

Linhas de produção automatizadas

CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 16.1 Princípios fundamentais das linhas de produção automatizadas
 - 16.1.1 Configurações dos sistemas
 - 16.1.2 Mecanismos de transferência de peças
 - 16.1.3 *Buffers* de armazenamento
 - 16.1.4 Controle da linha de produção
- 16.2 Aplicações de linhas de produção automatizadas
 - 16.2.1 Sistemas de usinagem
 - 16.2.2 Considerações para o projeto de sistemas
- 16.3 Análise de linhas de transferência
 - 16.3.1 Linhas de transferência sem armazenamento interno de peças
 - 16.3.2 Linhas de transferência com *buffers* internos de armazenamento

Os sistemas de manufatura considerados neste capítulo são usados em alta produção de peças que exigem múltiplas operações de processamento. Cada operação de processamento é realizada em uma estação de trabalho, e as estações são fisicamente integradas por meio de um sistema mecanizado de transporte de itens (peças, montagens ou produtos) para formar uma linha de produção mecanizada. A usinagem (fresamento, furação e operações similares com ferramentas de corte rotativas) é comumente realizada nessas linhas de produção, caso em que o termo *linha de transferência* ou *máquina de transferência* é utilizado. Outras aplicações das linhas de produção automatizadas incluem solda a ponto robotizada em plantas de montagem finais de automóveis, estamparia de metal laminado e eletrolvanização de metais. Linhas automatizadas similares são utilizadas para operações de montagem; entretanto, a tecnologia de montagem automatizada é suficientemente diferente para que posteriores esse tópico até o capítulo seguinte.

As linhas de produção automatizadas exigem um investimento de capital significativo. Elas são exemplos de automação rígida (Seção 1.2.1), e geralmente é difícil se alterar a sequência e o conteúdo das operações de processamento uma vez que a linha esteja pronta. Sua aplicação é, portanto, apropriada somente sob as condições a seguir:

- *Alta demanda*, exigindo altas quantidades de produção.
- *Projeto de produto estável*, porque mudanças frequentes no projeto são de difícil acomodação em uma linha de produção automatizada.
- *Longa vida do produto*, pelo menos vários anos na maioria dos casos.
- *Múltiplas operações* realizadas no produto durante sua manufatura.

Quando a aplicação satisfaz essas condições, as linhas de produção automatizadas proporcionam os seguintes benefícios:

- **Baixa quantidade de mão de obra** direta.
- **Baixo custo do produto**, porque o custo do equipamento rígido é distribuído ao longo de muitas unidades.
- **Alta taxa de produção.**
- **Minimização dos itens** em processamento e do tempo de passagem (do inglês, *Lead time*, o tempo entre o começo da produção e o término de um produto acabado).
- **Uso mínimo do espaço de chão de fábrica.**

Neste capítulo, examinamos a tecnologia das linhas de produção automatizadas e desenvolvemos diversos modelos matemáticos que podem ser utilizados para analisar sua operação.

16.1 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DAS LINHAS DE PRODUÇÃO AUTOMATIZADAS

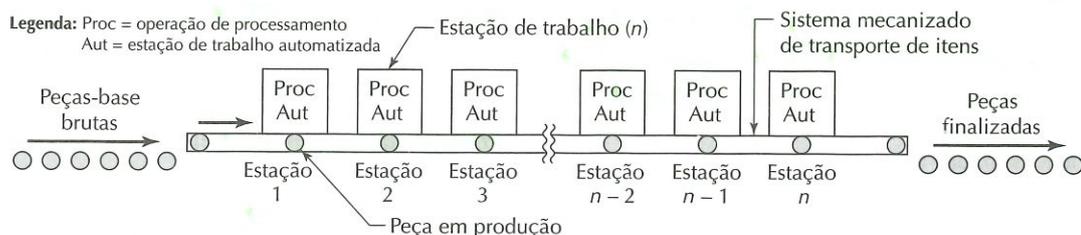
Uma *linha de produção automatizada* consiste de múltiplas estações de trabalho automatizadas e ligadas por um sistema de manuseio que transfere peças de uma estação para a próxima, como descrito na Figura 16.1. Uma peça bruta entra em uma extremidade da linha e os passos de processamento são realizados sequencialmente à medida que a peça progride para frente (da esquerda para a direita no desenho). A linha pode incluir estações de inspeção para realizar checagens de qualidade intermediárias. Estações manuais também podem estar localizadas ao longo da linha para realizar determinadas operações difíceis ou não econômicas de se automatizar. Cada estação realiza uma operação diferente, de maneira que todas as operações são necessárias para completar um item. Peças múltiplas são processadas simultaneamente na linha, uma peça em cada estação de trabalho. Na forma mais simples de linha de produção, o número de peças na linha a qualquer momento é igual ao número

de estações de trabalho, como na figura. Em linhas mais complicadas, é providenciado um armazenamento de peças temporário entre as estações, caso em que há mais de uma peça por estação.

Uma linha de produção automatizada opera em ciclos similares a uma linha de montagem manual (Capítulo 15). Cada ciclo consiste no tempo de processamento mais o tempo para transferir peças para a próxima estação de trabalho. A estação de trabalho mais lenta na linha estabelece o ritmo da mesma, assim como em uma linha de montagem. Na Seção 16.3, desenvolvemos equações para descrever o desempenho do tempo de ciclo da linha de transferência e de sistemas de manufatura automatizados similares.

Dependendo da geometria da peça, uma linha de transferência pode utilizar dispositivos de fixação em paletes para o manuseio de peças. Um dispositivo de fixação em paletes é uma estrutura de contenção que é projetada para (1) fixar a peça em uma posição precisa em relação a sua base e (2) ser movido, posicionado e preso com precisão em sucessivas estações de trabalho pelo sistema de transferência. Com as peças precisamente posicionadas no dispositivo no paletes e o paletes precisamente fixado em determinada estação de trabalho, a peça em si está precisamente posicionada em relação à operação de processamento desempenhada na estação. A exigência de posicionamento é especialmente crítica em operações de usinagem, em que tolerâncias são tipicamente especificadas em centésimos de milímetro ou milésimos de polegada. O termo *linha de transferência paletizada* às vezes é utilizado para identificar uma linha de transferência que utiliza dispositivos de fixação em paletes ou dispositivos de contenção de peças similares. O método alternativo de posicionamento de peças é simplesmente fixar as próprias peças de estação para estação. Isso é chamado de *linha de transferência livre*, que tem o benefício óbvio de evitar o custo dos dispositivos em paletes. Entretanto, determinadas geometrias de peças exigem o uso de dispositivos em paletes para facilitar o manuseio e assegurar a posição precisa na estação de trabalho. Quando dispositivos de fixação em paletes são utilizados, um meio tem de ser fornecido para que sejam entregues de volta na frente da linha para reutilização.

Figura 16.1 Configuração geral de uma linha de produção automatizada



16.1.1 Configurações de sistemas

Apesar de a Figura 16.1 mostrar o fluxo de trabalho como estando em uma linha reta, o fluxo de trabalho pode assumir diversas formas. Classificamo-os como (1) em linha, (2) segmentados em linha e (3) rotativos. A configuração em linha consiste de uma sequência de estações em um arranjo de linha reta, como na Figura 16.1. Essa configuração é comum para usinar peças grandes, como blocos de motores automotivos, cabeçotes de motores e caixas de transmissão. Como essas peças exigem um grande número de operações, uma linha de produção com muitas estações é necessária. A configuração em linha pode acomodar um grande número de estações. Sistemas em linha também podem ser projetados com *buffers* de armazenamento integrados ao longo do percurso do fluxo (Seção 16.1.3).

A configuração *segmentada em linha* consiste de duas ou mais seções de transferência de linha reta, nas quais os segmentos são normalmente perpendiculares um ao outro. A Figura 16.2 mostra diversos *layouts* possíveis da categoria segmentada em linha. Há um número de razões para se projetar uma linha de produção nessas configurações em vez de em uma linha reta pura: (1) o espaço de chão de fábrica disponível pode limitar o comprimento da linha; (2) em uma configuração em linha segmentada, uma peça pode ser reorientada para apresentar diferentes superfícies para usinagem; e (3) o *layout* retangular proporciona um retorno rápido dos dispositivos de fixação de peças para a frente da linha para reutilização.

A Figura 16.3 mostra duas linhas de transferência que realizam operações de usinagem de metal em um caráter de eixo traseiro de caminhão. A primeira linha, na

Figura 16.2 Vários *layouts* possíveis da configuração em linha segmentada de uma linha de produção automatizada: (a) formato de L, (b) formato de U e (c) retangular

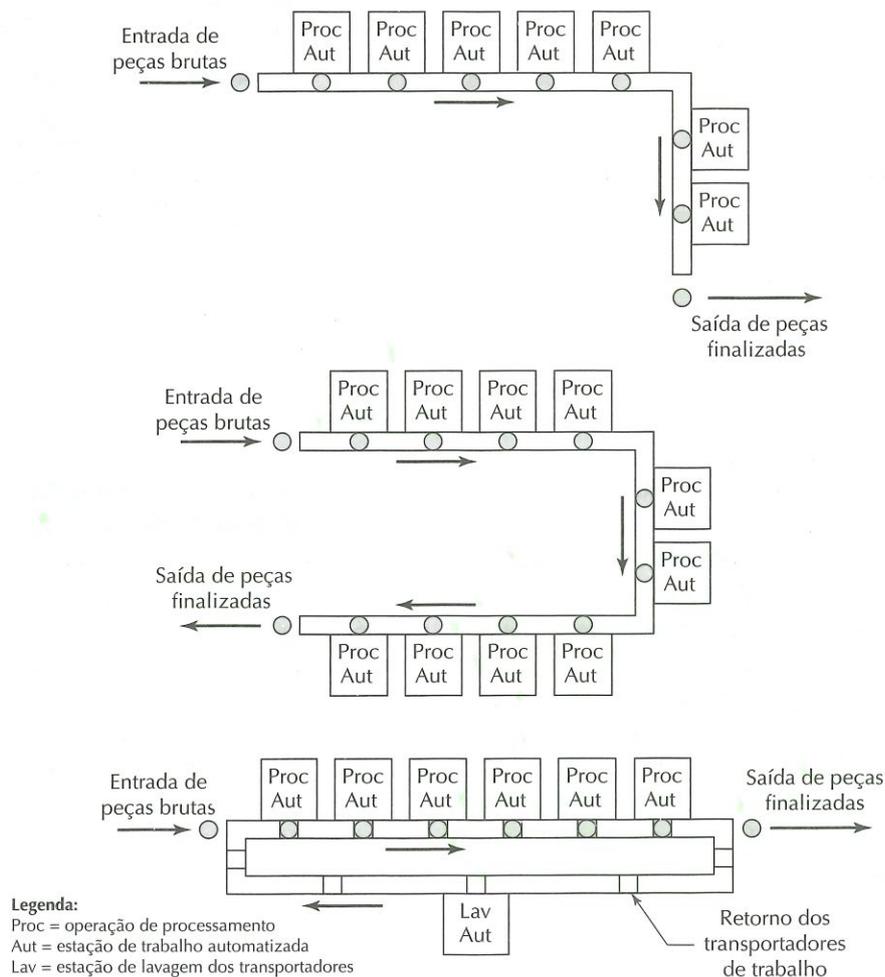
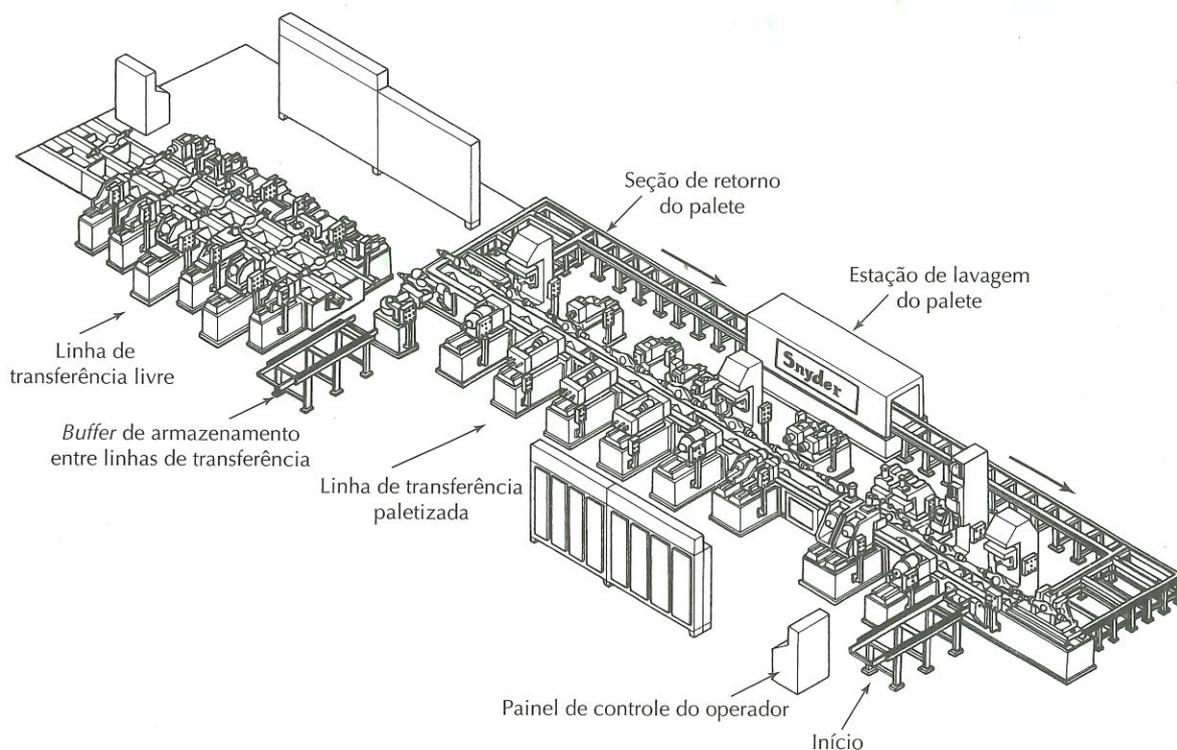


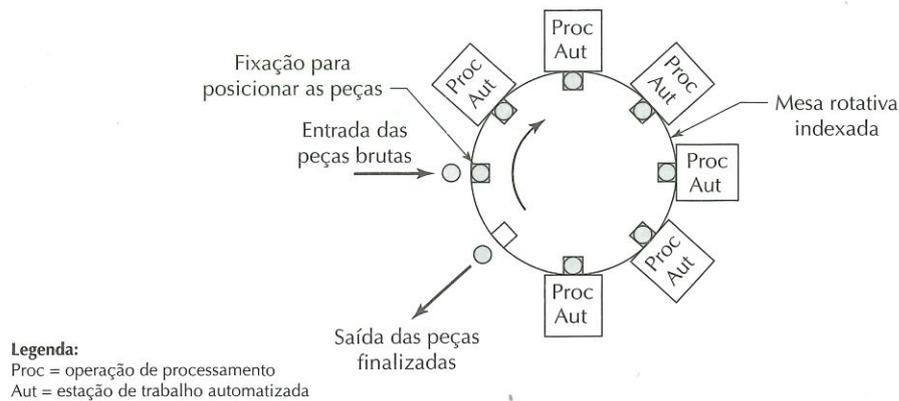
Figura 16.3 Duas linhas de transferência de usinagem. A primeira, na parte inferior à direita, é uma configuração de doze estações segmentadas em linha que utiliza dispositivos de fixação em paletes para posicionar as peças. O retorno traz os paletes de volta para a frente da linha. No lado superior esquerdo, a segunda linha de transferência é uma configuração de sete estações em linha. A estação manual entre as linhas é utilizada para reorientar as peças (Cortesia da Snyder Corporation)



parte de baixo do lado direito, é uma configuração segmentada em linha em formato de retângulo. Dispositivos de fixação em paletes são utilizados nessa linha para posicionar as peças fundidas brutas nas estações de trabalho para usinagem. A segunda linha, no canto superior esquerdo, é uma configuração em linha convencional consistindo de sete estações. Quando o processamento na primeira linha é completo, as peças são manualmente transferidas para a segunda linha, onde são reorientadas para apresentar superfícies diferentes para usinagem. Nessa linha as peças são movidas individualmente pelo mecanismo de transferência, sem utilizar dispositivos de fixação em paletes.

Na configuração rotativa, as peças são fixadas a dispositivos em torno da periferia de uma mesa de trabalho circular, e a mesa é dividida (girada em ângulos fi-

xos) para posicionar as peças nas estações de trabalho para processamento. Um arranjo típico é ilustrado na Figura 16.4. A mesa de trabalho é continuamente referida como mesa rotativa (do inglês, *dial*), e o equipamento é chamado de máquina de mesa rotativa indexada ou simplesmente máquina de mesa rotativa. Apesar de a configuração rotativa aparentemente não pertencer à classe de sistemas de produção chamados de 'linhas', sua operação é, mesmo assim, muito similar. Em comparação às configurações em linha e segmentadas em linha, sistemas rotativos de indexação são comumente limitados a peças menores e menos estações de trabalho e não podem acomodar prontamente um buffer de armazenamento. Do lado positivo, o sistema rotativo normalmente envolve um equipamento menos caro e exige menos espaço de chão de fábrica.

Figura 16.4 Máquina de mesa rotativa indexada (*dial indexing machine*)

16.1.2 Mecanismos de transferência de peças

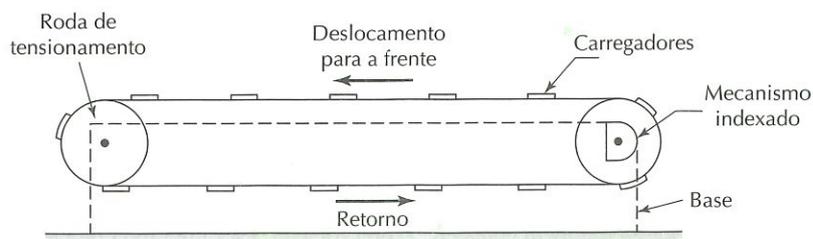
O sistema de transferência de peças move peças entre as estações na linha de produção. Normalmente os mecanismos de transferência utilizados nas linhas de produção automatizadas são síncronos ou assíncronos (Seção 15.1.2). A transferência síncrona tem sido o meio tradicional de mover peças em uma linha de transferência. Entretanto, aplicações de sistemas de transferência assíncrona estão aumentando porque proporcionam determinadas vantagens sobre o movimento síncrono de peças [10]: (1) têm maior flexibilidade, (2) exigem menos dispositivos em paletes e (3) é mais fácil rearranjar ou expandir o sistema de produção. Essas vantagens são obtidas com um alto custo inicial. Os sistemas contínuos de transporte são incomuns em linhas automatizadas devido à dificuldade de proporcionar um posicionamento preciso entre os cabeçotes das estações e as peças continuamente em movimento.

Nesta seção, dividimos os mecanismos de transferência de peças em duas categorias: (1) sistemas de transporte linear para um sistema em linha e (2) mecanismos rotativos indexados para máquinas de mesa rotativa. Alguns dos sistemas de transporte linear proporcionam movimento

síncrono, enquanto outros proporcionam movimento assíncrono. Todos os mecanismos indexados rotativos proporcionam movimento síncrono.

Sistemas de transferência linear. A maioria dos sistemas de transporte de materiais descrito no Capítulo 10 proporciona um movimento linear, e alguns são utilizados para transferência de peças em sistemas de produção automatizada, os quais incluem transportadores de roletes acionados, esteiras transportadoras, transportadores movidos por corrente e transportadores de carrinhos em trilhos (Seção 10.2.4). A Figura 16.5 ilustra a possível aplicação de um transportador por corrente ou de esteira para proporcionar movimento contínuo ou intermitente de peças entre estações. Uma corrente ou esteira flexível de aço é utilizada para transportar peças utilizando carregadores fixados ao transportador (algumas vezes chamados de canecas). A corrente é impulsionada por roldanas em uma configuração 'por cima e por baixo', na qual as roldanas giram em torno de um eixo horizontal (como nos transportadores de grãos ensacados), ou uma configuração 'em torno do canto', na qual as roldanas giram em torno de um eixo vertical (como nos transportadores de bagagens em aeroportos).

Figura 16.5 Visão lateral de um transportador movido por corrente ou esteira de aço (tipo 'por cima e por baixo') para transferência linear de peças utilizando carregadores



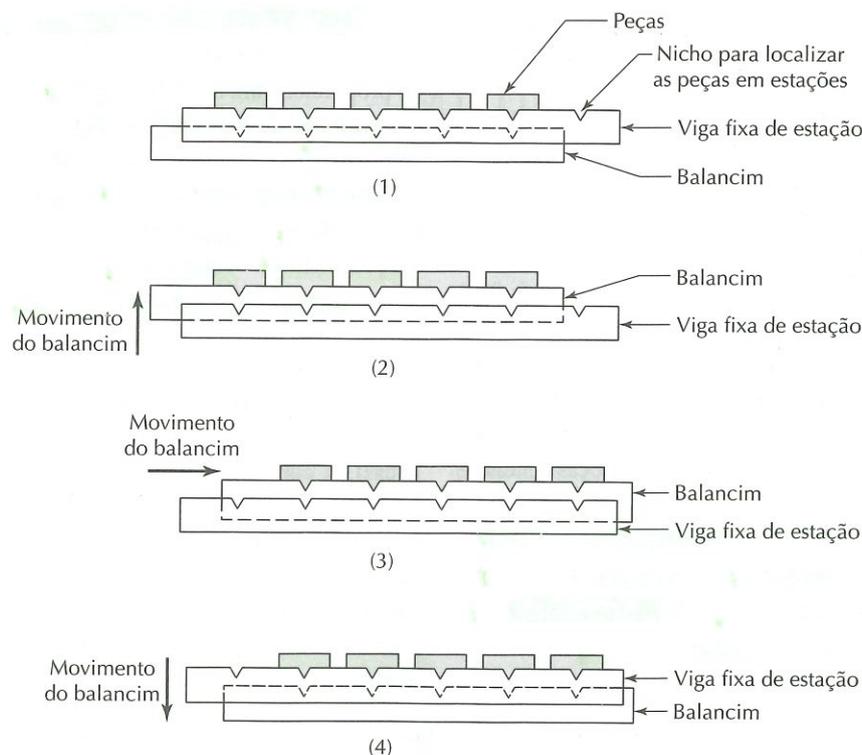
O transportador de esteira também pode ser adaptado para o movimento assíncrono de unidades de trabalho utilizando o atrito entre a esteira e a peça para mover peças entre as estações. O movimento para frente das peças é parado em cada estação utilizando pinos ejetados de um dispositivo ou outros mecanismos para fazer parar.

Transportadores de carrinhos em trilhos proporcionam movimento a peças assíncronas e são projetados para posicionar seus carrinhos dentro de uma distância em torno $\pm 0,12$ milímetro ($\pm 0,005$ polegada), o que é adequado para muitas situações de processamento. Em outros tipos, deve-se tomar providências para parar as peças e posicioná-

-las dentro da tolerância exigida em cada estação de trabalho. Mecanismos de ejeção e dispositivos retentores podem ser utilizados para essa finalidade.

Muitas linhas de transferência de usinagem utilizam sistemas de transferência por *balancins* (do inglês, *walking beam*), nos quais as peças são sincronicamente erguidas das suas respectivas estações por um balancim de transferência e movidas uma posição à frente, para a próxima estação. O balancim de transferência baixa as peças em nichos que os posicionam para processamento em suas estações. O balancim então se retrai para estar pronto para o próximo ciclo de transferência. A sequência de ação é descrita na Figura 16.6.

Figura 16.6 Operação do sistema de transferência por balancim: (1) as peças na estação são posicionadas na viga fixa da estação, (2) o balancim é erguido para içar as peças dos nichos, (3) o balancim elevado move as peças para as próximas posições de estação e (4) o balancim abaixa para largar as peças nos nichos nas novas posições de estação. O balancim então se retrai para a posição original mostrada em (1)



Mecanismos de indexação rotativos. Vários mecanismos encontram-se disponíveis para proporcionar o movimento de indexação rotacional exigido em uma máquina de mesa rotativa indexada. Dois tipos representativos são explicados aqui, mecanismo ou roda de Genebra e came.

O mecanismo ou roda de Genebra (também conhecido como Cruz de Malta) utiliza um sistema motor continua-

mente em rotação para dividir o giro da mesa por meio de uma rotação parcial, como ilustrado na Figura 16.7. Se a roda tem seis aberturas (para uma mesa rotativa indexada de seis estações), cada volta do motor resulta na rotação de $1/6$ de volta da mesa de trabalho ou 60 graus. O motor gera movimento da mesa apenas durante uma porção da sua própria rotação. Para uma roda de Genebra de seis aberturas, 120 graus de rotação do motor são utilizados para indexar a

mesa. Os 240 graus restantes de rotação do motor são o tempo de pausa para a mesa, durante o qual a operação de processamento tem de ser completada na peça. Em geral,

$$\theta = \frac{360}{n_s} \quad (16.1)$$

em que θ é o ângulo de rotação da mesa de trabalho durante a indexação (graus de rotação) e n_s é o número de aberturas na roda de Genebra. O ângulo de rotação do sistema motor durante a indexação é 2θ , e o ângulo de rotação dele durante o qual a mesa de trabalho experimenta tempo de pausa é $(360 - 2\theta)$. As rodas de Genebra normalmente têm quatro, cinco, seis ou oito aberturas, que estabelecem o número máximo de estações de trabalho a ser colocado em torno da periferia da mesa. Dada a velocidade rotacional do motor, podemos determinar o tempo total de ciclo:

$$T_c = \frac{1}{N} \quad (16.2)$$

em que T_c é o tempo do ciclo (min); e N é a velocidade rotacional do propulsor (rpm). Do tempo total de ciclo, o tempo de pausa, ou tempo de serviço disponível por ciclo, é dado por:

$$T_s = \frac{(180 + \theta)}{360N} \quad (16.3)$$

em que T_s é o serviço disponível ou tempo de processamento ou tempo de pausa (min); e os outros termos são os mesmos definidos anteriormente. De modo similar, o tempo de indexação é dado por:

$$T_r = \frac{(180 - \theta)}{360N} \quad (16.4)$$

em que T_r é o tempo de indexação (min). Referimo-nos previamente a esse tempo de indexação como o tempo de

reposicionamento, de maneira que, em prol da consistência, manteremos a mesma notação.

EXEMPLO 16.1

Mecanismo de Genebra para uma mesa rotativa indexada

Uma mesa rotativa é impulsionada por um mecanismo de Genebra com seis fendas, como na Figura 16.7. O sistema motor gira a 30 rpm. Determine o tempo de ciclo, o tempo de processamento disponível e o tempo perdido a cada ciclo para girar a mesa.

Solução: Com uma velocidade rotacional do motor de 30 rpm, o tempo total de ciclo é dado pela Equação (16.2):

$$T_c = (30)^{-1} = 0,0333 \text{ min} = 2 \text{ s}$$

O ângulo de rotação da mesa de trabalho durante a indexação para um mecanismo de Genebra de seis fendas é dado pela Equação (16.1):

$$\theta = \frac{360}{6} = 60^\circ$$

As equações (16.3) e (16.4) dão o tempo de serviço disponível e o tempo de indexação, respectivamente, como:

$$T_s = \frac{(180 + 60)}{360(30)} = 0,0222 \text{ min} = 1,333 \text{ s}$$

$$T_r = \frac{(180 - 60)}{360(30)} = 0,0111 \text{ min} = 0,667 \text{ s}$$

Vários tipos de mecanismos de *came*, um dos quais é ilustrado na Figura 16.8, são utilizados para proporcionar um método preciso e confiável de indexar uma mesa rotativa. Apesar de ser um mecanismo propulsor relativamente caro, a vantagem é que o *came* pode ser projetado para proporcionar uma variedade de características de velocidade e pausa.

Figura 16.7 Mecanismo de Genebra com seis aberturas

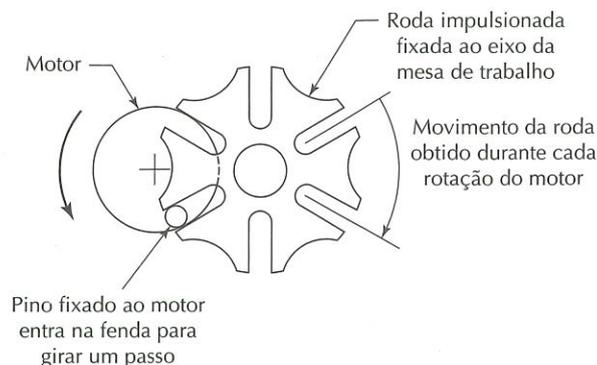
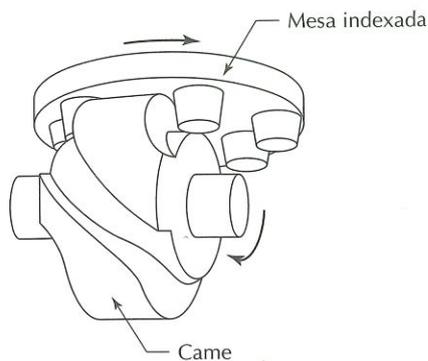


Figura 16.8 Mecanismo de came para impelir uma mesa rotativa indexada (reimpresso de Boothroyd, Poli e Murch [1])



16.1.3 Buffers de armazenamento

Linhas de produção automatizadas podem ser projetadas com *buffers* de armazenamento. Um *buffer de armazenamento* é um local na linha de produção onde peças podem ser coletadas e temporariamente armazenadas antes de proceder para estações de trabalho subsequentes. *Buffers* de armazenamento podem ser operados manualmente ou ser automatizados. Quando automatizado, um *buffer* de armazenamento consiste de um mecanismo para aceitar peças da estação de trabalho anterior, um lugar para armazenar as peças e um mecanismo para fornecer peças para a estação seguinte. Um parâmetro-chave de um *buffer* de armazenamento é sua capacidade de armazenamento, isto é, o número de peças que é capaz de conter. *Buffers* de armazenamento podem estar localizados entre todos os pares de estações adjacentes ou entre estágios da linha contendo múltiplas estações. Ilustramos o caso de um *buffer* de armazenamento entre dois estágios na Figura 16.9.

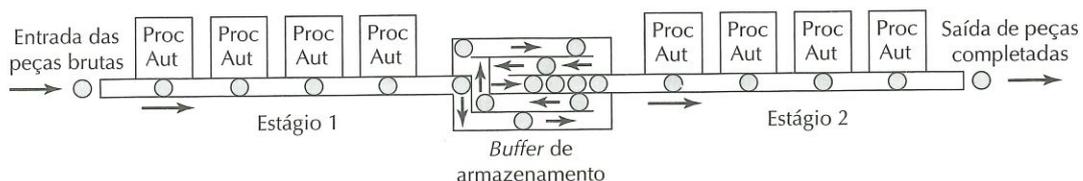
Há várias razões para *buffers* de armazenamento serem utilizados em linhas de produção automatizadas:

- Para reduzir o impacto de quebras nas estações. *Buffers* de armazenamento entre estágios em uma linha de produção permitem que um estágio continue a operação enquanto outro estágio está parado para reparos. Analisamos essa situação na Seção 16.3.2.

- Para fornecer um banco de peças para abastecer a linha. Peças podem ser coletadas em uma unidade de armazenamento e automaticamente alimentar um sistema de manufatura. Isso permite a operação do sistema sem assistência entre reabastecimentos.
- Proporcionar um local para colocar a produção da linha.
- Permitir tempo de cura ou outro atraso de processo. Um tempo de cura é exigido para alguns processos como pintura ou aplicação de adesivo. O *buffer* de armazenamento é projetado para proporcionar tempo suficiente para que a cura ocorra antes de fornecer peças para a estação seguinte.
- Suavizar as variações de tempo de ciclo. Apesar de geralmente não ser considerada em uma linha automatizada, é relevante em linhas de produção manual, nas quais variações de tempo de ciclo são característica inerente do desempenho humano.

Buffers de armazenamento são melhor acomodados no projeto de uma máquina de transferência em linha do que em uma máquina de mesa rotativa. No segundo caso, *buffers* de armazenamento ficam às vezes localizados (1) antes de um sistema rotativo de indexação para proporcionar um banco de peças brutas de partida, (2) seguindo a máquina de mesa rotativa indexada para aceitar a produ-

Figura 16.9 Buffers de armazenamento entre dois estágios de uma linha de produção



ção do sistema ou (3) entre pares de máquinas de mesa rotativa indexadas adjacentes.

16.1.4 Controle da linha de produção

Controlar uma linha de produção automatizada é algo complexo devido ao simples número de atividades sequenciais e simultâneas que ocorrem durante sua operação. Nesta seção, discutimos (1) as funções básicas de controle realizadas para operar a linha e (2) os controladores utilizados nas linhas automatizadas.

Funções de controle. Três funções básicas de controle podem ser distinguidas na operação de uma máquina de transferência automática: (1) controle de sequência, (2) monitoramento de segurança e (3) controle de qualidade.

A finalidade do controle de sequência é coordenar a sequência de ações do sistema de transferência e das estações de trabalho associadas. As várias atividades da linha de produção têm de ser cumpridas com sincronismo numa precisão de uma fração de segundo. Em uma linha de transferência, por exemplo, as peças têm de ser liberadas das suas estações de trabalho atuais, transportadas, posicionadas e presas em suas respectivas estações. Então os cabeçotes têm de ser acionados para começar seus ciclos de alimentação, e assim sucessivamente. A função de controle de sequência na operação de linha de produção automatizada inclui tanto o controle lógico como o controle sequencial, conforme discutido no Capítulo 9.

A função de monitoramento de segurança assegura que a linha de operação não opere de maneira insegura. A segurança aplica-se tanto aos trabalhadores na área como ao próprio equipamento. Sensores adicionais têm de ser incorporados à linha, além daqueles exigidos para o controle da sequência, a fim de completar a realimentação de segurança e evitar uma operação perigosa. Por exemplo, mecanismos de travamento têm de ser instalados para evitar que o equipamento opere quando os trabalhadores estão realizando manutenção ou outras tarefas na linha. No caso de linhas de transferência de usinagem, ferramentas de corte têm de ser monitoradas quanto a quebras e/ou desgaste excessivo para evitar seu uso na peça. Um tratamento completo do monitoramento de segurança em sistemas de manufatura é apresentado na Seção 4.2.1.

Na função de controle de qualidade, determinados atributos das peças são monitorados. A finalidade é detectar e possivelmente rejeitar itens defeituosos produzidos na linha. Os dispositivos de inspeção exigidos para realizar o controle de qualidade são às vezes incorporados às estações de processamento existentes.

Em outros casos, estações de inspeção separadas são incluídas na linha com o único propósito de conferir a característica de qualidade desejada. Discutimos princípios e práticas de inspeção de qualidade, assim como tecnologias de inspeção associadas, nos capítulos 21 e 22, respectivamente.

Controladores de linha. Controladores lógicos programáveis (do inglês, *programmable logic controllers — PLCs*, Capítulo 9) são os controladores convencionais utilizados em linhas de produção automatizada hoje. Computadores pessoais (do inglês, *personal computers — PCs*) equipados com software de controle e projetados para o ambiente de fábrica são também amplamente utilizados. O controle de computador oferece os benefícios a seguir:

- Oportunidade para melhorar e incrementar o software de controle, como acrescentar funções de controle específicas não antecipadas no projeto do sistema original.
- Gravação de dados sobre o desempenho do processo, confiabilidade do equipamento e qualidade do produto para análise posterior. Em alguns casos, registros de qualidade do produto têm de ser mantidos por razões legais.
- Rotinas de diagnóstico para executar prontamente manutenção e reparos quando ocorrem problemas na linha e para reduzir a duração dos incidentes de paradas do equipamento.
- Geração automática de cronogramas de manutenção preventiva indicando quando determinadas atividades devem ser realizadas. Ajuda a reduzir a frequência de incidentes de paradas do equipamento.
- Uma interface homem-máquina mais conveniente entre o operador e a linha automatizada.

16.2 APLICAÇÕES DE LINHAS DE PRODUÇÃO AUTOMATIZADAS

Linhas de produção automatizadas são aplicadas em operações de processamento assim como de montagem. Discutimos sistemas de montagem automatizada no Capítulo 17. A usinagem é uma das aplicações de processamento mais comuns e é o foco da maior parte de nossa discussão nesta seção. Outros processos realizados em linhas de produção automatizada e sistemas similares incluem conformação e corte de metal laminado, operações de laminação, soldagem a ponto de carrocerias de automóveis, operações de pintura e galvanização.

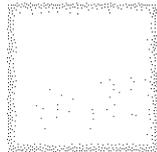
16.2.1 Sistemas de usinagem

Muitas aplicações de máquinas de transferência de usinagem, tanto de configurações em linha como de rotativas, são encontradas na indústria automotiva para produzir motores e componentes propulsores de trens. Na realidade, as primeiras linhas de transferência podem ser ligadas historicamente à indústria automotiva (Nota histórica 16.1). Operações de usinagem comumente realizadas em linhas de transferência incluem fresamento, furação, alargamento, rosqueamento, retífica e operações com ferramentas de corte rotacionais similares. É possível realizar torneamento e broqueamento em linhas de transferência, mas essas aplicações são menos comuns. Nesta seção, discutimos os vários sistemas de usinagem de múltiplas estações.

Linhas de transferência. Em uma linha de transferência, as estações de trabalho contendo cabeçotes de usinagem são arranjadas em uma configuração em linha ou segmentada, e as peças são movidas entre estações por meio de mecanismos de transferência como o sistema de

balancins (Seção 16.1.2). Trata-se do sistema mais altamente automatizado e produtivo em termos do número de operações que podem ser realizadas para acomodar geometrias de trabalho complexas e as taxas de produção que podem ser alcançadas. É também o mais caro dos sistemas discutidos nesta seção. Linhas de transferência do tipo usinagem são representadas na Figura 16.3. A linha de transferência pode incluir um grande número de estações de trabalho, mas a confiabilidade do sistema cai à medida que o número de estações é aumentado (discutimos essa questão na Seção 16.3). Entre as variações em características e opções encontradas em linhas de transferência, temos que:

- O transporte de peças pode ser síncrono ou assíncrono.
- As peças podem ser transportadas com ou sem dispositivos de fixação em paletes, dependendo da geometria da peça e da facilidade de manuseio.
- Uma série de características de monitoramento e controle podem ser incluídas para administrar a linha.



Nota histórica 16.1

Linhas de transferência [15]

O desenvolvimento de linhas de transferência automatizadas originou-se na indústria automotiva, que havia se tornado a maior indústria de produção em massa nos Estados Unidos no início dos anos 1920 e era também importante na Europa. A Ford Motor Company foi pioneira no desenvolvimento da linha de montagem em movimento, e suas operações eram manuais. O passo seguinte foi estender o princípio das linhas de montagem manuais, construindo linhas capazes de operações automáticas ou semiautomáticas. A primeira linha de produção completamente automática é creditada a L. R. Smith, de Milwaukee, Wisconsin, entre 1919 e 1920. Essa linha produziu chassis de chapas de metal, utilizando cabeçotes de rebiteagem acionados pneumáticamente que giravam para sua posição em cada estação para trabalhar na peça. A linha realizava um total de 550 operações em cada chassi e era capaz de produzir mais de um milhão de chassis por ano.

A primeira linha de usinagem de metal de múltiplas estações foi desenvolvida em 1923, pela Archdale Company, na Inglaterra, para a Morris Engines, para usinar blocos de motores de automóveis. Tinha 53 estações, realizava 224 minutos de usinagem em cada peça e tinha taxa de produção de 15 blocos/hora. Não era uma verdadeira linha automática porque exigia a transferência manual da peça entre estações. No entanto, destacava-se como pioneira da linha de transferência automática.

A primeira linha de usinagem a utilizar a transferência automática de itens entre estações foi construída pela Archdale Company, para a Morris Engines, em 1924. As duas empresas haviam obviamente se beneficiado da colaboração anterior. Essa linha realizou 45 operações de usinagem em caixas de câmbio e produziu a uma taxa de 17 unidades/hora. Problemas de confiabilidade limitaram o sucesso dessa primeira linha de transferência.

Recentemente, linhas de transferência foram projetadas para facilitar trocas para permitir que peças diferentes, mas similares, sejam produzidas na mesma linha [10], [11], [13]. As peças nessas linhas consistem de uma combinação de ferramental fixo e máquinas CNC (do inglês, *computer numerical control*), de maneira que as diferenças entre peças podem ser acomodadas pelas estações CNC enquanto as operações comuns são desempenhadas por estações com ferramental fixo. Desse modo, vemos uma tendência em linhas de transferência em direção de sistemas de manufatura flexíveis (Capítulo 19).

Máquinas de transferência rotativa e sistemas relacionados. Uma máquina de transferência rotativa consiste de uma mesa de trabalho circular horizontal, sobre a qual são fixadas as peças que serão processadas e em torno de sua periferia estão localizados cabeçotes estacionários. A mesa de trabalho é indexada para apresentar cada peça a cada cabeçote para realizar a sequência de operações de usinagem (Figura 16.10). Em comparação

a uma linha de transferência, a máquina de mesa rotativa é limitada a peças menores, mais leves e menos estações de trabalho.

Dois variantes da máquina de transferência rotativa são a máquina de coluna central e a de munhão (do inglês, *trunnion machine*). Na *máquina de coluna central*, cabeçotes de usinagem vertical são montados em uma coluna central além dos cabeçotes de usinagem estacionários localizados do lado externo da mesa de trabalho horizontal, aumentando o número de operações de usinagem que podem ser realizadas. A máquina de coluna central, descrita na Figura 16.11, é considerada como sendo uma máquina de alta produção que faz uso eficiente do espaço de chão da fábrica. A *máquina de munhão* é assim chamada devido a uma mesa de trabalho verticalmente orientada, ou *munhão*, para a qual estão fixados prendedores de peças para fixar as peças para usinagem. Já que o munhão gira em torno de um eixo horizontal, proporciona a oportunidade de realizar operações de usinagem em lados opostos da peça. Cabeçotes adicionais podem ser posicionados em torno da periferia do munhão para aumentar o número

Figura 16.10. Visão plana de uma máquina de transferência rotativa

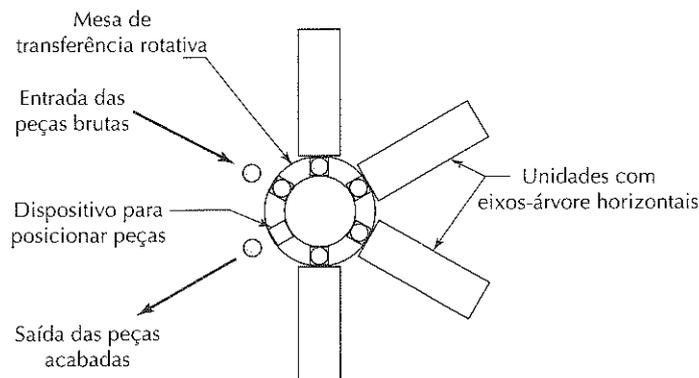
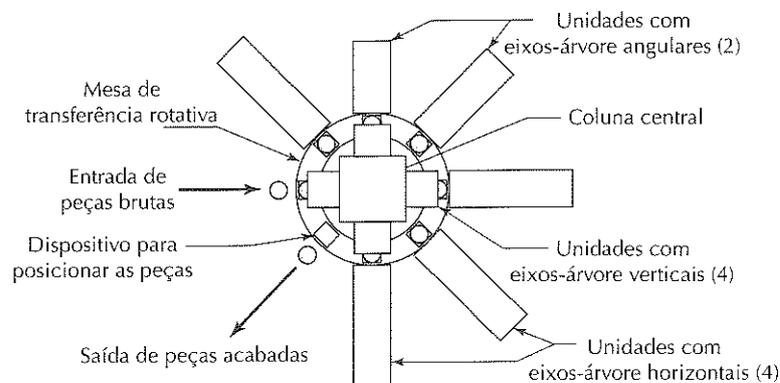


Figura 16.11. Visão plana da máquina de coluna central



de direções de usinagem. Máquinas de munhão são mais adequadas para peças menores do que as outras máquinas rotativas discutidas aqui.

16.2.2 Considerações para o projeto de sistemas

A maioria das empresas que utilizam linhas de produção automatizadas e sistemas relacionados passam o projeto do sistema para um fabricante de máquinas ferramenta que se especializa nesse tipo de equipamento. O cliente (empresa comprando o equipamento) tem de desenvolver especificações que incluam desenhos de projeto da peça e a taxa de produção exigida. Normalmente, vários fabricantes de máquinas-ferramenta são convidados

para submeter propostas. Cada proposta é baseada nos componentes de máquinas que fazem parte da linha de produtos do fabricante e depende do engenheiro que prepara a proposta. A linha proposta consiste de cabeçotes-padrão, eixos-árvore, unidades alimentadoras, motores, mecanismos de transferência, bases e outros módulos-padrão, todos montados em uma configuração especial para atender aos requisitos de usinagem da peça em particular. Exemplos desses módulos-padrão são ilustrados nas figuras 16.12 e 16.13. Os controles para o sistema são projetados pelo fabricante da máquina ou subcontratados em separado com um especialista em controles. Linhas de transferência e máquinas de mesa rotativa construídas utilizando essa abordagem de blocos modulares são às vezes

Figura 16.12 Unidades alimentadoras padronizadas utilizadas em máquinas de transferência em linha e rotativas: (a) unidade alimentadora horizontal, (b) unidade alimentadora angular e (c) unidade de coluna vertical

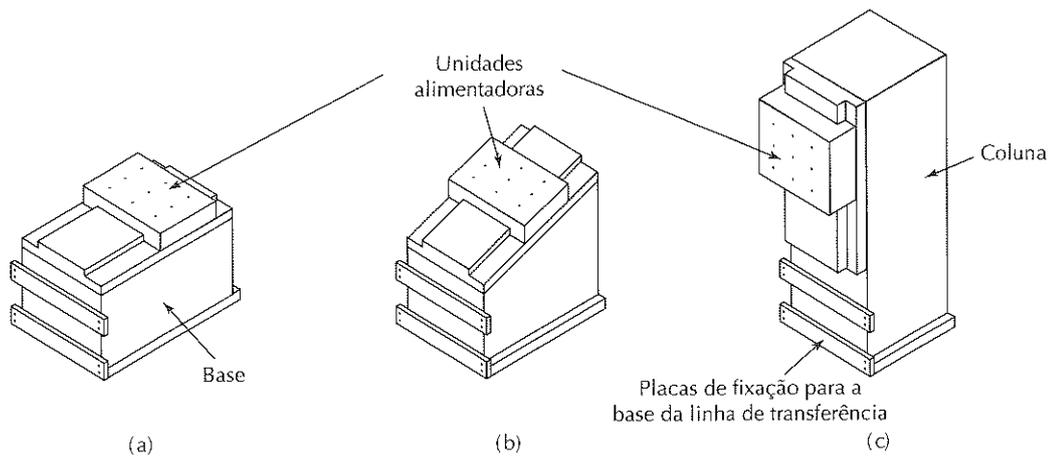
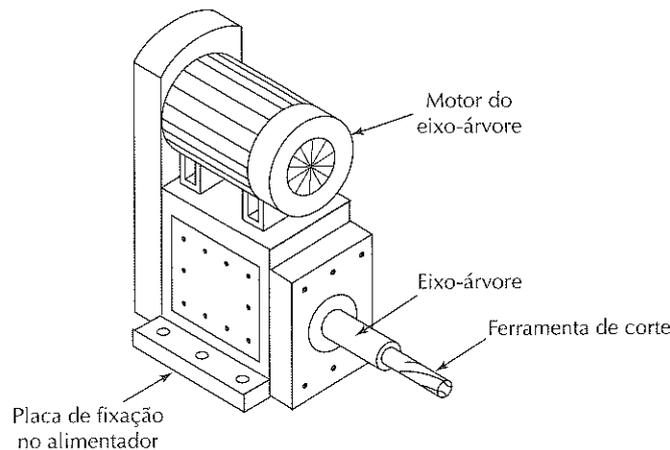


Figura 16.13 Unidade padronizada de cabeçote de fresamento. Esta unidade fixa-se às unidades alimentadoras da Figura 16.12



referidas como *linhas de produção em módulos* (do inglês, *unitized production lines*).

Uma abordagem alternativa no projeto de uma linha automatizada é utilizar máquinas-ferramenta padronizadas e conectá-las a dispositivos de manuseio padronizados ou especiais. O hardware de manuseio de materiais serve como um sistema de transferência que move as peças entre as máquinas-padrão. O termo *conexão de linha* (do inglês, *link line*) é às vezes utilizado em conexão com esse tipo de construção. Em alguns casos, as máquinas individuais são manualmente operadas, se houver problemas de localização e gabaritação nas estações que sejam difíceis de solucionar sem assistência humana.

Frequentemente uma empresa prefere desenvolver uma linha com conexões em vez de uma linha de produção unificada porque ela pode utilizar equipamentos existentes na planta. Isso normalmente significa que a linha de produção pode ser instalada mais cedo e a um custo mais baixo. Já que as máquinas-ferramenta no sistema são padronizadas, elas podem ser reutilizadas quando a operação de produção tiver terminado. As linhas também podem ser projetadas pelo pessoal da empresa em vez de por empreiteiros de fora. A limitação da linha com conexões é tender a favorecer formatos de peças mais simples e, portanto, menos operações e estações de trabalho. Linhas unificadas são geralmente capazes de taxas de produção mais altas e exigem menos espaço de chão de fábrica. Entretanto, o alto custo as torna adequadas somente para operações de produção muito longas em produtos que não são submetidos a mudanças frequentes de projeto.

16.3 ANÁLISE DE LINHAS DE TRANSFERÊNCIA

Na análise e projeto de linhas de produção automatizada, três áreas-problema têm de ser consideradas: (1) balanceamento da linha, (2) tecnologia de processamento e (3) confiabilidade do sistema.

O problema do balanceamento da linha é mais associado a linhas de montagem manuais (Seção 15.2.2), mas também aparece em linhas de produção automatizadas. Assim, o trabalho de processamento total que deve ser realizado na linha automatizada tem de ser dividido da maneira mais uniforme possível entre as estações de trabalho. Em uma linha de montagem manual, o conteúdo de trabalho total pode ser dividido em elementos de trabalho muito menores, e os elementos podem ser alocados nas estações de trabalho para determinar a tarefa a ser desempenhada em cada estação, como detalhado no capítulo anterior. Cada tarefa tem um tempo de execução correspondente. Em uma linha de produção automatizada, as tarefas consistem de passos de processamento cuja se-

quência e cujos tempos de execução são limitados por considerações técnicas. Por exemplo, em uma linha de transferência de usinagem, determinadas operações têm de ser realizadas antes de outras. A furação tem de preceder o rosqueamento para criar um furo roscado. As superfícies de referência têm de ser usinadas antes que as operações que utilizarão aquelas superfícies de referência sejam usinadas. Essas 'restrições de precedência', como chamamos no Capítulo 15, impõem uma restrição significativa na ordem em que os passos de processamento podem ser dados. Uma vez que a sequência de operações tenha sido estabelecida, então o tempo de serviço em uma determinada estação depende de quanto tempo leva para realizar a operação nessa estação.

A tecnologia de processo refere-se ao corpo de conhecimento em torno da teoria e dos princípios dos processos de manufatura em particular utilizados na linha de produção. Por exemplo, no processo de usinagem, a tecnologia de processo inclui a metalurgia e a usinabilidade do material de trabalho, a aplicação das ferramentas de corte apropriadas, a escolha de velocidades de avanço e rotações, o controle de cavacos e uma série de outras áreas e questões-problema. Muitos dos problemas encontrados na usinagem podem ser solucionados por meio da aplicação direta de bons princípios de usinagem. O mesmo acontece com outros processos. Em cada processo, uma tecnologia foi desenvolvida com muitos anos de pesquisa e prática. Ao fazer uso dessa tecnologia, cada estação de trabalho individual na linha de produção pode ser designada para operar no ou próximo de seu desempenho máximo.

A terceira área-problema na análise e no projeto de linhas de produção automatizadas é a da confiabilidade. Em um sistema altamente complexo e integrado como uma linha de produção automatizada, a falha de um componente pode parar o sistema inteiro. Esse problema é o foco desta seção. Nossa abordagem é dividida em duas partes: (1) análise de linhas de transferência sem armazenamento interno de peças e (2) análise de linhas de transferência com *buffers* de armazenamento.

16.3.1 Linhas de transferência sem armazenamento interno de peças

A Figura 16.1 ilustra a configuração de uma linha de transferência sem armazenamento interno de peças. Os modelos matemáticos desenvolvidos nesta seção também são aplicáveis a máquinas de mesa rotativa (Figura 16.4). Formulamos os seguintes pressupostos sobre a operação desses sistemas: (1) as estações de trabalho realizam operações de processamento como usinagem, não montagem; (2) os tempos de processamento em cada estação são cons-