) interpolação helicoidal, (4) interpolação parabólica e (5) interpolação cúbica. Cada um desses procedimentos, descritos com brevidade na Tabela 7.1, permite ao programador gerar instruções de máquina para caminhos lineares ou curvilíneos usando relativamente poucos parâmetros de entrada. O módulo de interpolação na MCU realiza os cálculos e direciona a ferramenta através do caminho. Nos sistemas CNC, o interpolador é normalmente executado por *software*. Os interpoladores lineares e circulares são quase sempre incluídos em sistemas CNC modernos, enquanto a interpolação helicoidal é uma opção comum. Interpolações parabólicas e cúbicas são menos comuns; são necessárias apenas em fábricas que precisam produzir contornos de superfície complexos.

Posicionamento absoluto versus incremental.

Outro aspecto do controle de movimentos se preocupa com as posições definidas em relação à origem do sistema de coordenadas ou em relação à posição anterior da ferramenta. Os casos são chamados de posicionamento absoluto e posicionamento incremental. No posicionamento absoluto, o posicionamento do cabeçote sempre é definido em relação à origem do sistema de eixos. No posicionamento incremental, a próxima posição do cabeçote é definida em relação a sua posição atual. A diferença é ilustrada na Figura 7.6.

Figura 7.5 Aproximação de um caminho curvado em CN por uma série de segmentos de linha reta. A precisão da aproximação é controlada pelo desvio máximo (chamado de tolerância) entre a curva nominal (desejada) e os segmentos de linha reta que são usados pelo sistema de CN. Em (a), a tolerância é definida apenas no interior da curva nominal. Em (b), a tolerância é definida apenas no exterior da curva desejada. Em (c), a tolerância é definida em ambos os lados da curva desejada.

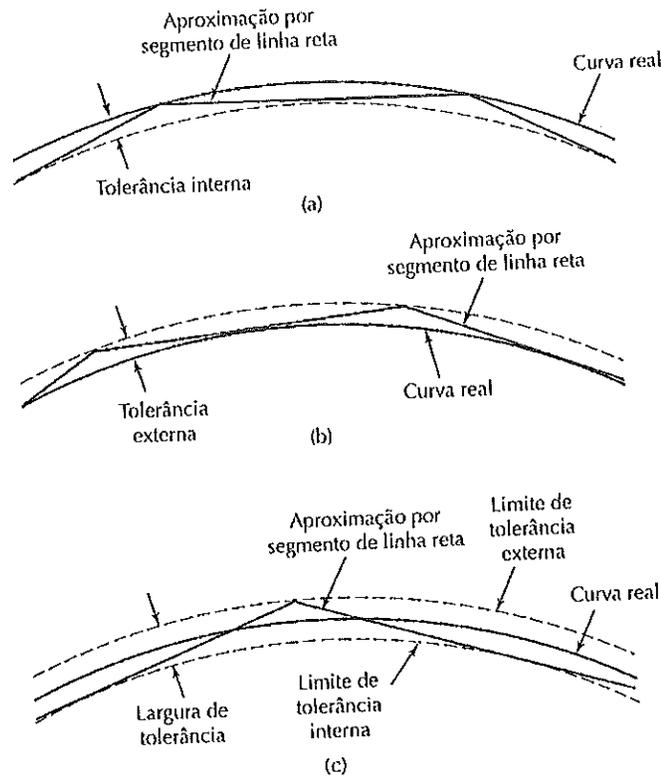


Tabela 7.1 Métodos de interpolação em controle numérico para controle de caminho contínuo

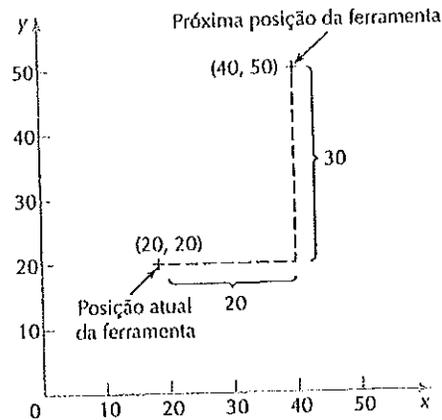
Interpolação linear. Esse é o método mais básico e é usado quando um caminho em linha reta deve ser gerado em CN de caminho contínuo. Rotinas de interpolação linear de dois ou três eixos são algumas vezes diferenciadas na prática, mas conceitualmente são as mesmas. O programador especifica o ponto de início e o ponto de término da linha reta e a velocidade de avanço a ser usada ao longo da linha. O interpolador calcula as taxas de alimentação para cada um dos dois (ou três) eixos para atingir a velocidade de avanço especificada.

Interpolação circular. Esse método permite programar um arco circular pela especificação dos seguintes parâmetros: (1) as coordenadas do ponto de início, (2) as coordenadas do ponto de término, (3) o centro ou o raio do arco e (4) a direção da ferramenta ao longo do arco. O caminho da ferramenta gerado consiste de uma série de pequenos segmentos de linha reta (Figura 7.5) calculadas pelo módulo de interpolação. A ferramenta é direcionada para mover-se ao longo de cada segmento de linha, um por um, para gerar um caminho circular suave. Uma limitação da interpolação circular é que o plano onde o arco circular existe deve ser definido por dois eixos do sistema de CN (x-y, x-z ou y-z).

Interpolação helicoidal. Esse método combina o esquema de interpolação circular para os dois eixos descritos acima com o movimento linear de um terceiro eixo. Isso permite a definição de um caminho helicoidal em um espaço tridimensional. As aplicações incluem usinagem de grandes roscas internas, retas ou cônicas.

Interpolação parabólica ou cúbica. Essas rotinas fornecem aproximações de curvas livres usando equações de ordem maior. Elas normalmente requerem uma potência computacional considerável e não são comuns como a interpolação linear e circular. A maior parte das aplicações está nas indústrias aeroespaciais e automotivas para o projeto de formas livres que não podem ser aproximadas de maneira precisa e conveniente pela combinação da interpolação linear com a circular.

Figura 7.6 - Posicionamento absoluto versus incremental. O cabeçote está atualmente no ponto (20, 20) e está para ser movido para o ponto (40, 50). No posicionamento absoluto, o movimento é especificado por $x = 40$, $y = 50$; enquanto no posicionamento incremental, o movimento é especificado por $x = 20$, $y = 30$.



7.2 CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO

Desde a introdução do CN em 1952, houve grandes avanços na tecnologia do computador digital. O tamanho físico e o custo de um computador digital foram reduzidos de maneira significativa ao passo que suas capacidades computacionais aumentaram substancialmente. Era lógico para os fabricantes dos equipamentos de CN incorporar esses avanços da tecnologia da computação em seus produtos, começando com computadores de grande porte nos anos de 1960, passando em seguida pelos minicomputadores nos anos de 1970, além dos microcomputadores nos anos de 1980. Hoje, CN quer dizer *controle numérico computadorizado* (CNC) e é definido como um sistema de CN cuja MCU é baseada em um microcomputador dedicado, em vez de um controlador de circuitos diretos. Os mais atuais controladores computadorizados para CNC têm como características processadores de alta velocidade, memória maior, memórias *flash* de estado sólido, servomecanismos melhorados e arquiteturas de barramento [13]. Alguns controladores têm capacidade de controlar várias máquinas no modo de DNC (Seção 7.3).

7.2.1 Características do CNC

Os sistemas computadorizados de CN incluem características além do que é viável com o CN convencional por circuitos discretos. Essas características, muitas das quais são padrão na maioria das MCUs da CNC, são relacionadas a seguir:

- *Armazenamento de mais de um programa de usinagem.* Com os avanços da tecnologia de armazenamento

dos computadores, os novos controladores CNC têm capacidade suficiente para guardar vários programas. Os fabricantes de controladores geralmente oferecem uma ou mais expansões de memória como opcionais para a MCU.

- *Várias maneiras de entrada de programas.* Enquanto as MCUs convencionais (por circuitos discretos) são limitadas às fitas perfuradas como meio de entrada para os programas de usinagem, os controladores CNC normalmente possuem várias capacidades de entrada de dados, como fitas perfuradas (se a fábrica ainda as utiliza), fita magnética, disquetes, comunicação com computadores externos por meio de porta RS-232 e entrada de dados manual (entrada de programas pelo operador).
- *Edição de programas na máquina-ferramenta.* O CNC permite que um programa seja editado enquanto reside na memória do computador da MCU. Por esse motivo, um programa pode ser testado e corrigido na máquina, em vez de ser devolvido ao escritório de programação para correções. Além das correções nos programas, a edição também permite que as condições de corte no ciclo de usinagem sejam otimizadas. Depois que o programa for corrigido e otimizado, a versão revisada pode ser armazenada em uma fita perfurada ou em outra mídia para utilização no futuro.
- *Ciclos fixos e sub-rotinas de programação.* A capacidade aumentada de memória e a habilidade para programar o computador de controle fornecem a oportunidade de armazenar os ciclos de usinagem mais utilizados como *macros*, que podem ser chamadas pelos programas. Em vez de escrever toda a instrução para um ciclo particular em todos os pro-

gramas, um programador inclui uma chamada no programa de uma peça para indicar que o ciclo da macro deve ser executado. Esses ciclos muitas vezes necessitam que certos parâmetros sejam definidos, por exemplo, uma flange, para a qual o diâmetro do círculo dos parafusos, o espaçamento entre os furos e outros parâmetros devem ser especificados.

- *Interpolação.* Alguns dos esquemas de interpolação descritos na Tabela 7.1 são normalmente executados apenas em um sistema de CNC por conta dos requisitos computacionais. A interpolação linear e a circular são algumas vezes implementadas por circuitos discretos na unidade de controle, mas as interpolações helicoidal, parabólica e cúbica são de modo geral executadas por um algoritmo de programa armazenado.
- *Características para a preparação de posicionamento.* Preparar a máquina-ferramenta para uma dada peça envolve a instalação e o alinhamento de um dispositivo de fixação na mesa da máquina-ferramenta. Isso deve ser realizado de modo que os eixos da máquina sejam estabelecidos em respeito à peça. O alinhamento pode ser facilitado usando certas funcionalidades que se tornaram possíveis com as opções de *software* de um sistema CNC. A *configuração de posição* é uma dessas funcionalidades. Com ela, o operador não precisa posicionar o dispositivo de fixação na mesa da máquina com precisão extrema. Em vez disso, os eixos da máquina-ferramenta são referenciados com relação à posição da fixação usando um ponto-alvo, um conjunto de pontos-alvo na peça ou um dispositivo de fixação.
- *Comprimento da ferramenta e compensação de seu tamanho.* Nos antigos controles, as dimensões da ferramenta tinham de ser configuradas precisamente para corresponder ao caminho da ferramenta definido no programa. Métodos alternativos para garantir a definição precisa do caminho da ferramenta foram incorporados aos controles CNC. Um método envolve a entrada manual das dimensões reais da ferramenta na MCU. Essas dimensões reais podem ser diferentes das originalmente programadas. As compensações são então feitas automaticamente no caminho calculado da ferramenta. Outro método envolve a utilização de um sensor de comprimento da ferramenta embutido na máquina. Nessa técnica, a ferramenta é montada no eixo e o sensor mede seu comprimento; esse valor medido é então usado para corrigir o caminho programado da ferramenta.
- *Cálculos de aceleração e desaceleração.* Essa característica se aplica quando a ferramenta se move

com altas velocidades de avanço. Ela é projetada para evitar marcas da ferramenta na superfície de trabalho que seriam geradas pela dinâmica da máquina-ferramenta quando o caminho da ferramenta mudasse de forma abrupta. Como alternativa, a velocidade de avanço é ligeiramente desacelerada em antecipação a uma mudança no caminho da ferramenta e então acelerada novamente até a velocidade programada depois da mudança de direção.

- *Interface de comunicação.* Com a atual tendência de utilização de interfaces e redes de comunicação nas fábricas, a maioria dos controladores CNC modernos são equipados com uma porta padrão RS-232 ou outras interfaces de comunicação para ligar a máquinas a outros computadores e dispositivos controlados por computador. Isso é útil para várias aplicações, como (1) o *download* de programas de usinagem de um arquivo central de dados, (2) a coleta de dados operacionais como contagem de peças, tempos de ciclo e utilização de máquina e (3) a comunicação com equipamentos periféricos, como robôs que carregam e descarregam as peças.
- *Diagnósticos.* Muitos sistemas de CNC modernos possuem capacidade de diagnóstico que monitora certos aspectos da máquina-ferramenta para detectar falhas ou sinais de falhas iminentes ou para diagnosticar quedas no sistema.

7.2.2 A unidade de controle de máquina CNC

A MCU é o *hardware* que diferencia o CNC do CN convencional. A configuração geral da MCU em um sistema de CNC é ilustrada na Figura 7.7. A MCU consiste dos seguintes componentes e subsistemas: (1) unidade central de processamento, (2) memória, (3) interface de E/S, (4) controles para os eixos da máquina-ferramenta e velocidade de rotação do eixo e (5) controles sequenciais para outras funções da máquina-ferramenta. Esses subsistemas são interconectados por meio de um barramento de sistema, que comunica os dados e os sinais por todos os componentes da rede.

Unidade central de processamento (do inglês, central processing unit — CPU). É o cérebro da MCU. Ela gerencia os outros componentes da MCU baseando-se no *software* contido na memória principal. A CPU pode ser dividida em três seções: (1) seção de controle, (2) unidade lógico-aritmética e (3) memória de acesso imediato. A *seção de controle* recupera comandos e dados da memória e gera sinais para ativar outros componentes na MCU.

Em resumo, sequencia, coordena e regula todas as atividades do computador da MCU. A *unidade lógico-aritmética* (do inglês, *arithmetic-logic unit* — ALU) consiste dos circuitos necessários para a realização de vários cálculos (adição, subtração, multiplicação), contagem e funções lógicas solicitadas pelo *software* residente na memória. A *memória de acesso imediato* fornece armazenamento temporário para os dados sendo processados pela CPU. É conectada à memória principal por meio do barramento de dados do sistema.

Memória. A memória de acesso imediato na CPU não é destinada ao armazenamento do *software* de CNC. Uma capacidade de armazenamento muito maior é exigida para os vários programas e dados necessários à operação do sistema de CNC. Como na maioria dos sistemas de computador, a memória do CNC pode ser dividida em duas categorias: (1) memória principal e (2) memória secundária. A *memória principal* (também conhecida como *armazenamento primário*) consiste de dispositivos de ROM (memória somente de leitura, do inglês, *read-only memory*) e RAM (memória de acesso aleatório, do inglês, *random access memory*). O *software* do sistema operacional e os programas de interface da máquina (Seção 7.2.3) são geralmente armazenados na ROM. Esses programas costumam ser instalados pelo fabricante da MCU. Os programas de controle numérico são gravados nos dispositivos de RAM. Os programas armazenados na RAM podem ser apagados e substituídos por novos programas conforme mudam os serviços.

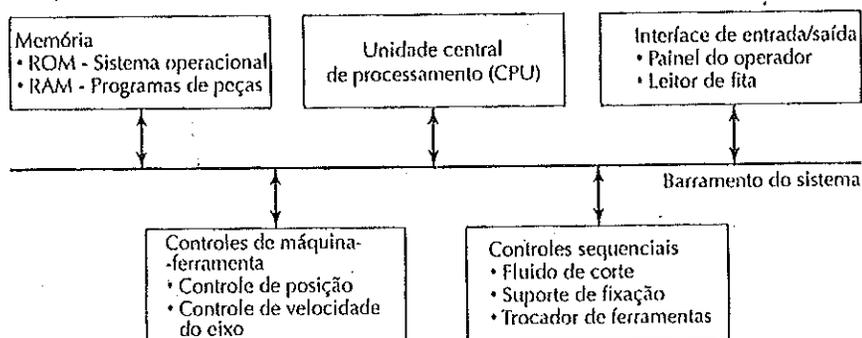
Os dispositivos de *memória secundária* de alta capacidade (também chamados *armazenamento auxiliar* ou *secundário*) são usados para guardar programas e arquivos de dados maiores, depois transferidos para a memória principal conforme a necessidade. Os discos rígidos são comuns entre os dispositivos de memória secundária, bem como os dispositivos portáteis; eles substituíram a maior

parte das fitas perfuradas usadas tradicionalmente para o armazenamento de programas. Os discos rígidos são dispositivos de armazenamento de alta capacidade instalados de forma permanente na unidade de controle da máquina de CNC. A memória secundária do CNC é usada para guardar programas, macros e outros *softwares*.

Interface de entrada/saída. Oferece a comunicação entre os vários componentes do sistema de CNC, outros sistemas de computador e o operador da máquina. Como o nome sugere, a interface de E/S transmite e recebe dados e sinais dos dispositivos externos, muitos dos quais são indicados na Figura 7.7. O *painel de controle do operador* é a interface básica pela qual o operador da máquina se comunica com o sistema de CNC. É usada para a entrada de comandos relacionados com a edição de programas de usinagem, a definição do modo de operação da MCU (por exemplo, controle por programa *versus* controle manual), ajustes de velocidades de rotação e avanço, ligar e desligar a bomba de fluido de corte, e funções similares. O painel de controle do operador costuma incluir um teclado alfanumérico. A interface de E/S também inclui uma tela (CRT ou LED) para comunicação de dados e informações da MCU para o operador da máquina. A tela é usada para indicar o estado atual do programa conforme ele é executado e para avisar o operador de quaisquer falhas no sistema de CNC.

Também incluídos na interface de E/S estão um ou mais meios de entrada dos programas para o armazenamento. Como indicado anteriormente, os programas CN são gravados de várias maneiras. Os programas também podem ser inseridos manualmente pelo operador da máquina ou gravados em um computador central e transmitidos via rede local (LAN) para o sistema de CNC. Seja qual for o meio empregado pela fábrica, um dispositivo adequado deve ser incluído à interface de E/S para permitir a entrada dos programas na memória da MCU.

Figura 7.7 Configuração de uma unidade de controle de máquina CNC



Controles para os eixos da máquina-ferramenta e velocidade do eixo-árvore. Esses são componentes de *hardware* que controlam a posição e a velocidade (de avanço) de cada um dos eixos da máquina bem como a velocidade de rotação do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Os sinais de controle gerados pela MCU devem ser convertidos à forma e ao nível de energia compatíveis com os distintos sistemas de controle de posição usados para movimentar os eixos da máquina. Os sistemas de posicionamento podem ser classificados como malha aberta e malha fechada, e diferentes componentes de *hardware* são necessários em cada caso. Uma discussão mais detalhada desses elementos de *hardware* é apresentada na Seção 7.6, junto a uma análise de como funcionam para realizar o controle de posição e da velocidade de avanço. Para nossos propósitos aqui, é suficiente indicar que alguns dos componentes de *hardware* são embutidos na MCU.

De acordo com o tipo de máquina-ferramenta, o eixo-árvore é usado para mover (1) a peça ou (2) uma ferramenta rotativa. O torneamento exemplifica o primeiro caso, enquanto o fresamento e a furação exemplificam o segundo. A velocidade do eixo-árvore é um parâmetro programado na maioria das máquinas-ferramenta de CNC. Os componentes do controle de velocidade do eixo-árvore na MCU consistem, de modo geral, de um dispositivo de circuito de controle e uma interface de sensor de realimentação. Os componentes particulares de *hardware* dependem do tipo da unidade de eixo-árvore.

Controles sequenciais para outras funções da máquina-ferramenta. Além do controle da posição da mesa, da velocidade de avanço e da velocidade de rotação do eixo-árvore, muitas outras funções adicionais são realizadas sob o controle do programa. Essas funções auxiliares são normalmente atuações do tipo liga/desliga (binárias), intertravamentos e dados numéricos discretos. Uma amostra dessas funções é apresentada na Tabela 7.2. Para evitar a sobrecarga da CPU, um controlador lógico programável (Capítulo 9) é usado algumas vezes para gerenciar a interface de E/S para essas funções auxiliares.

Computadores pessoais e a MCU. Em um número crescente, os computadores pessoais (PCs) estão sendo usados na fábrica na implementação do controle de processos (Seção 5.3.3), e o CNC não é exceção. Duas configurações básicas são aplicadas [7]: (1) o PC é usado como interface de entrada separada da MCU, e (2) o PC contém a placa de controle de movimento e outros *hardwares* necessários à operação da máquina-ferramenta. No segundo caso, a placa de controle de CNC é instalada em uma entrada padrão do PC. Em qualquer uma das configurações,

a vantagem da utilização do PC para o CNC é sua flexibilidade para executar uma variedade de *softwares* de usuário, enquanto controla as operações da máquina-ferramenta. Os *softwares* de usuário podem incluir programas para o controle do chão de fábrica, o controle estatístico de processo, a modelagem de sólidos, o gerenciamento da ferramenta de corte e outros *softwares* de produção assistida por computador. Outros benefícios incluem mais facilidade de utilização comparada ao CNC convencional e a facilidade de comunicação em rede dos PCs. Uma desvantagem possível é o tempo gasto em reequipar o PC para operar como CNC, em especial quando da instalação dos controles de movimento do CNC dentro do PC. Além disso, algumas fábricas preferem não ter PCs no chão da fábrica devido à preocupação com vírus e segurança [15].

7.2.3 Software de CNC

O computador no CNC funciona por meio do *software*. Há três tipos de *softwares* usados em sistemas de CNC: (1) *software* de sistema operacional, (2) *software* de interface com a máquina e (3) *softwares* aplicativos.

A principal função do sistema operacional é interpretar os programas CN e gerar os sinais de controle correspondentes para mover os eixos na máquina-ferramenta. Ele é instalado pelo fabricante do controlador e armazenado na ROM da MCU. O sistema operacional consiste do seguinte: (1) um *editor*, que permite ao operador informar e editar programas CN, além de realizar outras funções de gerenciamento de arquivos; (2) um *programa de controle*, que decodifica as instruções dos programas, executa os cálculos de interpolação e aceleração/desaceleração, além de realizar outras funções relacionadas para produzir os sinais de controle de coordenadas para cada eixo e (3) um *programa executivo*, que gerencia a execução do *software* de CNC bem como das operações de E/S da MCU. O sistema operacional também inclui as rotinas de diagnóstico disponíveis no sistema de CNC.

O *software* de interface com a máquina é usado para realizar a comunicação entre a CPU e a máquina-ferramenta com o objetivo de executar as funções auxiliares do CNC (Tabela 7.2). Conforme indicado anteriormente, os sinais de E/S associados às funções auxiliares são algumas vezes implementados por meio de um controlador lógico programável conectado à MCU; desse modo o *software* de interface com a máquina é muitas vezes escrito na forma de diagramas de lógica ladder (Seção 9.2).

Finalmente, os *softwares* aplicativos consistem dos programas CN escritos para as aplicações de usinagem (ou outras) na planta do usuário. Transferimos o tópico de programação de usinagem para a Seção 7.6.

Tabela 7.2 Exemplos de funções auxiliares implementadas muitas vezes por um controlador lógico programável na MCU

Função auxiliar do CNC	Tipo ou classificação
Controle do fluido de corte	Saída ligado/desligado da MCU para a bomba
Trocador de ferramenta e unidade de armazenamento de ferramenta	Dados numéricos discretos (valores possíveis limitados à capacidade da unidade de armazenamento de ferramentas)
Dispositivo de fixação	Saída ligado/desligado da MCU para o atuador do dispositivo
Alarme ou parada de emergência	Entrada de ligado/desligado do sensor para a MCU; saída ligado/desligado para a tela e alarme
Robô para carga/descarga de peças	Intertravamento para sequenciar a operação de carga/descarga; sinais de E/S entre a MCU e o robô
Contadores (por exemplo, de peças)	Dados numéricos discretos (valores possíveis limitados ao número de peças que podem ser produzidas em dado período de tempo, como um expediente)

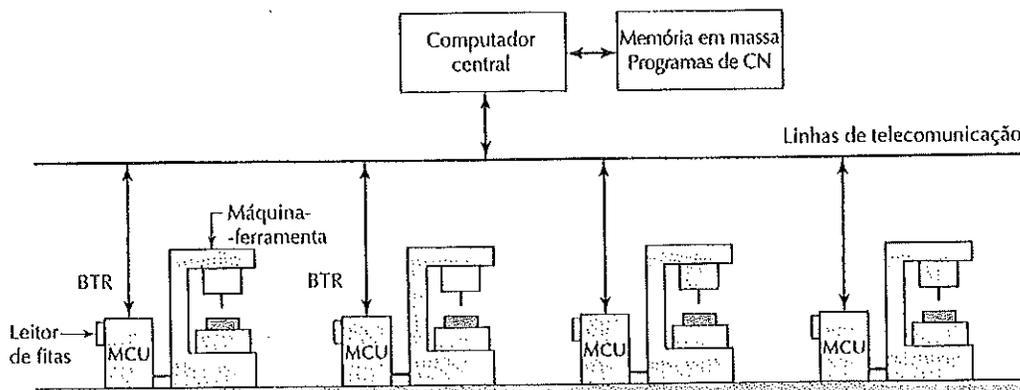
7.3 CONTROLE NUMÉRICO DISTRIBUÍDO

A Nota histórica 7.1 descreve vários modos pelos quais os computadores foram utilizados para implementar o CN. A primeira tentativa de usar um computador digital para controlar a máquina-ferramenta de CN foi chamada de *controle numérico direto* (DNC). Isso aconteceu no fim dos anos 1960, antes do advento do CNC. Como havia sido implementado antes, o DNC envolvia o controle de várias máquinas-ferramenta por um único computador (de grande porte) por meio da conexão direta e em tempo real. Em vez de usar um leitor de fitas perfuradas na entrada de programas para a MCU, o programa era transmitido para a MCU diretamente do computador, um bloco de instruções por vez. Esse modo de operação recebeu o nome de *atrás do leitor de fitas* (do inglês, *behind the tape reader* — BTR). O computador do DNC

fornevia os blocos de instrução para a máquina-ferramenta por demanda; quando a máquina necessitava de comandos de controle, os mesmos eram comunicados a ela imediatamente. À medida que cada bloco era executado pela máquina, o próximo era transmitido. Até onde a máquina-ferramenta sabia, a operação não era diferente da dos controladores convencionais de CN. Na teoria, o DNC libertou o sistema de CN dos componentes menos confiáveis: a fita perfurada e o leitor de fitas.

A configuração geral de um sistema de DNC é apresentada na Figura 7.8. O sistema consistia de quatro componentes: (1) o computador central, (2) a memória de massa no computador central, (3) o conjunto de máquinas controladas e (4) as linhas de telecomunicação para conectar as máquinas ao computador central. Durante a operação, o computador chamava os programas necessários da memória de massa e os enviava (um bloco de cada vez) para a máquina-ferramenta designada. Esse procedimento

Figura 7.8 Configuração geral de um sistema de DNC. A conexão com a MCU está atrás do leitor de fitas.



Legenda: BTR quer dizer "atrás do leitor de fitas" e MCU significa "unidade de controle de máquina"

era repetido para todas as máquinas-ferramenta que estavam sob controle direto do computador. Dizia-se que um sistema DNC disponível comercialmente durante os anos 1970 era capaz de controlar até 256 máquinas.

Além de transmitir dados para as máquinas, o computador central também recebia delas os dados que indicavam o desempenho operacional da fábrica (por exemplo, o número de ciclos completos de usinagem, utilização de máquinas e falhas). Um objetivo central do DNC era atingir a comunicação de duas vias entre as máquinas e o computador central.

Conforme o número de instalações de máquinas de CNC crescia durante os anos 1970 e 1980, um novo modo de DNC emergiu, chamado *controle numérico distribuído* (do inglês, *distributed numerical control* — DNC). A configuração do novo DNC é muito similar àquela mostrada na Figura 7.8, exceto pelo fato de que o computador central é conectado às MCUs, que são, elas próprias, computadores. Isso permite que programas completos sejam enviados às máquinas-ferramenta e não em um bloco de cada vez, além de permitir uma instalação mais fácil e menos custosa de todo o sistema, porque as máquinas de CNC individuais podem ser colocadas em serviço e o CN distribuído pode ser adicionado depois. Computadores excedentes aumentam a confiabilidade do sistema comparado ao DNC original. O novo DNC permite comunicação de mão dupla dos dados entre o chão da fábrica e o computador central, que foi uma das importantes características incluídas no antigo DNC. Todavia, as melhorias nos dispositivos de coleta de dados, bem como os avanços na tecnologia computacional e de comunicações expandiram a variedade e a flexibilidade das informações que podem ser coletadas e distribuídas. Alguns dos conjuntos de dados e informações incluídos no fluxo de comunicação de mão dupla são discriminados na Tabela 7.3. Esse fluxo de informação no DNC é similar ao fluxo de informação no

controle de chão de fábrica discutido no Capítulo 25 (disponível no Companion Website).

Os sistemas distribuídos de CN podem ser configurados de várias maneiras, dependendo do número de máquinas-ferramenta incluídas, da complexidade do serviço, dos requisitos de segurança e da disponibilidade e preferência de equipamentos. Há muitos modos de configurar um sistema de DNC e ilustramos dois tipos na Figura 7.9: (a) rede comutadora (do inglês, *switching network*) e (b) LAN (do inglês, *local area network*). Cada tipo tem muitas variações possíveis.

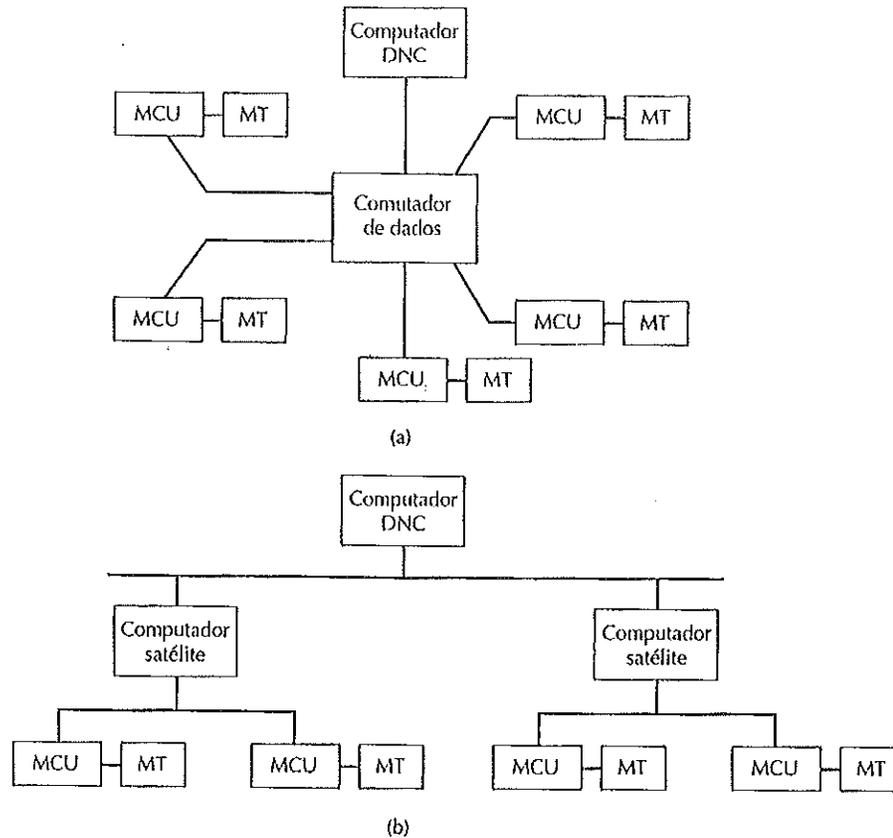
A rede comutadora é o sistema de DNC mais simples de se configurar. Ela usa um comutador de dados para fazer a conexão entre o computador central e cada máquina de CNC, com o objetivo de realizar operações de *download* dos programas e *upload* de dados. A transmissão dos programas para a MCU é realizada pela conexão RS-232-C. Praticamente todas as MCUs comerciais incluem a RS-232-C ou um dispositivo compatível como equipamento padrão. A utilização do comutador de dados limita o número de máquinas que podem ser incluídas no sistema de DNC e esse limite depende de fatores como a complexidade dos programas de usinagem, a frequência de serviço necessária para cada máquina e as capacidades do computador central. O número de máquinas no sistema DNC pode ser aumentado por meio do emprego de um multiplexador de ligação serial RS-232-C.

As redes locais (LANs) têm sido utilizadas para o DNC desde o início dos anos 1980. Muitas estruturas de rede são utilizadas nos sistemas de DNC, entre as quais está a estrutura centralizada ilustrada na Figura 7.9 (b). Nesse arranjo, o sistema de computador é organizado como uma hierarquia, com o computador central (*host*), coordenando vários computadores-satélites que são responsáveis por um certo número de máquinas CNC. Estruturas alternativas de LAN são possíveis, cada uma com

Tabela 7.3 Fluxo de dados e informação entre o computador central e as máquinas-ferramenta no DNC

Dados e informações descarregados do computador central para as máquinas-ferramenta e para o chão de fábrica	Dados e informações carregados a partir das máquinas-ferramenta e do chão de fábrica para o computador central
Programas CN	Contagem de peças
Lista de ferramentas necessárias para o trabalho	Tempos reais do ciclo de usinagem
Instruções de configuração da máquina-ferramenta	Estatística de vida útil da ferramenta
Instruções do operador da máquina	Estatísticas de tempo de uso e não uso da máquina, das quais podem ser acessadas as taxas de utilização e de confiabilidade da máquina
Tempo de ciclo de máquina para o programa de usinagem	
Dados de quando o programa foi utilizado pela última vez	
Informação de agendamento da produção	Dados de qualidade do produto

Figura 7.9 Duas configurações do DNC: (a) rede comutadora e (b) LAN.



Legenda: MCU é a unidade de controle da máquina e MT é a máquina-ferramenta

suas vantagens e desvantagens. As redes locais em diferentes seções e departamentos de uma planta são muitas vezes interconectadas em redes que cobrem toda a planta e as redes de extensão empresarial.

7.4 APLICAÇÕES DO CONTROLE NUMÉRICO

O princípio operacional do CN tem muitas aplicações. Há várias operações industriais nas quais a posição de um cabeçote deve ser controlada de modo relativo à peça ou ao produto sendo processado. As aplicações se dividem em duas categorias: (1) aplicações de usinagem e (2) aplicações não destinadas à usinagem. As aplicações em usinagem são em geral associadas à indústria de metalurgia, enquanto as aplicações não destinadas à usinagem abrangem um grupo diversificado de operações de outras indústrias. Deve ser notado que as aplicações não são sempre identificadas pelo termo "controle numérico"; esse termo é usado principalmente na indústria de máquinas-ferramenta.

7.4.1 Aplicações de máquinas-ferramenta

As aplicações mais comuns do CN estão no controle de máquinas-ferramenta. A usinagem foi a primeira aplicação do CN e ainda é uma das mais importantes comercialmente. Nesta seção, discutimos as aplicações de CN em máquinas-ferramenta, com ênfase nos processos de usinagem de metais.

Operações de usinagem e máquinas-ferramenta de CN. A usinagem é um processo de produção no qual a geometria do trabalho é produzida por meio de remoção de material em excesso (Seção 2.2.1). O controle do movimento relativo entre uma ferramenta de corte e a peça cria a geometria desejada. A usinagem é considerada um dos processos mais versáteis porque pode ser usada na criação de uma variedade ampla de formas e acabamentos superficiais. Ela pode ser realizada em taxas de produção relativamente altas para o fornecimento de peças de alta precisão a um custo relativamente baixo.

Há quatro tipos comuns de operações de usinagem: (a) torneamento, (b) furação, (c) fresamento e (d) retificação. As quatro operações são mostradas na Figura 7.10. Cada uma das operações de usinagem é realizada sob certa combinação de velocidade, avanço e profundidade do corte, coletivamente chamadas de *condições ou parâmetros de corte* para a operação. A terminologia varia um pouco para a retífica. Essas condições de corte são ilustradas na Figura 7.10 para (a) o torneamento, (b) a furação e (c) o fresamento. Considere o fresamento; a *velocidade de corte* é a velocidade da ferramenta (fresa) em relação à peça, medida em metros por minuto (pés por minutos). Isso é normalmente programado na máquina como uma velocidade de rotação do eixo-árvore (rotações por minuto). A velocidade de corte pode ser convertida em velocidade de rotação do eixo-árvore por meio da equação:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (7.1)$$

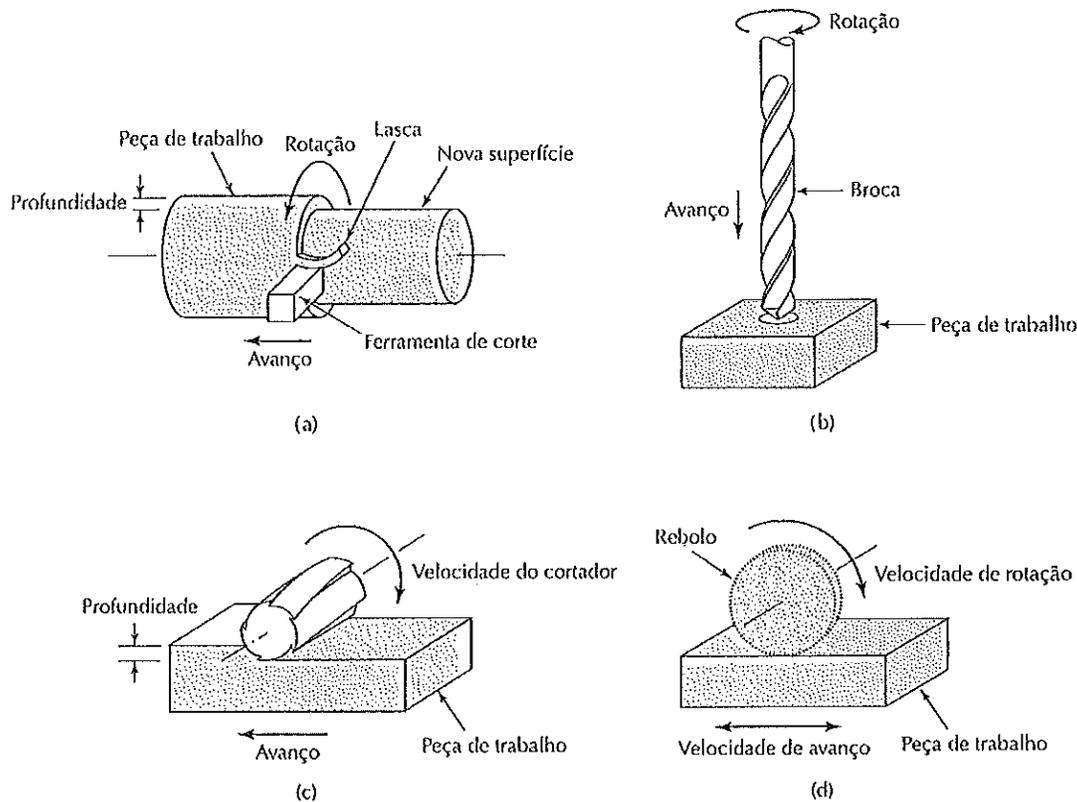
em que N é a velocidade de rotação do eixo (rotações/min ou rpm), v é a velocidade de corte (m/min, pés/min) e D é

o diâmetro da fresa (m, pés). No fresamento, a *alimentação* geralmente é o tamanho do cavaco formado por cada dente na fresa, muitas vezes referenciada como *avanço por dente*, que deve ser programado, naturalmente, na máquina de CN como a velocidade de avanço (a velocidade de movimentação da mesa da máquina-ferramenta). Portanto, a alimentação deve ser convertida em velocidade de avanço como:

$$f_r = Nn_f f \quad (7.2)$$

em que f_r é a velocidade de avanço (mm/min, pol/min), N é a velocidade de rotação (rpm), n_f é o número de dentes da fresa e f é o avanço por dente (mm/dente, pol/dente). Para uma operação de torneamento, a velocidade de avanço é definida como o movimento lateral da ferramenta de corte por rotação da peça; desse modo a unidade é milímetros por rotação (polegadas por rotação). A *profundidade do corte* é a distância que a ferramenta penetra abaixo da superfície original da peça (mm, pol). Esses são os parâmetros que devem ser controlados durante a operação de uma máquina de CN por meio de comandos de posição ou movimentação no programa de usinagem.

Figura 7.10. As quatro operações comuns de usinagem são (a) torneamento, (b) furação, (c) fresamento periférico e (d) retífica de superfície



Cada um dos quatro processos é realizado tradicionalmente em uma máquina-ferramenta projetada para sua execução. O torneamento é realizado em um torno, a furação em uma furadeira, o fresamento em uma fresadora e assim por diante. As máquinas-ferramenta de CN comuns são listadas a seguir junto com suas características típicas:

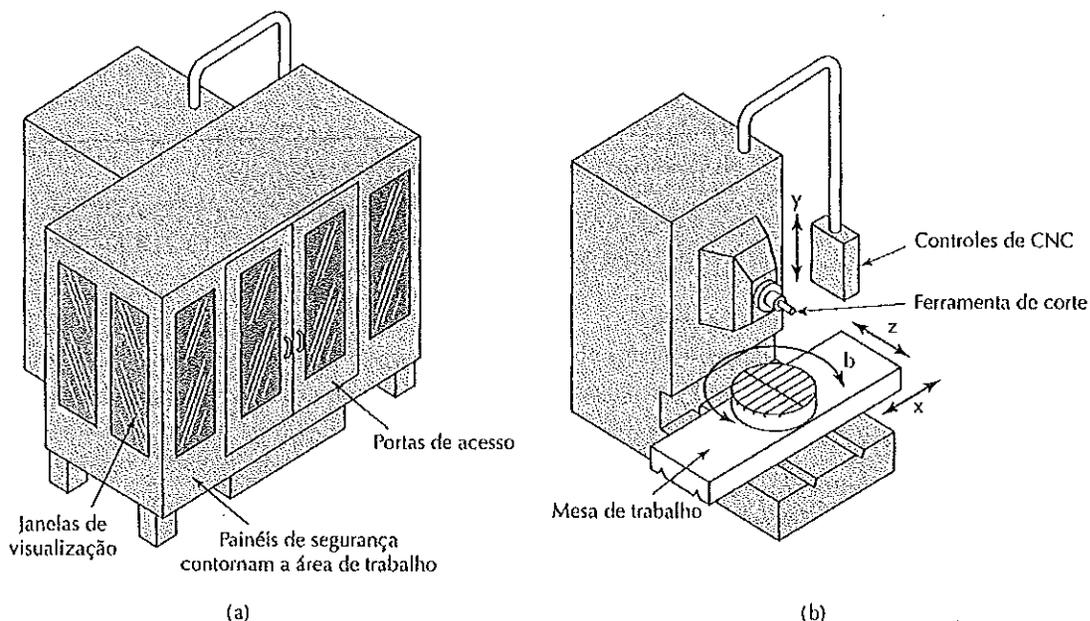
- *Torno de CN*, eixos horizontais ou verticais. O torneamento requer dois eixos e controle contínuo de caminho, seja para produzir uma geometria cilíndrica reta (chamada de giro reto) ou para criar um perfil (giro de contorno).
- *Mandrilhadora de CN*, eixo horizontal e vertical. O mandrilhamento é como o torneamento, exceto pelo fato de que um cilindro interno é criado em vez de um externo. A operação requer o controle contínuo do caminho e de dois eixos.
- *Furadeira de CN*. Essas máquinas usam o controle ponto a ponto do cabeçote (eixo-árvore contendo broca) e o controle de dois eixos (x - y) da mesa de trabalho. Algumas furadeiras de CN têm bancadas contendo seis ou oito brocas. A posição da bancada é programada sob controle do CN, permitindo que brocas diferentes sejam aplicadas a mesma peça durante o ciclo da máquina sem que o operador precise trocar manualmente a ferramenta.

- *Fresadora de CN*. As fresadoras requerem o controle contínuo do caminho para a realização de cortes retos ou operações de contorno. A Figura 7.11 ilustra as características de uma fresadora de quatro eixos.

- *Retífica cilíndrica de CN*. Funciona como uma máquina de torneamento, exceto pelo fato de que a ferramenta é um rebolo. Tem controle contínuo de caminho em dois eixos, como um torno de CN.

O controle numérico teve uma influência profunda no projeto e na operação das máquinas-ferramenta. Um dos efeitos é que a proporção de tempo gasto pela máquina cortando os metais é bem maior que com as máquinas operadas manualmente. Isso faz com que alguns componentes, como o eixo-árvore, a caixa de engrenagens e fusos de alimentação se desgastem mais rapidamente. Esses componentes devem ser projetados para durar mais em máquinas de CN. Em segundo lugar, a adição da unidade de controle eletrônico aumentou o custo da máquina, necessitando mais utilização do equipamento. Em vez de colocar a máquina em operação durante apenas um turno, que é o que acontece normalmente com máquinas operadas manualmente, as máquinas de CN são operadas muitas vezes durante dois ou até mesmo três turnos para se obter o rendimento econômico desejado. Em terceiro lugar, o custo crescente do trabalho alterou as posições relativas do operador humano e da máquina-ferramenta. Em vez de o trabalhador altamente capacitado controlar

Figura 7.11 (a) Fresadora horizontal de CNC de quatro eixos com painéis de segurança instalados e (b) com painéis de segurança removidos para mostrar a configuração típica do eixo horizontal.



todos os aspectos da produção da peça, o operador de máquinas de CN executa apenas a carga e descarga das peças, a troca de ferramenta, faz a limpeza dos cavacos e assim por diante. Com as responsabilidades reduzidas, um operador pode muitas vezes operar duas ou três máquinas automáticas.

As funções da máquina-ferramenta também mudaram. As máquinas de CN são projetadas para ser altamente automáticas e capazes de combinar várias operações em uma preparação que antes precisava de várias máquinas diferentes. Também são projetadas para reduzir o tempo consumido pelos elementos não cortantes no ciclo da operação, como a mudança de ferramentas e a carga ou descarga da peça. Essas mudanças são mais bem exemplificadas por um novo tipo de máquina que não existia antes do desenvolvimento do CN: os centros de usinagem. Um *centro de usinagem* é uma máquina-ferramenta capaz de realizar várias operações de usinagem em uma única peça de uma preparação. As operações envolvem ferramentas rotativas, como fresamento e furação, e a característica que permite que mais de uma operação seja realizada em uma preparação é a troca automática de ferramentas. Discutiremos centros de usinagem e máquinas-ferramenta relacionadas em nossa cobertura de células de produção monoestação (Seção 14.3.3).

Características da aplicação de CN. De modo geral, a tecnologia de CN é apropriada para a baixa até a média produção em uma variedade de média a alta de produtos. Usando a terminologia da Seção 2.4.1, o produto é de baixo a médio Q , médio a alto P . Ao longo de muitos anos de prática nas máquinas de fábricas, certas características de peças foram identificadas como mais adequadas à aplicação do CN. Essas características são as seguintes:

1. **Produção em lote.** O CN é mais apropriado para peças sendo produzidas em lotes de tamanho pequeno ou médio (os tamanhos de lote variam de uma até centenas de unidades). A automação dedicada não seria viável economicamente para essas quantidades devido ao alto custo fixo. A produção manual necessitaria de muitas preparações separadas de máquinas e resultaria em alto custo de trabalho, maior tempo de produção e maior taxa de refugos.
2. **Repetição de pedidos.** Lotes de peças iguais são produzidos em intervalos aleatórios ou periódicos. Uma vez que o programa CN foi preparado, as peças podem ser produzidas economicamente em lotes subsequentes usando o mesmo programa.
3. **Geometria complexa de peças.** A geometria de peça inclui superfícies curvas complexas como as encontra-

das em aerofólios e pás de turbina. Superfícies definidas de forma matemática como círculos e hélices também podem ser realizadas com CN. Algumas dessas geometrias seriam difíceis, se não impossíveis, de ser produzidas de forma precisa com as máquinas-ferramenta convencionais.

4. **Muito metal precisa ser removido da peça.** Essa condição é muitas vezes associada à geometria complexa das peças. O volume e o peso da peça usinada são uma fração relativamente pequena do bloco inicial. Essas peças são comuns na indústria de aviação na fabricação de seções estruturais grandes com baixo peso.
5. **Muitas operações de usinagem separadas na peça.** Isso se aplica às peças que consistem de várias funções de usinagem, necessitando de diferentes ferramentas de corte, como furos cpm ou sem rosca, canais, planos e assim por diante. Se essas operações fossem usinadas por uma série de operações manuais, muitas preparações seriam necessárias. O número de preparações pode ser reduzido com o uso do CN.
6. **A peça é cara.** Esse fator é muitas vezes consequência de um ou mais dos fatores 3, 4 e 5 anteriores. Pode também ser resultado da utilização de matéria-prima de alto custo. Quando a peça é cara, os erros no processamento custam muito e o uso do CN ajuda a reduzir o retrabalho e as perdas por refugo.

Ainda que essas características pertençam principalmente à usinagem, elas são adaptáveis a outras aplicações da produção.

O CN para outros processos de metalurgia. As máquinas-ferramenta de CN foram desenvolvidas para outros processos de metalurgia além das operações de usinagem. Essas máquinas incluem as seguintes:

- **Punçoneiras** para a perfuração de furos em chapas de metal. A operação de CN de dois eixos é similar à da furadeira, exceto pelo fato de que os furos são produzidos por punção em vez de broca.
- **Prensas** para a dobra de chapas de metal. Em vez de cortar as chapas de metal, esses sistemas as dobram de acordo com comandos programados.
- **Máquinas de solda.** Tanto as máquinas de solda a ponto como as de soldagem contínua estão disponíveis com controles automáticos baseados em CN.
- **Máquinas de corte térmico**, como oxicoorte, o corte a laser e o corte com plasma. O produto é normalmente plano, desse modo o controle de dois eixos é adequa-

do. Algumas máquinas de corte a laser podem fazer furos em peças pré-formadas de chapas de metal, necessitando controle de quatro ou cinco eixos.

- *Máquinas para curvar tubos.* As máquinas automáticas para curvar tubos são programadas para controlar a posição (ao longo da extensão do tubo) e o ângulo da curvatura. As aplicações importantes incluem chassis para bicicletas e motocicletas.

7.4.2 Outras aplicações do CN

O princípio operacional do CN tem uma série de outras aplicações além do controle de máquinas-ferramenta. Algumas das máquinas com controles do tipo CN, que posicionam um cabeçote em relação a um objeto sendo processado, são as seguintes:

- *Máquinas elétricas de enrolar fios.* Introduzidas pela Gardner Denver Corporation, foram usadas para enrolar e encordoar fios em volta dos pinos traseiros das placas de circuitos elétricos com o objetivo de estabelecer conexão entre os componentes da parte da frente da placa. O programa de posições de coordenadas que define as conexões do painel traseiro é determinado pelos dados do projeto e alimentado à máquina de enrolar fios. Esse tipo de equipamento foi usado por empresas de computação e outras companhias na indústria eletrônica.
- *Máquinas de inserção de componentes.* Esse equipamento é usado para posicionar e inserir um componente em um plano $x-y$, normalmente uma placa plana ou um painel. O programa especifica as posições dos eixos x e y no plano em que os componentes devem ser posicionados. As máquinas de inserção de componentes têm muitas aplicações na inserção de componentes eletrônicos em placas de circuito impresso. Elas estão disponíveis tanto para aplicações de inserção através de furos como para aplicações de montagem em superfície, bem como para operações similares de montagem mecânica do tipo inserção.
- *Plotters.* Os *plotters* automatizados servem como um dos dispositivos de saída para a um sistema de CAD/CAM (projeto assistido por computador/produção assistida por computador, do inglês, *computer-aided design/computer-aided manufacturing*). O projeto de um produto e seus componentes é desenvolvido no sistema de CAD/CAM e as iterações do projeto são desenvolvidas no monitor gráfico em vez das pranchetas de desenho. Quando o projeto é finalizado, o resultado é impresso no *plotter x-y* de alta velocidade.

- *Máquinas de medição por coordenadas (MMC).* Uma máquina de medição por coordenadas (do inglês, *coordinate-measuring machine — CMM*) é uma máquina de inspeção usada para medir ou checar dimensões de uma peça. A MMC contém uma sonda que pode ser manipulada em três eixos e que identifica quando é feito contato com a superfície da peça. A localização da ponta da sonda é determinada pela unidade de controle da MMC, indicando, assim, alguma dimensão da peça. Muitas máquinas de medição por coordenadas são programadas para executar inspeções automáticas no CN. Discutimos essas máquinas na Seção 22.4.

- *Máquina de deposição de camadas de fita para compósitos poliméricos.* O cabeçote dessa máquina é um distribuidor de fita de material compósito com matriz de polímero não curado. A máquina é programada para aplicar a fita na superfície de um molde, seguindo um padrão cruzado de ida e volta para obter a espessura desejada. O resultado é um painel multicamadas com a mesma forma do molde.

- *Máquinas elétricas de enrolar filamentos para compósitos poliméricos.* Essas são similares às anteriores, exceto pelo fato de que um filamento é mergulhado em polímero não curado e depois enrolado em uma forma aproximadamente cilíndrica seguindo um padrão de rotação.

Aplicações adicionais do CN incluem o corte de tecido, trabalho de malha e rebitagem.

7.4.3 Vantagens e desvantagens do CN

Quando a aplicação de produção satisfaz as características identificadas na Seção 7.4.1, o CN apresenta muitas vantagens sobre os métodos de produção manual. Essas vantagens são traduzidas em economia para a companhia usuária. Todavia, o CN envolve uma tecnologia mais sofisticada que a utilizada por métodos convencionais de produção e há custos que devem ser considerados para a aplicação efetiva da tecnologia. Nesta seção, examinamos vantagens e desvantagens do CN.

Vantagens do CN. As vantagens geralmente atribuídas ao CN, com ênfase nas aplicações de usinagem, são as seguintes:

- *Tempo não produtivo é reduzido.* O CN não pode otimizar o próprio processo de corte do metal, mas pode reduzir a proporção de tempo em que a máquina não está cortando o metal. Essa redução é atingida por meio de poucas preparações, menor tempo de preparação, de manuseio da peça e da troca automática de

ferramentas em algumas máquinas CN. Essa vantagem se traduz em economias com o custo de trabalho e na diminuição do tempo transcorrido para a produção das peças.

- *Grande precisão e repetibilidade.* Comparado a métodos de produção manuais, o CN reduz ou elimina as variações que ocorrem por conta de diferenças nas habilidades de operadores, fadiga e outros fatores atribuídos às variabilidades inerentes aos seres humanos. As peças produzidas são mais próximas das dimensões nominais e há menos variações dimensionais nas peças do lote.
- *Baixas taxas de refugo.* Como são alcançadas maior precisão e repetibilidade e por conta da redução dos erros humanos durante a produção, mais peças são produzidas dentro da tolerância. Como consequência, uma menor quantidade de refugo pode ser planejada no agendamento da produção, de modo que menos peças sejam feitas em cada lote, tendo como resultado uma economia no tempo de produção.
- *Os requisitos de inspeção são reduzidos.* Menos inspeção é necessária quando o CN é usado, pois as peças produzidas a partir do mesmo programa CN são praticamente idênticas. Uma vez que o programa foi verificado, não há necessidade do alto nível de inspeção de amostras — o que é necessário quando as peças são produzidas por métodos manuais convencionais. Exceto pelo desgaste de ferramentas e falhas nos equipamentos, o CN produz réplicas exatas da peça a cada ciclo.
- *São possíveis geometrias de peça mais complexas.* A tecnologia do CN expandiu a variedade de geometrias de peças possíveis além das que são realizáveis por métodos manuais de produção. Essas são vantagens no projeto de produto de várias formas: (1) mais características funcionais podem ser projetadas em uma única peça, reduzindo assim o número total de peças no produto e o custo de montagem associado, (2) superfícies definidas matematicamente podem ser fabricadas com alta precisão e (3) são expandidos os limites dentro dos quais a imaginação do projetista pode vagar para a criação de novas geometrias de peças e produtos.
- *Mudanças de engenharia podem ser acomodadas mais graciosamente.* Em vez de fazer alterações em uma fixação complexa para que a peça possa ser usinada de acordo com a mudança de engenharia, revisões são feitas no programa CN para realizar a modificação.
- *São necessárias fixações mais simples.* O CN requer fixações mais simples porque o posicionamento preciso da ferramenta é atingido pela máquina-ferramenta de CN. O posicionamento da ferramenta não precisa ser projetado junto com o gabarito.
- *Tempos menores de execução da produção.* Os serviços podem ser preparados mais rapidamente e menos preparações são necessárias por peça quando o CN é usado. Isso resulta na diminuição do tempo transcorrido entre a liberação do pedido e sua execução.
- *Estoque de peças reduzido.* Como são necessárias menos preparações e a mudança de trabalhos é mais fácil e rápida, o CN permite a produção de peças em menores lotes. O tamanho econômico do lote é menor no CN do que na produção em lote convencional. O estoque médio de peças é então reduzido.
- *Menos espaço necessário de chão de fábrica.* Isso resulta do fato de que menos máquinas de CN são necessárias para realizar a mesma quantidade de trabalho comparado ao número de máquinas-ferramenta convencionais necessárias. O estoque reduzido de peças também contribui para a redução da necessidade de espaço.
- *Os requisitos de nível de capacidade do operador são reduzidos.* Os trabalhadores precisam de menos capacitação para operar uma máquina de CN do que para operar uma máquina-ferramenta convencional. Normalmente cuidar de uma máquina-ferramenta CN consiste apenas da carga e descarga das peças e da troca periódica de ferramentas. O ciclo de usinagem é realizado sob o controle do programa. Realizar um ciclo de usinagem comparável em uma máquina convencional requer muito mais participação do operador e um nível mais alto de treinamento e habilidade.

Desvantagens do CN. Há certos compromissos para com a tecnologia de CN que devem ser assumidos pela fábrica que instala equipamentos desse tipo, e esses compromissos, que em sua maioria envolvem custos adicionais para a companhia, podem ser vistos como desvantagens. As desvantagens do CN incluem:

- *Alto custo de investimento.* Uma máquina-ferramenta de CN tem custo inicial mais alto que o de uma máquina-ferramenta convencional comparável. Há muitas razões para isso: (1) máquinas de CN incluem controles de CNC e *hardware* de eletrônica, (2) os custos de desenvolvimento de *software* dos fabricantes dos controles de CNC devem ser incluídos no custo da máquina, (3) geralmente componentes mecânicos mais confiáveis

são usados nas máquinas de CN e (4) muitas vezes as máquinas-ferramenta de CN possuem funcionalidades adicionais não incluídas em máquinas convencionais, como os trocadores automáticos de ferramentas e os trocadores de peças (Seção 14.3.3).

- *Maior esforço de manutenção.* Em geral, o equipamento de CN requer mais manutenção que os equipamentos convencionais, o que se traduz em maiores custos de manutenção e reparos.
- Isso é devido muito ao computador e a outras partes eletrônicas incluídas em um sistema moderno de CN. A equipe de manutenção deve incluir pessoal treinado para manter e reparar esse tipo de equipamento.
- *Programação de usinagem.* Os equipamentos de CN devem ser programados. Para ser justo, deve-se mencionar que o planejamento do processo precisa ser executado para qualquer peça, seja produzida ou não em equipamentos de CN. Entretanto, a programação CN é um passo especial na preparação da produção em lote que não existe em operações de fábricas convencionais.
- *Maior utilização de equipamentos de CN.* Para maximizar os benefícios econômicos de uma máquina-ferramenta de CN, ela deve ser operada normalmente em vários turnos. Isso pode significar de um a dois turnos extras em relação à operação normal da planta, com necessidade de supervisão e outros postos de suporte.

7.5 ANÁLISE DE ENGENHARIA DOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DO CN

Durante o processamento, um sistema de posicionamento por CN converte os valores de coordenadas dos eixos

no programa CN em posições relativas da ferramenta e da peça durante o processamento. Consideremos o sistema de posicionamento simples mostrado na Figura 7.12. O sistema consiste de uma ferramenta de corte e uma mesa de trabalho na qual a peça é fixada. A mesa é projetada para mover a peça em relação à ferramenta. A mesa de trabalho se move de maneira linear, por meio de um parafuso de avanço rotativo (fuso), que é controlado por um motor de passo ou um servomotor. Para simplificar, mostramos apenas um eixo no nosso esquema. Para oferecer a capacidade $x-y$, o sistema mostrado teria de ser montado em cima de um segundo eixo, perpendicular ao primeiro. O parafuso de avanço tem um dado passo p (pol/volta, mm/volta). Dessa forma, a mesa se move a uma distância igual ao passo para cada rotação. A velocidade da mesa de trabalho, que corresponde à velocidade de avanço de uma operação de usinagem, é determinada pela velocidade de rotação do parafuso de avanço.

Dois tipos de sistema de controle de posicionamento são usados em sistemas de CN: (a) malha aberta e (b) malha fechada, como mostra a Figura 7.13. Um sistema em malha aberta funciona sem verificar se a posição atual atingida no movimento é a mesma que a desejada. Um sistema em malha fechada usa medições por realimentação para confirmar se a posição final da mesa de trabalho é a posição especificada pelo programa. Os sistemas de malha aberta custam bem menos que os sistemas de malha fechada e são mais apropriados quando a força de resistência à atuação do movimento é mínima. Os sistemas de malha aberta são normalmente específicos para máquinas que realizam operações de caminho contínuo, como o fresamento ou o torneamento, nas quais há forças significativas resistindo ao movimento da ferramenta de corte.

Figura 7.12 Arranjo de motor e parafuso de avanço em um sistema de posicionamento por CN

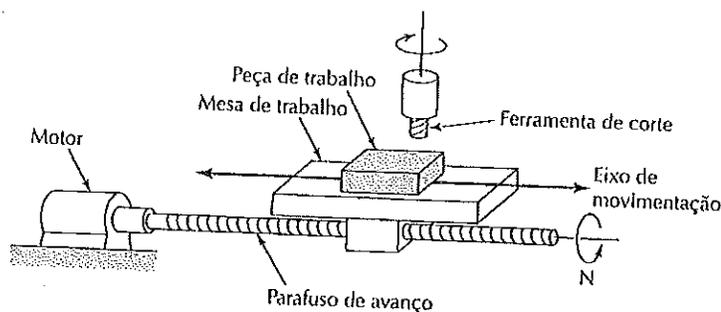
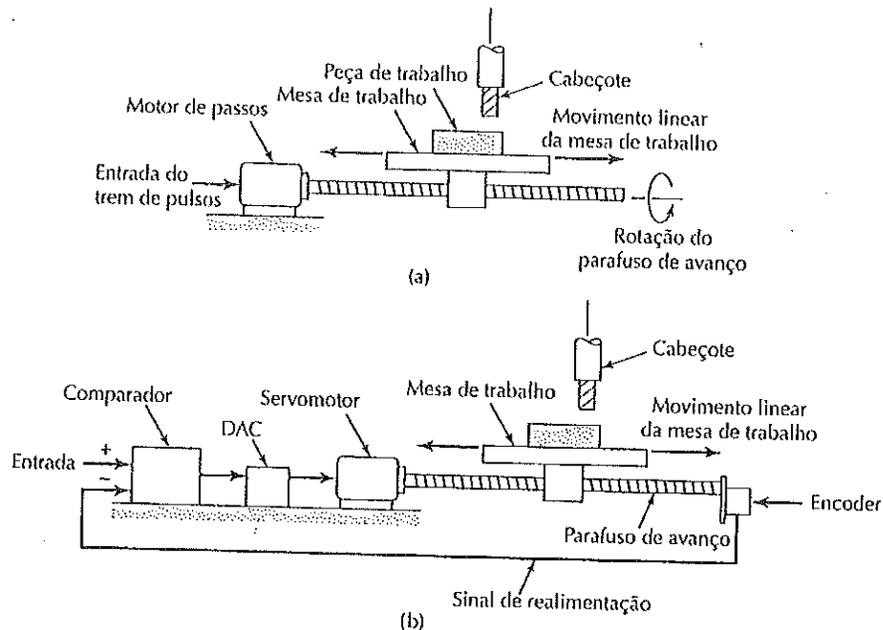


Figura 7.13 Dois tipos de controle de movimento em CN: (a) malha aberta e (b) malha fechada



7.5.1 Sistemas de posicionamento em malha aberta

Um sistema de posicionamento em malha aberta usa normalmente um motor de passo que gira um parafuso de avanço (fuso). Esse tipo de motor é controlado por uma série de pulsos elétricos, que são gerados pela MCU em um sistema de CN. Cada pulso faz o motor girar uma fração de rotação, chamada de ângulo de passo. Os ângulos de passo possíveis devem respeitar a relação:

$$\alpha = \frac{360}{n_p} \quad (7.3)$$

em que α é o ângulo de passo (graus) e n_p é o número de passos por volta do motor, que deve ser um valor inteiro. O ângulo pelo qual o eixo do motor gira é dado por:

$$A_m = n_p \alpha \quad (7.4)$$

em que A_m é o ângulo de rotação do eixo do motor (graus), n_p é o número de pulsos recebidos pelo motor e α é o ângulo de passo (graus/pulso). O eixo do motor é normalmente conectado ao fuso por uma caixa de transmissão, que reduz a rotação angular do fuso. O ângulo da rotação do fuso deve levar em consideração a relação de velocidade de como sendo

$$A = \frac{n_p \alpha}{r_g} \quad (7.5)$$

em que A é o ângulo de rotação do fuso (graus) e r_g é a relação de velocidade, definida como o número de voltas do motor para cada volta do fuso. Isto é,

$$r_g = \frac{A_m}{A} = \frac{N_m}{N} \quad (7.6)$$

em que N_m é a velocidade de rotação do motor (rpm) e N é a velocidade de rotação do fuso (rpm).

O movimento linear da mesa de trabalho é dado pelo número de rotações completas e parciais do fuso multiplicado por seu passo,

$$x = \frac{pA}{360} \quad (7.7)$$

em que x é a posição no eixo x em relação à posição inicial (mm, pol), p é o passo do fuso (mm/rotação, pol/rotação) e $A/360$ é o número de rotações do fuso. O número de pulsos necessários para alcançar uma posição específica no eixo x em um sistema ponto a ponto pode ser encontrado por meio da combinação das duas equações anteriores, como:

$$n_p = \frac{360xr_g}{p\alpha} \text{ ou } \frac{n_s xr_g}{p} \quad (7.8)$$

em que a segunda expressão ao lado direito é obtida pela substituição de $360/\alpha$ por n_s , o que é obtido por meio do rearranjo da Equação (7.3).

Os pulsos de controle são transmitidos a partir do gerador em uma certa frequência, que move a mesa de trabalho a uma velocidade de avanço correspondente na direção do eixo do fuso. A velocidade de rotação do fuso depende da frequência do trem de pulsos, como em:

$$N = \frac{60f_p}{n_s r_g} \quad (7.9)$$

em que N é a velocidade de rotação do fuso (rpm), f_p é a frequência do trem de pulsos (Hz, pulsos/s) e n_s são os passos por rotação ou pulsos por rotação. Para uma mesa de dois eixos com controle contínuo de caminho, as velocidades relativas dos eixos são coordenadas para se obter a direção desejada de movimento.

A velocidade de movimentação da mesa na direção do eixo do fuso é determinada pela velocidade de rotação, como:

$$v_t = f_r = Np \quad (7.10)$$

em que v_t é a velocidade de movimentação da mesa (mm/min, pol/min), f_r é a velocidade de avanço da mesa (mm/min, pol/min), N é a velocidade de rotação do fuso (rpm) e p é o passo do fuso (mm/rotação, pol/rotação).

A frequência do trem de pulsos necessária para mover a mesa em uma velocidade de avanço linear específica pode ser obtida por meio da combinação e do rearranjo das equações (7.9) e (7.10) para se encontrar f_p :

$$f_p = \frac{v_t n_s r_g}{60p} \text{ ou } \frac{f_r n_s r_g}{60p} \quad (7.11)$$

EXEMPLO 7.1

Posicionamento por malha aberta no CN

A mesa de trabalho de um sistema de posicionamento é dirigida por um fuso cujo passo é de 6 mm. O fuso é conectado à saída do eixo de um motor de passo por uma caixa de transmissão cuja relação de velocidade é de 5:1 (cinco voltas do motor para uma volta do fuso). O motor de passo tem 48 passos por volta. A mesa deve se mover a uma posição de 250 mm de sua posição atual a uma velocidade linear de 500 mm/min. Determine (a) quantos pulsos são necessários para mover a mesa pela distância especificada e (b) a velocidade de giro e a frequência necessária dos pulsos do motor para atingir a velocidade desejada da mesa.

Solução: (a) Fazendo o rearranjo da Equação (7.7) para encontrar o ângulo de rotação A do fuso correspondente à distância x que é de 250 mm,

$$A = \frac{360x}{p} = \frac{360(250)}{6} = 15.000^\circ$$

Com 48 passos por volta, cada passo tem um ângulo de

$$\alpha = \frac{360}{48} = 7,5''$$

Dessa forma, o número de pulsos para mover a mesa por 250 mm é

$$n_p = \frac{360x r_g}{p\alpha} = \frac{A r_g}{\alpha} = \frac{15.000(5)}{7,5} = 10.000 \text{ pulsos.}$$

(b) A velocidade de rotação do fuso correspondente a uma velocidade da mesa de 500 mm/min pode ser determinada pela Equação (7.10):

$$N = \frac{v_t}{p} = \frac{500}{6} = 83,333 \text{ rev/min}$$

A Equação (7.6) pode ser usada para encontrar a velocidade do motor:

$$N_m = r_g N = 5(83,333) = 416,667 \text{ rev/min}$$

A frequência de pulsos aplicada para mover a mesa é dada pela Equação (7.11):

$$f_p = \frac{v_t n_s r_g}{60p} = \frac{500(48)(5)}{60(6)} = 333,333 \text{ Hz}$$

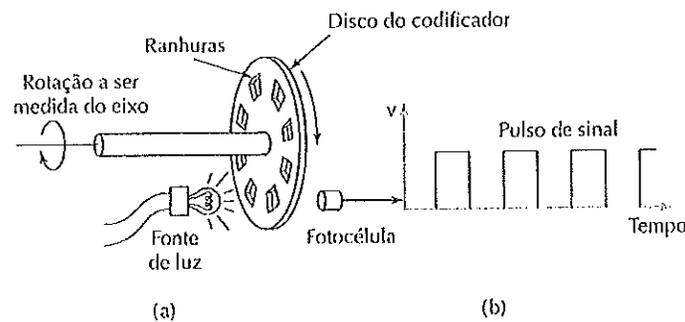
7.5.2 Sistemas de posicionamento em malha fechada

Um sistema de CN em malha fechada, ilustrado na Figura 7.13 (b), utiliza servomotores para garantir que a mesa de trabalho seja movida para a posição desejada. Um sensor de realimentação comum usado para CN (e também para robôs industriais) é o encoder (codificador ótico), mostrado na Figura 7.14. Um *encoder* é um dispositivo para medição de velocidade de rotação, que consiste de uma fonte de luz e fotodetectores em cada lado de um disco. O disco contém ranhuras uniformemente distribuídas ao longo da parte exterior de sua face. Essas ranhuras permitem a passagem da luz e a energização do fotodetector. O disco é conectado ao eixo de rotação cuja posição angular e velocidade devem ser medidos. Conforme o eixo gira, as ranhuras fazem com que a luz seja vista pelo fotodetector como uma série de *flashes*. Os *flashes* são convertidos em um número igual de pulsos elétricos e, pela contagem dos pulsos e cálculo da frequência do trem de pulsos, pode-se determinar a posição da mesa e sua velocidade.

As equações que definem a operação de um sistema de CN em malha fechada são similares às do sistema em malha aberta. No encoder básico, o ângulo entre as ranhuras do disco deve satisfazer o seguinte requisito:

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \quad (7.12)$$

Figura 7.14 Encoder: (a) instrumentos e (b) série de pulsos emitidos para medir a rotação do disco



em que α é o ângulo entre as ranhuras (graus/ranhura) e n_p é o número de ranhuras no disco (ranhuras/rotação). Para dada rotação angular do eixo do encoder, o número de pulsos sentidos por ele é:

$$n_p = \frac{A}{\alpha} \quad (7.13)$$

em que n_p é a contagem de pulsos emitida pelo encoder, A é o ângulo de rotação do eixo do encoder (graus) e α é o ângulo entre as ranhuras, convertido em graus por pulso. A contagem de pulsos pode ser usada para determinar a posição linear da mesa de trabalho no eixo x por meio da utilização do passo do fuso na equação. Dessa maneira,

$$x = \frac{pn_p}{n_s} \quad (7.14)$$

em que n_p e n_s são definidos acima e p é o passo do fuso (mm/rotação, pol/rotação).

A velocidade da mesa de trabalho, que normalmente é a velocidade de avanço em uma operação de usinagem, é obtida a partir da frequência do trem de pulsos, como:

$$v_t = f_r = \frac{60pf_p}{n_s} \quad (7.15)$$

em que v_t é a velocidade da mesa de trabalho (mm/min, pol/min), f_r é a velocidade de avanço (mm/min, pol/min), f_p é a frequência do trem de pulsos emitida pelo encoder (Hz, pulsos/segundo) e a constante 60 converte a velocidade da mesa de trabalho e a de avanço de milímetros por segundo (polegadas por segundo) para milímetros por minuto (polegadas por minuto).

O trem de pulsos gerado pelo encoder é comparado com as coordenadas da posição e a velocidade de avanço especificadas no programa de usinagem, e a diferença é usada pela MCU para acionar o servomotor, que por sua vez move a mesa de trabalho. Um conversor analógico-digital

(Seção 6.4) é usado para converter os sinais digitais usados pela MCU em corrente contínua analógica que energiza o motor. Os sistemas de CN em malha fechada do tipo descrito aqui são apropriados quando uma força reacionária resistente ao movimento da mesa. Máquinas-ferramenta de corte de metais que realizam operações de corte em caminho contínuo, como o fresamento e o torneamento, enquadram-se nessa categoria.

EXEMPLO 7.2

Posicionamento por malha fechada no CN

Uma mesa de trabalho de CN funciona com posicionamento por malha fechada. O sistema consiste de um servomotor, fuso e encoder. O fuso tem um passo de 6 mm e é acoplado ao eixo do motor com uma relação de velocidade de 5:1 (cinco voltas do motor para cada volta do fuso). O encoder gera 48 pulsos/rotação em seu eixo de saída. A mesa foi programada para se mover a uma distância de 250 mm com uma velocidade de avanço igual a 500 mm/min. Determine (a) quantos pulsos devem ser recebidos pelo sistema de controle para garantir que a mesa se moveu exatos 250 mm, (b) a frequência dos pulsos do encoder e (c) a velocidade de rotação do motor que corresponde à velocidade de avanço especificada.

Solução: (a) Fazendo o rearranjo da Equação (7.14) para encontrar n_p ,

$$n_p = \frac{xn_s}{p} = \frac{250(48)}{6} = 2.000 \text{ pulsos}$$

(b) A frequência dos pulsos correspondente a 500 mm/min pode ser obtida pelo rearranjo da Equação (7.15):

$$f_p = \frac{f_r n_s}{60p} = \frac{500(48)}{60(6)} = 66,667 \text{ Hz}$$

(c) A velocidade de rotação do motor é igual à velocidade da mesa (velocidade de avanço) dividida pelo passo do fuso, corrigido pela relação de velocidade:

$$N_m = \frac{f_r f_r}{p} = \frac{5(500)}{6} = 416,667 \text{ rev/min}$$

Note que a velocidade de rotação do motor tem o mesmo valor numérico do Exemplo 7.1 porque a velocidade da mesa de trabalho e a relação de velocidades são as mesmas.

7.5.3 Precisão no posicionamento por CN

Para usinar ou realizar outros processos em uma peça de trabalho de forma exata, o sistema de posicionamento do CN deve possuir um alto nível de precisão. Três medidas de precisão podem ser definidas para um sistema de posicionamento de CN: (1) resolução do controle, (2) precisão e (3) repetibilidade. Esses termos são explicados mais facilmente considerando-se um único eixo do sistema de posicionamento, como mostrado na Figura 7.15. A resolução do controle se refere à habilidade do sistema de controle em dividir o curso total do movimento do eixo em pontos distribuídos uniformemente que podem ser distinguidos pela MCU. A *resolução do controle* é definida como a distância que separa dois pontos endereçáveis adjacentes no movimento do eixo. Os *pontos endereçáveis* são as posições ao longo do eixo para as quais a mesa de trabalho pode ser enviada. É desejável que a resolução do controle seja a menor possível, o que depende de limitações impostas (1) pelos componentes eletromecânicos do sistema de posicionamento e/ou (2) pelo número de bits usados pelo controlador para definir a posição das coordenadas de localização no eixo.

Vários fatores eletromecânicos afetam a resolução do controle, incluindo o passo do fuso, a relação de velocidades do sistema, além do ângulo de passo em um motor de passo para um sistema em malha aberta e o ângulo entre as ranhuras de um disco de encoder para um sistema em malha fechada. Em um sistema de posicionamento em malha aberta controlado por um motor de passo, esses fatores podem ser combinados em uma expressão que define a resolução de controle, como:

$$CR_1 = \frac{p}{n_s r_g} \quad (7.16)$$

em que CR_1 é a resolução de controle dos componentes eletromecânicos (mm, pol), p é o passo do fuso (mm/rotação, pol/rotação), n_s é o número de passos por rotação e r_g é a relação de velocidades entre o eixo do motor e o fuso, como o definido na Equação (7.6). A mesma expressão pode ser usada para um sistema de posicionamento em malha fechada.

O segundo fator que limita a resolução do controle é o número de bits usados pela MCU para especificar os valores das coordenadas no eixo. Por exemplo, essa limitação pode ser imposta pela capacidade de armazenamento de bits do controlador. Se B é o número de bits destinados ao eixo no registrador, então o número de pontos de controle pelo qual o curso do eixo pode ser dividido é 2^B . Considerando que os pontos de controle são distribuídos de forma uniforme ao longo do curso, então:

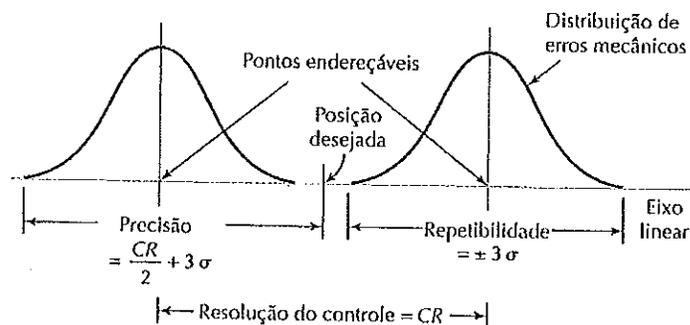
$$CR_2 = \frac{L}{2^B - 1} \quad (7.17)$$

em que CR_2 é a resolução do controle do sistema de controle por computador (mm, pol) e L é o curso do eixo (mm, pol). A resolução do controle do sistema de posicionamento é o máximo dos dois valores, ou seja,

$$CR = \text{Máx}\{CR_1, CR_2\} \quad (7.18)$$

Um critério desejável é que $CR_2 \leq CR_1$, o que significa que o sistema eletromecânico é o fator limitante que determina a resolução do controle. A capacidade de armazenamento de bits de um controlador computadorizado moderno é suficiente para satisfazer esse critério, exceto em situações incomuns. Resoluções de 0,0025 mm (0,0001 pol) estão dentro do estado atual da tecnologia de CN.

Figura 7.15 Uma porção de um eixo linear de sistema de posicionamento, com definição de resolução do controle, precisão e repetibilidade



A capacidade do sistema de posicionamento em mover uma mesa de trabalho para uma posição exata definida por um dado ponto endereçável é limitada pelos erros mecânicos que se devem às várias imperfeições do sistema mecânico. Essas imperfeições incluem o jogo entre o fuso e a mesa de trabalho, folga nas engrenagens e defeitos nos componentes das máquinas. Consideramos que os erros mecânicos formam uma distribuição estatística normal imparcial sobre o ponto de controle, cuja média μ é igual a zero. Consideramos ainda que o desvio padrão σ da distribuição é constante ao longo do curso do eixo em questão. Dadas essas considerações, quase todos os erros mecânicos (99,73 por cento) estão contidos em $\pm 3\sigma$ do ponto de controle. Isso é representado na Figura 7.15 para uma porção do curso do eixo que inclui dois pontos de controle.

Vamos agora usar essas definições de resolução do controle e da distribuição de erros mecânicos para definir a precisão e a repetibilidade de um sistema de posicionamento. A precisão é definida sob as piores condições, nas quais o ponto-alvo desejado encontra-se no meio de dois pontos endereçáveis adjacentes. Como a mesa só pode ser movida em direção a um ou outro ponto endereçável, haverá um erro em sua posição final. Esse é o maior erro possível de posicionamento, porque, se o alvo estiver mais perto de qualquer dos dois pontos, então a mesa seria movida para o ponto de controle mais próximo e o erro seria menor. É apropriado definir a precisão sob o pior cenário. A precisão de qualquer eixo de um sistema de posicionamento é o maior erro possível que pode ocorrer entre o ponto-alvo desejado e a posição real tomada pelo sistema. Em forma de equação,

$$\text{Precisão} = \frac{CR}{2} + 3\sigma \quad (7.19)$$

em que CR é a resolução do controle (mm, pol) e σ é o desvio padrão da distribuição de erros. As precisões de máquinas-ferramenta são geralmente expressadas para um certo curso de movimento de mesa, por exemplo, $\pm 0,01$ mm para 250 mm ($\pm 0,0004$ pol para 10 pol) de movimentação da mesa.

A repetibilidade se refere à capacidade do sistema de posicionamento de retornar a um dado ponto endereçável programado anteriormente. Essa capacidade pode ser medida em termos dos erros de posicionamento encontrados quando o sistema tenta se posicionar em um ponto endereçável. Os erros de posicionamento são uma manifestação dos erros mecânicos do sistema de posicionamento, que seguem uma distribuição normal, como aceito anteriormente. Dessa forma, a repetibilidade de qualquer dado eixo de um sistema de posicionamento é ± 3 desvios-

-padrão da distribuição de erros mecânicos associados ao eixo. Isso pode ser escrito como:

$$\text{Repetibilidade} = \pm 3\sigma \quad (7.20)$$

A repetibilidade de uma máquina-ferramenta de CN moderna é de cerca de $\pm 0,0025$ mm ($\pm 0,0001$ pol).

EXEMPLO 7.3

Resolução do controle, precisão e repetibilidade do CN
Suponha que as imprecisões mecânicas no sistema de posicionamento em malha aberta do Exemplo 7.1 sejam descritas por uma distribuição normal com desvio padrão σ igual a 0,005 mm. O curso do eixo da mesa de trabalho é de 1.000 mm e há 16 bits no registrador binário usado pelo controlador digital para armazenar a posição programada. Outros parâmetros relevantes do Exemplo 7.1 são os seguintes: o passo p é igual a 6 mm, a relação de velocidade entre o eixo do motor e o parafuso de avanço r_g é igual a 5 e o número de passos do motor de passo n_s é igual a 48. Determine (a) a resolução do controle, (b) a precisão e (c) a repetibilidade do sistema de posicionamento.

Solução: (a) A resolução do controle é a maior entre CR_1 e CR_2 , conforme definido pelas equações (7.16) e (7.17).

$$CR_1 = \frac{p}{n_s r_g} = \frac{6}{48(5)} = 0,025 \text{ mm}$$

$$CR_2 = \frac{1000}{2^{16} - 1} = \frac{1000}{65.535} = 0,01526 \text{ mm}$$

$$CR = \text{Máx}\{0,025, 0,01526\} = 0,025 \text{ mm}$$

(b) A precisão é dada pela Equação (7.19):

$$\text{Precisão} = 0,5(0,025) + 3(0,005) = 0,0275 \text{ mm}$$

(c) A repetibilidade é de $\pm 3(0,005) = \pm 0,015$ mm

7.6 PROGRAMAÇÃO DAS PEÇAS NO CN

A programação CN consiste do planejamento e da documentação da sequência de etapas do processamento a ser realizado pela máquina de CN. O programador deve ter conhecimentos de usinagem (ou outra tecnologia de processamento para qual a máquina de CN seja projetada), bem como de geometria e trigonometria. A parte de documentação da programação envolve o meio de entrada usado para transmitir o programa de instruções para a unidade de controle da máquina de CN (MCU). O meio tradicional de transmissão de entrada, datando das primeiras máquinas de CN nos anos de 1950, era a fita perfurada de uma polegada de largura. Recentemente, a fita magnética e os

disquetes passaram a ser usados para o CN devido ao fato de sua densidade de dados ser muito maior.

A programação de usinagem pode ser realizada usando uma série de procedimentos que variam dos mais manuais até os mais automatizados métodos. Esses métodos são (1) programação manual, (2) programação assistida por computador, (3) programação usando CAD/CAM e (4) entrada manual de dados.

7.6.1 Programação manual

Na programação manual, o programador prepara o código de CN usando uma linguagem de máquina de baixo nível que é descrita brevemente nesta seção e de maneira mais completa no Apêndice A7. O sistema de codificação é baseado em números binários e é a linguagem de máquina de baixo nível que pode ser compreendida pela MCU. Quando as linguagens de alto nível são usadas, como a APT (Seção 7.5.2 e Apêndice B7), as sentenças do programa são convertidas para o código básico. O CN usa uma combinação de sistemas numéricos binários e decimais, chamada *sistema decimal codificado em binário* (do inglês, *binary-coded decimal* — BCD). Nesse esquema de codificação, cada um dos dez dígitos (0-9) do sistema decimal é codificado como um número binário com quatro dígitos, e esses são adicionados em sequência, como no sistema numérico decimal. A conversão dos dez dígitos do sistema numérico decimal em números binários é mostrada na Tabela 7.4. Por exemplo, o valor decimal 1250 seria codificado em BCD como o seguinte:

Sequência numérica	Número binário	Valor decimal
Primeiro	0001	1000
Segundo	0010	200
Terceiro	0101	50
Quarto	0000	0
Soma		1250

Tabela 7.4. Comparação entre números binários e decimais

Binário	Decimal	Binário	Decimal
0000	0	0101	5
0001	1	0110	6
0010	2	0111	7
0011	3	1000	8
0100	4	1001	9

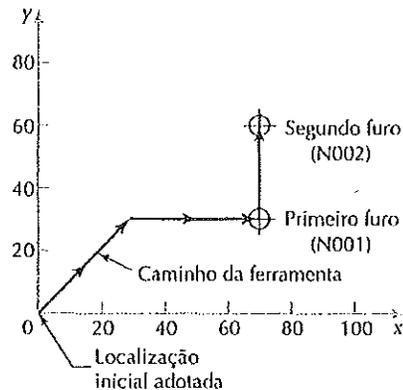
Além dos valores numéricos, o sistema de codificação do CN deve também fornecer caracteres alfabéticos e outros símbolos. Oito dígitos binários são usados para representar todos os caracteres necessários para a programação do CN. Uma palavra é formada a partir de uma sequência de caracteres. Uma *palavra* especifica um detalhe sobre a operação, como a posição no eixo *x*, a posição do eixo *y*, a velocidade de avanço ou a rotação do eixo-*árvore*. A partir de uma coleção de palavra é formado um *bloco*, uma instrução completa de CN. Ele especifica o destino do movimento, a velocidade e o avanço da operação de corte e outros comandos que determinam explicitamente o que a máquina-ferramenta vai fazer. Por exemplo, um bloco de instruções para uma fresadora de CN de dois eixos provavelmente incluiria as coordenadas *x* e *y* para as quais a mesa de trabalho seria movida, o tipo de movimentação a ser realizada (interpolação linear ou circular), a velocidade de rotação da fresa e a velocidade de avanço sob a qual a operação seria realizada.

A organização de palavras em um bloco é conhecida como o *formato de bloco* (também chamada de *formato de fita*, já que os formatos foram originalmente desenvolvidos para fitas perfuradas). Ainda que vários formatos diferentes de bloco tenham sido desenvolvidos ao longo dos anos, todos os controladores modernos usam o formato de endereço de palavra, que utiliza um prefixo de letra para identificar cada tipo de palavra e espaços para separar as palavras no bloco. Esse formato também permite variações na ordem das palavras e a omissão de palavras do bloco se seus valores não mudaram desde o bloco anterior. Por exemplo, os dois comandos no formato de endereço de palavra para executar as duas operações de furação ilustradas na Figura 7.16 são:

```
N001 G00 X07000 Y03000 M03
      N002 Y06000
```

em que *N* é o prefixo da sequência de números e *X* e *Y* são os prefixos para os eixos *x* e *y* respectivamente. Palavras com *G* e *M* precisam de algum detalhamento. As palavras

Figura 7.16 Sequência de furação para o exemplo de formato de endereço de palavra. As dimensões estão apresentadas em milímetros



iniciadas por G são chamadas de 'palavras de preparo' e consistem de dois dígitos numéricos (depois do prefixo "G") que preparam a MCU para os dados e as instruções contidos no bloco. Por exemplo, G00 prepara o controlador para um movimento transversal rápido ponto a ponto entre o ponto anterior e o ponto final definido no comando atual. As palavras iniciadas com M são usadas para especificar funções diversas ou auxiliares que estejam disponíveis na máquina-ferramenta. A palavra M03 em nosso exemplo é usada para iniciar a rotação do eixo-árvore. Outros exemplos incluem a parada do eixo-árvore para uma troca de ferramenta e o ligar ou desligar o fluido de corte. Naturalmente a máquina-ferramenta em questão tem que conter a função que está sendo chamada.

As palavras em um bloco de instruções têm o objetivo de transmitir todos os comandos e dados necessários para que a máquina-ferramenta execute o movimento definido no bloco, e as palavras necessárias para um tipo de máquina-ferramenta podem ser diferentes das necessárias para outro tipo; por exemplo, o torneamento requer um conjunto de comandos diferente do conjunto de comandos de fresamento. As palavras em um bloco são normalmente dadas na seguinte ordem (ainda que o formato de endereço de palavra permita variações nessa ordem):

- Número da sequência (iniciada com N).
- Palavra de preparo (iniciada com G).
- Coordenadas (iniciadas por X, Y, Z para eixos lineares e A, B, C para eixos rotativos).
- Velocidade de avanço (iniciada com F).
- Velocidade de rotação do eixo-árvore (iniciada com S).

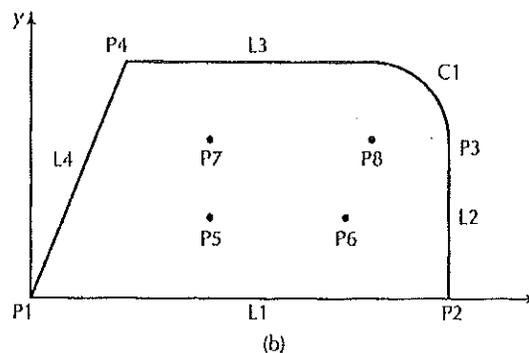
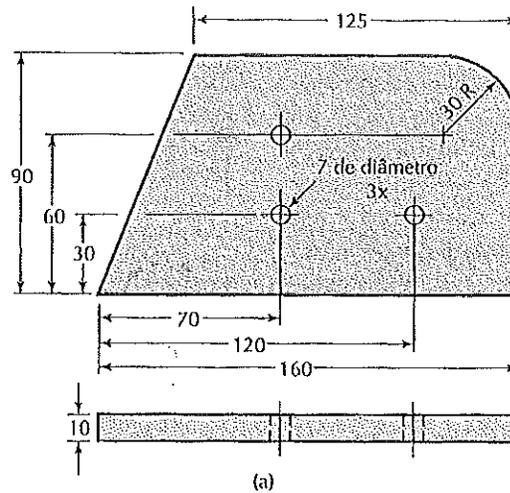
- Seleção de ferramenta (iniciada com T).
- Comandos diversos (iniciada com M).

Para o leitor interessado, preparamos o Apêndice A7, que descreve em detalhes o sistema de codificação usado em programação manual. Os exemplos de comandos de programação são fornecidos e várias palavras iniciadas por G e M são definidas. A programação manual pode ser utilizada tanto para trabalhos ponto a ponto como para serviços de contorno. Ela é mais adequada às operações de usinagem ponto a ponto, como a furação, e também pode ser usada em trabalhos simples de contorno, como o fresamento e o torneamento que envolvem apenas dois eixos. Todavia, para operações de usinagem tridimensional complexas há uma vantagem na utilização da programação assistida por computador.

7.6.2 Programação assistida por computador

A programação manual pode ser demorada, entediante e sujeita a peças processando geometrias complexas ou que requeiram muitas operações de usinagem. Nesses casos, e até para serviços mais simples, é vantajoso usar a programação assistida por computador. Vários sistemas de linguagem de programação CN foram desenvolvidos para a realização de muitos dos cálculos que o programador teria de fazer. O programa é escrito em sentenças parecidas com o inglês, que são posteriormente convertidas para a linguagem de máquina. A programação assistida por computador economiza tempo e resulta em um programa mais preciso e eficiente. Usando-se esse arranjo de programação, as várias tarefas são divididas entre o programador e o computador.

Figura 7.17 Exemplo de peça com elementos geométricos (pontos, linhas e circunferência) indicados para a programação assistida por computador



O trabalho do programador. Na programação assistida por computador, as instruções de usinagem são escritas em sentenças parecidas com inglês, as quais são depois traduzidas pelo computador para o código de máquina de baixo nível, que pode ser interpretado e executado pelo controlador da máquina-ferramenta. As duas tarefas mais importantes do programador são (1) definir a geometria de peça e (2) especificar o caminho da ferramenta e a sequência de operação.

Não importando quão complicada a peça de trabalho possa parecer, ela é composta de elementos geométricos simples e superfícies matematicamente definidas. Considere a amostra de peça na Figura 7.17, ainda que sua aparência seja de algum modo irregular, sua linha externa consiste da interseção de linhas retas e de uma circunferência parcial. As posições dos furos nas peças podem ser definidas por meio das coordenadas x e y de seus centros. Quase todos os componentes que um projetista pode conceber podem ser descritos por pontos, linhas retas, planos, círculos, cilindros e outras superfícies matematicamente definidas. É tarefa do

programador identificar e enumerar os elementos geométricos a partir dos quais a peça é construída. Cada elemento deve ser definido em termos de suas dimensões e posições em relação aos outros elementos. Alguns exemplos serão instrutivos aqui para mostrar como os elementos geométricos são definidos. Usaremos nosso exemplo de peça para ilustrar, com os identificadores dos elementos geométricos adicionados como mostrado na Figura 7.17 (b). Nossas sentenças são tiradas da linguagem APT, que significa ferramenta automaticamente programada. No Apêndice B7, a linguagem APT é descrita com detalhes.

Vamos começar com o elemento geométrico mais simples, o ponto. A forma mais simples de se definir um ponto é por meio de suas coordenadas; por exemplo,

$$P4 = \text{POINT } /35, 90, 0$$

em que o ponto é identificado por um símbolo (P4) e suas coordenadas são dadas na ordem dos eixos x , y e z em milímetros ($x = 35$ mm, $y = 90$ mm e $z = 0$). Uma linha pode ser definida por dois pontos, como o seguinte:

$L1 = \text{LINE}/P1, P2$

em que L1 é a linha definida na sentença e P1 e P2 são dois pontos definidos anteriormente. Finalmente, um círculo pode ser definido por seu raio e pela posição de seu centro,

$C1 = \text{CIRCLE}/\text{CENTER}, P8, \text{RADIUS}, 30$

em que C1 é o novo círculo definido, com o centro no ponto P8, definido antes, e um raio de 30 mm. A linguagem APT oferece muitos meios alternativos de definição de pontos, linhas, círculos e outros elementos geométricos. Uma amostra dessas definições é fornecida no Apêndice B7.

Depois que a geometria da peça é definida, o programador deve especificar o caminho que a ferramenta seguirá para usinar a peça. O caminho da ferramenta consiste de uma sequência de linhas e segmentos de arco conectados, usando os elementos geométricos previamente definidos para conduzir a ferramenta. Por exemplo, suponha que estejamos usinando o exterior de nosso exemplo da Figura 7.17 em uma operação de fresamento de perfil (contorno). Terminamos de cortar ao longo da superfície L1 no sentido anti-horário em volta da peça e a ferramenta está posicionada na interseção das superfícies L1 e L2. A sentença APT seguinte poderia ser usada para comandar a ferramenta a fazer uma curva para a esquerda de L1 para L2 e cortar ao longo de L2:

$\text{GOLFT}/L2, \text{TANTO}, C1$

A ferramenta prossegue ao longo da superfície L2 até que fique tangente (TANTO) ao círculo C1. Esse é um comando de movimentação em caminho contínuo. Os comandos ponto a ponto tendem a ser mais simples; por exemplo, a sentença seguinte direciona a ferramenta para o ponto P5 definido anteriormente:

$\text{GOTO}/P5$

Além de definir a geometria das peças e especificar o caminho das ferramentas, o programador deve realizar várias outras funções de programação, como nomear o programa, identificar a máquina-ferramenta na qual o serviço será realizado, especificar velocidades de corte e veloci-

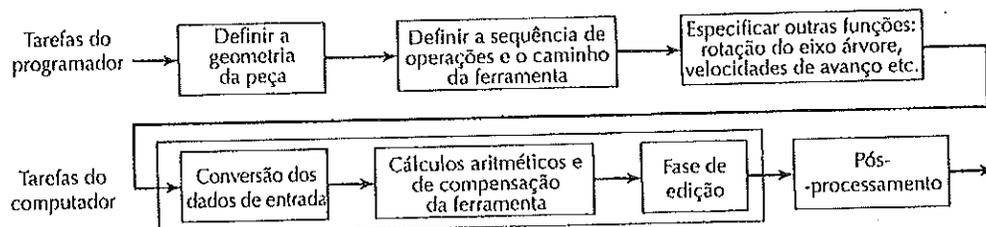
des de avanço, determinar as dimensões da ferramenta (raio, comprimento etc.) e especificar as tolerâncias na interpolação circular.

Tarefas do computador na programação assistida por computador. O papel do computador na programação assistida por computador consiste das seguintes tarefas, realizadas mais ou menos na sequência descrita: (1) tradução da entrada, (2) aritmética e cálculos de percurso de corte, (3) edição e (4) pós-processamento. As três primeiras tarefas são executadas sob a supervisão do programa de processamento da linguagem. Por exemplo, a linguagem APT usa um processador projetado para interpretar e processar as palavras, símbolos e números escritos em APT. Outras linguagens precisam de seus próprios processadores. A quarta tarefa, pós-processamento, requer um programa separado. A sequência e a relação das tarefas do programador e do computador são demonstradas na Figura 7.18.

O programador faz a entrada do programa usando a APT ou alguma outra linguagem de programação de usinagem de alto nível. O módulo de *tradução de entrada* converte as instruções codificadas contidas no programa para a forma utilizável pelo computador, preparando para sua execução adiante. Na APT, a tradução da entrada realiza as seguintes tarefas: (1) checagem de sintaxe do código de entrada para identificar erros no formato, pontuação, ortografia e ordem das sentenças; (2) definição de um número de sequência para cada sentença de APT do programa; (3) conversão dos elementos geométricos em formas adequadas ao processamento do computador e (4) geração de um arquivo intermediário chamado PROFIL que é utilizado em cálculos aritméticos futuros.

O *módulo aritmético* consiste de um conjunto de sub-rotinas para a realização dos cálculos matemáticos necessários para definir a superfície da peça e gerar o caminho da ferramenta, incluindo a compensação para o percurso do corte. As sub-rotinas são chamadas pelas várias sentenças usadas na linguagem de programação de usinagem. Os cálculos aritméticos são realizados no arquivo PROFIL. O módulo aritmético livra o programador

Figura 7.18 Tarefas em programação de peças assistidas por computador



dos cálculos geométricos e aritméticos demorados e propensos a erros para se concentrar em questões relacionadas ao processamento da peça. A saída desse módulo é um arquivo chamado CLFILE, que significa "arquivo de localização da ferramenta" (do inglês, *cutter location file*). Como o nome sugere, esse arquivo consiste principalmente dos dados do caminho da ferramenta.

Durante o estágio de edição, o computador edita o arquivo CLFILE e gera um novo arquivo chamado CLDATA. Quando impresso, o CLDATA oferece dados legíveis de posicionamento da ferramenta e comandos de operação da máquina-ferramenta. Os comandos da máquina-ferramenta podem ser convertidos em instruções específicas durante o pós-processamento. O resultado da fase de edição é um programa de usinagem em um formato que pode ser pós-processado para a máquina-ferramenta na qual o trabalho será realizado.

Os sistemas das máquinas-ferramenta são diferentes e têm funções e capacidades diferentes. As linguagens de programação de usinagem de alto nível, como a APT, geralmente não se destinam a apenas um tipo de máquina-ferramenta. Elas são projetadas para uso geral. Assim, a última tarefa do computador na programação assistida por computador é o *pós-processamento*, em que os dados de posicionamento da ferramenta e os comandos de usinagem do arquivo CLDATA são convertidos para o código de baixo nível que pode ser interpretado pelo controlador de CN para uma máquina-ferramenta específica. O resultado do pós-processamento é um programa de usinagem que consiste de códigos G, coordenadas de x, y e z, funções S, F, M e outras no formato de endereço de palavras. O pós-processor é separado da linguagem de programação de usinagem de alto nível. Um pós-processor individual deve ser escrito para cada sistema de máquina-ferramenta.

7.6.3 Programação do CN usando CAD/CAM

Um sistema de CAD/CAM é um sistema gráfico interativo do computador equipado com *software* para realizar algumas tarefas de projeto e manufatura e para integrar essas funções. Uma das importantes tarefas realizadas nos sistemas de CAD/CAM é a programação CN. Nesse método de programação, parte do procedimento normalmente executado pelo programador é realizada pelo computador. As vantagens da programação CN usando CAD/CAM incluem [12]: (1) o programa pode ser simulado de forma *off-line* no sistema de CAD/CAM para verificar sua precisão; (2) o tempo e o custo da operação de usinagem podem ser determinados pelo sistema de CAD/CAM; (3) as ferramentas mais apropriadas podem ser selecionadas de forma automática para a operação e (4) o sistema de CAD/CAM

pode inserir de forma automática os valores otimizados para as velocidades de rotação e avanço para o material de trabalho e as operações.

Outras vantagens são descritas abaixo. Lembre-se de que as duas principais tarefas do programador na programação assistida por computador são (1) definir a geometria da peça e (2) especificar o caminho da ferramenta. Os sistemas avançados de CAD/CAM automatizam partes de ambas essas tarefas.

Definição de geometria usando CAD/CAM.

Um objetivo fundamental do CAD/CAM é integrar as funções de engenharia de projeto e engenharia de manufatura. Com certeza uma das funções de projeto importantes é desenhar os componentes individuais do produto. Se um sistema de CAD/CAM é usado, um modelo em computação gráfica de cada peça é desenvolvido pelo projetista e guardado no banco de dados de CAD/CAM. Esse modelo contém todas as especificações geométricas, dimensionais e materiais da peça.

Quando o mesmo sistema de CAD/CAM ou um sistema de CAM que tenha acesso à mesma base de dados de CAD em que o modelo da peça está armazenado é usado para realizar a programação, não faz muito sentido recriar a geometria da peça durante o procedimento de programação. Em vez disso, o programador geralmente recupera o modelo geométrico da peça do banco de dados e o utiliza para definir o caminho apropriado do cortador. A vantagem significativa da utilização de CAD/CAM assim é a eliminação de um dos passos demorados da programação assistida por computador: a definição da geometria. Depois que a geometria da peça é recuperada, o procedimento normal é identificar os elementos geométricos que serão utilizados durante a programação da peça. Essas identificações são os nomes das variáveis (símbolos) dados às linhas, círculos e superfícies que compõem a peça. A maior parte dos sistemas tem capacidade de identificar automaticamente os elementos geométricos e exibir as identificações no monitor. O programador pode então fazer referência a esses elementos identificados durante a construção do caminho da ferramenta.

Um programador de CN que não tenha acesso ao banco de dados deve definir a geometria da peça usando técnicas gráficas interativas similares às que o projetista usaria para desenhar a peça. Pontos são definidos em um sistema de coordenadas usando o sistema de computação gráfica, linhas e círculos são definidos a partir dos pontos, superfícies são definidas, e assim por diante, para construir o modelo geométrico da peça. A vantagem do sistema gráfico interativo sobre a programação assistida por computador convencional é que o programador recebe verifi-

cação visual imediata dos elementos geométricos sendo criados. Isso tende a aumentar a velocidade e a precisão do processo de definição da geometria.

Geração de caminho de ferramenta usando CAD/CAM. A segunda tarefa do programador de CN na programação assistida por computador é a especificação do caminho da ferramenta. Em primeiro lugar o programador seleciona a ferramenta de corte para a operação. A maioria dos sistemas de CAD/CAM tem bibliotecas de ferramentas que podem ser chamadas pelo programador para identificar as ferramentas disponíveis do almoxarifado. O programador deve decidir qual das ferramentas disponíveis é mais apropriada para a operação em questão e então especificá-la para o caminho de ferramenta. Isso permite que o diâmetro da ferramenta e outras dimensões sejam informados automaticamente para os cálculos de percurso da ferramenta. Se a ferramenta de corte desejada não estiver disponível na biblioteca, o programador poderá especificar uma ferramenta apropriada. Ela então tornará-se parte da biblioteca para utilização futura.

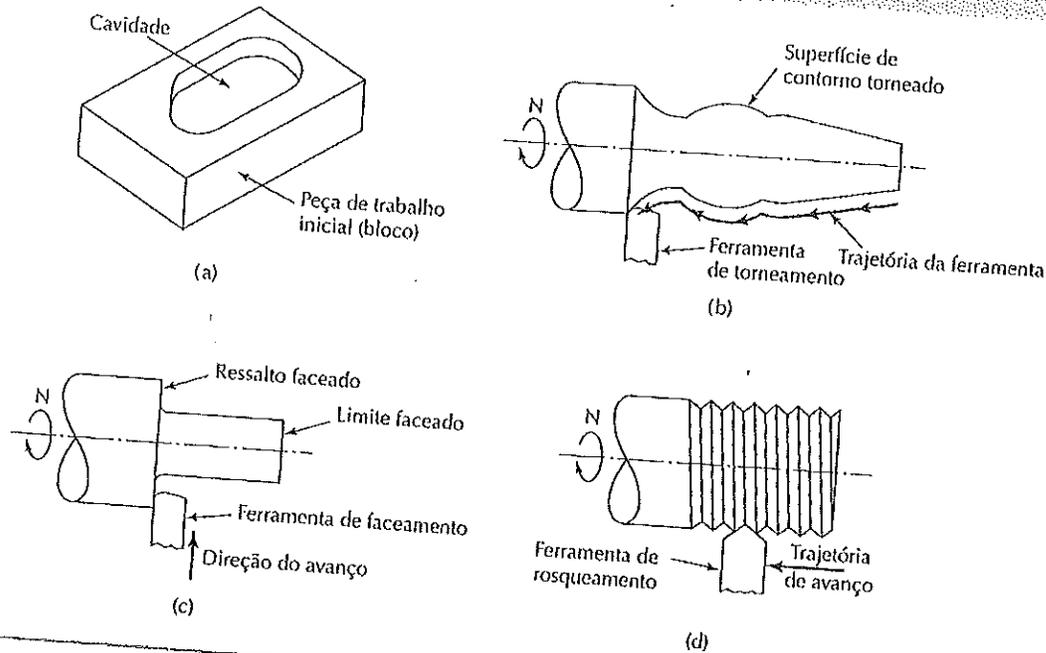
O próximo passo é a definição do caminho da ferramenta. Há diferenças nas capacidades dos vários

sistemas de CAD/CAM, o que resulta em abordagens diferentes para a geração dos caminhos de ferramenta. A abordagem mais básica envolve a utilização do sistema gráfico interativo para informar os comandos de movimentação, um por um, de forma similar à programação assistida por computador. As sentenças individuais da APT, ou outra linguagem de programação, são informadas e o sistema de CAD/CAM fornece a visualização gráfica imediata da ação resultante do comando, validando assim a sentença. Uma abordagem mais avançada para a geração de comandos do caminho de ferramenta é usar um dos módulos de *software* automáticos disponíveis no sistema de CAD/CAM. Esses módulos foram desenvolvidos para realizar uma série de ciclos comuns de usinagem para fresamento, furação e torneamento. Eles são sub-rotinas contidas no pacote de programação de CN que podem ser chamadas e receber os parâmetros necessários para executar um ciclo de usinagem. Muitos desses módulos são identificados na Tabela 7.5 e na Figura 7.19. Quando o programa completo da peça for elaborado, o sistema de CAD/CAM pode proporcionar uma simulação animada dele para validação.

Tabela 7.5 Alguns módulos de CN comuns para programação automática de ciclos de usinagem

Tipo de módulo	Breve descrição
Usinagem de perfil	Gera caminho da ferramenta em volta da periferia da peça, normalmente um contorno bidimensional no qual a profundidade se mantém constante.
Usinagem de cavidade	Gera o caminho de ferramenta para usinar uma cavidade (ou bolsão), como na Figura 7.19 (a). Uma série de cortes normalmente é necessária para completar o fundo da cavidade até a profundidade desejada.
Inscrição (gravação, fresamento)	Gera o caminho de ferramenta para gravar (fresar) caracteres alfanuméricos e outros símbolos de letras e tamanhos especificados.
Torneamento de contorno	Gera o caminho de ferramenta para uma série de cortes de torneamento para fornecer um contorno definido em uma peça rotativa, como na Figura 7.19 (b).
Faceamento (torneamento)	Gera o caminho de ferramenta para uma série de cortes de face para remover excessos da face da peça ou para criar um ressalto na peça por meio de uma série de operações de faceamento, como na Figura 7.19 (c).
Rosqueamento (torneamento)	Gera o caminho de ferramenta para uma série de cortes de rosqueamento para cortar roscas internas, externas ou cônicas em uma peça rotativa, como na Figura 7.19 (d) para roscas externas.

Figura 7.19 Exemplos de ciclos de usinagem disponíveis em módulos automáticos de programação: (a) usinagem de cavidade, (b) torneamento de contorno, (c) faceamento e faceamento de ressalto e (d) rosqueamento



Programação automatizada por computador.

Na abordagem de CAD/CAM para a programação CN, muitos aspectos do procedimento são automatizados. No futuro, será possível automatizar todo o procedimento de programação CN. Referimo-nos a esse procedimento totalmente automatizado como programação automatizada por computador. Dado o modelo geométrico da peça que foi definido durante o desenho do produto, o sistema automatizado por computador possui capacidades suficientes de lógica e de tomada de decisão para realizar a programação do CN para toda a peça sem assistência humana.

Isso pode ser feito de maneira mais fácil para certos processos de CN que envolvam geometrias de peças relativamente simples e bem definidas. Os exemplos são operações ponto a ponto como a furação por CN e máquinas de fresamento de componentes eletrônicos. Nesses processos, o programa consiste basicamente de uma série de posições em um sistema de coordenadas x e y em que o trabalho deve ser realizado (por exemplo, orifícios devem ser furados e componentes devem ser inseridos). Essas posições são determinadas por dados gerados durante o projeto do produto. Algoritmos especiais podem ser desenvolvidos para processar os dados de projeto e gerar o

programa de CN para o sistema em particular. Os sistemas de contorno de CN eventualmente tornar-se-ão capazes de um nível similar de automação. Esse tipo de programação automática é estreitamente relacionado ao planejamento de processos auxiliado por computador (do inglês, *computer-aided process planning — CAPP*).

Mastercam. O Mastercam é um pacote de *software* para CAD/CAM comercial líder para programação CNC. É comercializado pela CNC Software, Inc. [16]. O pacote inclui uma capacidade de CAD para o projeto de peças além de suas funções de CAM para a programação das peças. Caso um pacote de projeto assistido por computador alternativo seja utilizado (por exemplo, AutoCAD® ou SolidWorks®), os arquivos desses outros pacotes podem ser traduzidos para a utilização no Mastercam. Os processos para os quais o Mastercam pode ser aplicado incluem fresamento, furação, torneamento, corte por plasma e corte a laser. Mais informações estão disponíveis no site da companhia [16]. As etapas típicas que um programador usaria no Mastercam para realizar um serviço de programação de usinagem são listadas na Tabela 7.6. O resultado seria um programa cujo formato é o endereçamento de palavras.

Tabela 7.6. Sequência típica de etapas na programação CNC usando Mastercam para uma sequência de operações de fresamento e furação

Etapa	Descrição
1	Desenvolver um modelo CAD da peça a ser usinada usando Mastercam ou importar o modelo CAD de um pacote compatível.
2	Orientar a peça de trabalho inicial em relação ao sistema de eixos da máquina.
3	Identificar a matéria-prima da peça e sua graduação específica (por exemplo, Alumínio 2024, para a seleção de condições de corte).
4	Selecionar a operação a ser realizada (por exemplo, furação, usinagem de cavidade, contorno) e a superfície a ser usinada.
5	Selecionar a ferramenta de corte (por exemplo, broca de 0,250 pol) da biblioteca de ferramentas.
6	Informar os parâmetros de corte aplicáveis como a profundidade do furo.
7	Repetir as etapas 4 a 6 para cada operação de usinagem adicional a ser realizada na peça.
8	Selecionar o pós-processador apropriado para gerar o endereçamento de palavras para a máquina-ferramenta na qual o serviço de usinagem será realizado.
9	Verificar o programa por meio da simulação animada da sequência de operações de usinagem a ser realizada na peça.

7.6.4 Entrada manual de dados

A programação manual ou a assistida por computador requer um nível relativamente mais alto de procedimentos e de documentação formal. Há um tempo de execução necessário para escrever e validar os programas. A programação com CAD/CAM automatiza uma parte significativa do procedimento, mas um compromisso importante com equipamento, *software* e treinamento é necessário. Um modo de simplificar o procedimento é fazer o operador da máquina realizar a tarefa de programação de usinagem na máquina-ferramenta. Isso é chamado de *entrada manual de dados* (do inglês, *manual data input* — MDI) porque o operador informa manualmente os dados de geometria da peça e os comandos de movimento direto para a MCU que está executando o serviço. A MDI, também conhecida como *programação conversacional* [5], [11] é vista como uma forma para as pequenas fábricas introduzirem o CN a suas operações sem precisar adquirir equipamentos especiais de programação CN nem contratar um programador. A MDI permite à fábrica fazer investimentos iniciais mínimos para começar a transição para a tecnologia moderna de CNC. A limitação da entrada manual de dados é o risco de erros de programação conforme os trabalhos ficam mais complicados. Por essa razão, a MDI é aplicada a peças relativamente simples.

A comunicação entre o programador operador de máquina e o sistema de MDI é feita por meio de um moni-

tor e um teclado alfanumérico. A entrada dos comandos de programação para o controlador é feita normalmente por meio de um procedimento orientado por menus em que o operador responde a questões propostas pelo sistema de CN sobre o trabalho a ser usinado. A sequência das questões é projetada de modo que o operador informe a geometria da peça e os comandos de usinagem de uma forma lógica e consistente. Uma capacidade de computação gráfica é incluída em sistemas modernos de programação por MDI para permitir que o operador visualize as operações de usinagem e verifique o programa. As características típicas de verificação incluem a exibição do caminho da ferramenta e a animação de sua sequência.

É necessário que o operador da máquina tenha treinamento em programação CN. Ele deve ter capacidade de compreender um desenho de engenharia e ter familiaridade com os processos de usinagem. Uma advertência importante na utilização de MDI é certificar-se de que o sistema de CN não se torne um brinquedo caro que fique ocioso enquanto o operador informa as instruções de programação. O uso eficiente do sistema requer que a programação da próxima peça seja realizada enquanto a peça atual está sendo usinada. A maioria dos sistemas de MDI permite que essas duas funções sejam executadas simultaneamente para reduzir o tempo de passagem entre os serviços.

Referências

- [1] CHANG, C. H.; MELKANOFF, M. *NC machine programming and software design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.
- [2] GROOVER, M. P.; ZIMMERS Jr., E. W. *CAD/CAM: Computer-aided design and manufacturing*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1984.
- [3] ILLINOIS Institute of Technology Research Institute. *APT part programming*. Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1967.
- [4] LIN, S. C. *Computer numerical control: Essentials of programming and networking*. Albânia: Delmar Publishers, 1994.
- [5] LYNCH, M. *Computer numerical control for machining*. Nova York: McGraw-Hill, 1992.
- [6] NOAKER, P. M. "Down the Road with DNC". *Manufacturing engineering*, p. 35-8, nov. 1992.
- [7] _____. "The PC's CNC Transformation". *Manufacturing Engineering*, p. 49-53, ago. 1995.
- [8] NOBLE, D. F. *Forces of production*. Nova York: Alfred A. Knopf, 1984.
- [9] QUESADA, R. *Computer numerical control, machining and turning centers*. Upper Saddle River: Pearson; Prentice Hall, 2005.
- [10] REINTJES, J. F. *Numerical control: Making a new technology*. Nova York: Oxford University Press, 1991.
- [11] STENERSON, J.; CURRAN, J. *Computer numerical control: Operation and programming*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson; Prentice Hall, 2007.
- [12] VALENTINO, J. V.; GOLDENBERG, J. *Introduction to computer numerical control (CNC)*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson; Prentice Hall, 2003.
- [13] WAURZYNIAK, P. "Machine Controllers: Smarter and faster". *Manufacturing Engineering*, p. 61-73, jun. 2005.
- [14] _____. "Software controls productivity". *Manufacturing Engineering*, p. 67-73, ago. 2005.
- [15] _____. "Under control". *Manufacturing Engineering*, p. 51-8, jun. 2006.
- [16] Website do CNC Software, Inc.: Disponível em: <www.mastercam.com>. Acesso em: 09 nov. 2010.