

Sistemas flexíveis de manufatura

CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 19.1 O que é um sistema flexível de manufatura?
 - 19.1.1 Flexibilidade
 - 19.1.2 Tipos de FMSs
- 19.2 Componentes do FMS
 - 19.2.1 Estações de trabalho
 - 19.2.2 Sistema de manuseio e armazenamento de material
 - 19.2.3 Sistema de controle computadorizado
 - 19.2.4 Recursos humanos
- 19.3 Aplicações e vantagens do FMS
 - 19.3.1 Aplicações do FMS
 - 19.3.2 Vantagens do FMS
- 19.4 Aspectos de planejamento e implementação do FMS
 - 19.4.1 Aspectos de planejamento e projeto do FMS
 - 19.4.2 Aspectos operacionais do FMS
- 19.5 Análise quantitativa dos sistemas flexíveis de manufatura
 - 19.5.1 Modelo de gargalo
 - 19.5.2 Modelo de gargalo estendido
 - 19.5.3 Dimensionando o FMS
 - 19.5.4 O que os números nos dizem

O sistema flexível de manufatura (do inglês, *flexible manufacturing systems* — FMS) foi identificado no capítulo anterior como um dos tipos de célula de manufatura usados para implementar a manufatura celular. Ela é a mais automatizada e tecnologicamente sofisticada das células de tecnologia de grupo. Um FMS normalmente possui várias estações automatizadas e é capaz de roteamentos variáveis entre as estações. Sua flexibilidade lhe permite operar como um sistema de modelo misto. Um FMS inte-

gra em um único sistema de manufatura altamente automatizado muitos dos conceitos e das tecnologias discutidos nos capítulos anteriores, incluindo a automação flexível (Seção 1.2.1), as máquinas CNC (Capítulo 7), o controle computadorizado distribuído (Seção 5.5.3), o manuseio e o armazenamento de material (capítulos 10 e 11) e a tecnologia de grupo (Capítulo 18). O conceito de sistema flexível de manufatura teve origem na Grã-Bretanha, no início da década de 1960 (Nota histórica 19.1), e as pri-

meiras instalações de FMS nos Estados Unidos ocorreram por volta de 1967. Esses primeiros sistemas realizavam operações de usinagem em famílias de peças usando máquinas-ferramenta NC (do inglês, *numerical control*).

A tecnologia FMS pode ser aplicada em situações de produção semelhantes às aquelas identificadas na manufatura celular:

- A fábrica atualmente produz peças em lotes ou usa células de tecnologia de grupo (TG; do inglês, *technology group* — GT) com operadores, mas a gerência deseja automatizar.
- É possível agrupar em famílias uma parte das peças produzidas na fábrica, cujas semelhanças permitem que sejam processadas nas máquinas do sistema flexível de manufatura.

Tais semelhanças entre peças podem significar que (1) as peças pertençam a um produto comum e/ou (2) as peças possuam geometrias semelhantes. Em qualquer caso, os requisitos de processamento das peças precisam ser suficientemente parecidos para permitir que sejam fabricadas no FMS.

- As peças ou produtos produzidos pela fábrica estão na faixa de produção de médio volume e média variedade. A faixa de volume de produção apropriada é de 5 mil a 75 mil peças por ano [14]. Se a produção anual estiver abaixo disso, o FMS provavelmente será uma alternativa mais cara. Se o volume de produção estiver acima, então um sistema especializado provavelmente deve ser considerado.

Nota histórica 19.1

Sistemas flexíveis de manufatura [19], [20], [21]

O sistema flexível de manufatura foi idealizado originalmente para usinagem e exigiu o desenvolvimento prévio do controle numérico. O conceito é creditado a David Williamson, engenheiro britânico empregado por Molins durante meados da década de 1960. Molins solicitou uma patente para a invenção, que foi concedida em 1965. O conceito foi chamado de *System 24*, pois se acreditava que o grupo de máquinas-ferramenta que compunham o sistema poderia funcionar 24 horas por dia, das quais 16 horas seriam sem assistência de trabalhadores humanos. O conceito original incluía o controle computadorizado das máquinas NC, a produção de uma variedade de peças e a utilização de depósitos que poderia armazenar várias ferramentas para diferentes operações de usinagem.

Um dos primeiros sistemas flexíveis de manufatura instalados nos Estados Unidos foi o sistema de usinagem da Ingersoll-Rand Company, em Roanoke, Virgínia, na década de 1960, pela Sundstrand, fabricante de máquinas-ferramenta. Em seguida, outros sistemas foram introduzidos, como o FMS Kearney & Trecker na Caterpillar Tractor e o 'Sistema de missão variável' na Cincinnati Milacron. A maioria das primeiras instalações de FMSs nos Estados Unidos estava em grandes empresas, como a Ingersoll-Rand, a Caterpillar, a John Deere e a General Electric Company, que, além dos recursos financeiros necessários para os grandes investimentos, também possuíam a experiência prévia em máquinas NC, em sistemas de computadores e em sistemas de manufatura, possibilitando que se tornassem pioneiras na nova tecnologia FMS. Os sistemas flexíveis de manufatura também foram instalados em outros países ao redor do mundo. Na República Federal da Alemanha (Alemanha Oriental, atual Alemanha), um sistema foi desenvolvido em 1969 por Heidleberger Druckmaschinen em cooperação com a Universidade de Stuttgart. Na URSS (atual Rússia), um sistema flexível foi demonstrado na Exposição de Stanki de 1972, em Moscou. O primeiro FMS japonês foi instalado na mesma época pela Fuji Xerox. Por volta de 1985, o número de instalações FMS em todo o mundo havia aumentado para aproximadamente 300. Cerca de 20 a 25 por cento estavam localizadas nos Estados Unidos. Nos últimos anos, aumentou a procura por células de manufatura flexível menores e menos caras.

As diferenças entre a instalação de um sistema flexível de manufatura e a implementação de uma célula de manufatura manual são: (1) o FMS requer investimento muito maior porque novos equipamentos estão sendo instalados, enquanto a célula de manufatura manual pode exigir apenas que equipamentos existentes sejam reorganizados e (2) o FMS é tecnologicamente mais sofisticado para os recursos humanos que devem fazê-lo funcionar. No entanto, as vantagens potenciais são enormes. Entre elas, o aumento da utilização da máquina, a redução do espaço de chão de fábrica, maior capacidade de resposta à mudança, menores prazos de estoque e de fabricação e maior produtividade. Detalhamos essas vantagens na Seção 19.3.2.

Neste capítulo, vamos definir e discutir o sistema flexível de manufatura: o que o torna flexível, quais são seus componentes e suas aplicações e como implementar a tecnologia. Na última seção, apresentamos um modelo matemático para avaliar o desempenho do sistema flexível de manufatura.

19.1 O QUE É UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA?

Um sistema flexível de manufatura (FMS) é uma célula de manufatura TG altamente automatizada, composta por um grupo de estações de processamento (geralmente máquinas-ferramenta de controle numérico computadorizado — CNC), interligadas por um sistema automatizado de manuseio e armazenamento de material e controladas por um sistema distribuído de computação. O motivo de o FMS ser chamado de flexível é que ele é capaz de processar uma variedade de tipos de peças diferentes simultaneamente nas diversas estações de trabalho, e a mistura de tipos de peças e as quantidades de produção podem ser ajustadas em resposta às mudanças de demanda. O FMS é mais adequado para a faixa de produção de variedade média e volume médio (Figura 1.5).

À vezes, as iniciais FMS são também usadas para designar o termo *sistema de usinagem flexível* (do inglês, *flexible machining system*). O processo de usinagem é a maior área de aplicação para a tecnologia FMS. No entanto, parece adequado interpretar FMS no sentido mais amplo, permitindo uma gama de aplicações possíveis além da usinagem.

Um FMS se baseia nos princípios da tecnologia de grupo. Nenhum sistema de manufatura pode ser completamente flexível. Existem limites para a gama de peças ou produtos que podem ser feitos em um FMS. Assim, um sistema flexível de manufatura é projetado para produzir dentro de uma faixa definida de tipos, tamanhos e proces-

sos. Em outras palavras, um FMS é capaz de produzir uma única família de peças ou um número limitado de famílias de peças.

Um termo mais apropriado para o FMS seria *sistema flexível de manufatura automatizado*. O uso da palavra 'automatizado' distinguiria esse tipo de tecnologia de produção de outros sistemas de manufatura flexíveis, mas não automatizados, como uma célula de manufatura TG com operadores. A palavra 'flexível' o distinguiria de outros sistemas de manufatura altamente automatizados, mas não flexíveis, como uma linha de transferência convencional. No entanto, a terminologia existente está bem estabelecida.

19.1.1 Flexibilidade

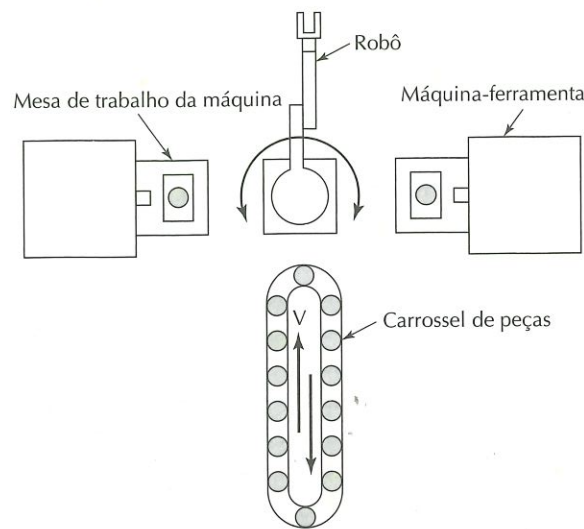
A questão da flexibilidade do sistema de manufatura foi discutida anteriormente na Seção 13.2.5, na qual identificamos três recursos que um sistema de manufatura deve possuir para ser flexível: (1) a capacidade de identificar e distinguir os diferentes tipos de peças ou produtos processados pelo sistema, (2) a rápida troca das instruções operacionais e (3) da configuração física. A flexibilidade é um atributo que se aplica tanto aos sistemas manuais como aos automatizados. Nos manuais, os trabalhadores humanos são, muitas vezes, os facilitadores da flexibilidade do sistema.

Para desenvolver o conceito de flexibilidade em um sistema de manufatura automatizado, considere uma célula constituída de duas máquinas-ferramenta CNC que são carregadas e descarregadas por um robô industrial a partir de um carrossel de peças, como no arranjo ilustrado na Figura 19.1. A célula opera sem assistência por longos períodos de tempo. Periodicamente, um trabalhador precisa descarregar peças prontas do carrossel e substituí-las por novas. Por qualquer definição, essa é uma célula de manufatura automatizada, mas seria uma célula de manufatura flexível? Pode-se dizer que sim, é flexível, pois a célula é composta de máquinas-ferramenta CNC, e as máquinas CNC são flexíveis porque podem ser programadas para usinar diferentes configurações de peças. Contudo, se a célula funcionar apenas no modo em lote, no qual o mesmo tipo de peça é produzido por ambas as máquinas em lotes de várias centenas de unidades, então ela não se qualifica como manufatura flexível.

Para ser considerado flexível, um sistema de manufatura precisa satisfazer a vários critérios. A seguir, apresentamos quatro testes razoáveis de flexibilidade em um sistema de manufatura automatizado:

1. *Teste da variedade de peças.* O sistema pode processar diferentes tipos de peças em um modo não lote?

Figura 19.1 Célula de manufatura automatizada com duas máquinas-ferramenta e robô. É uma célula flexível?



2. **Teste da mudança de programa.** O sistema pode aceitar imediatamente mudanças no programa de produção, ou seja, alterações no *mix* de peças e/ou nas quantidades?
3. **Teste da recuperação de erros.** O sistema pode se recuperar tranquilamente de falhas de equipamento e paralisações, de modo que a produção não seja completamente interrompida?
4. **Teste das novas peças.** Novos projetos de peça podem ser introduzidos no *mix* de produtos existentes com relativa facilidade?

Se a resposta a todas essas perguntas for 'sim' para determinado sistema de manufatura, então ele pode ser considerado flexível. Os critérios mais importantes são o (1) e o (2). Os critérios (3) e (4) são menos rigorosos e podem ser implementados em vários níveis. Na verdade, a introdução de novos projetos de peça não é considerada em alguns sistemas flexíveis de manufatura; esses sistemas são projetados para produzir uma família de peças cujos membros são conhecidos antecipadamente.

Voltando à ilustração, a célula de trabalho robótica satisfaz os critérios se ela (1) puder produzir diferentes configurações de peças em um *mix*, em vez de em lotes; (2) permitir alterações no programa de produção; (3) for capaz de operar mesmo se uma máquina sofrer uma paralisação (por exemplo, enquanto reparos estão sendo feitos na máquina quebrada, seu trabalho é temporariamente transferido para a outra máquina); e (4) puder acomodar novos projetos de peça se os programas de peça NC forem escritos off-line e, depois, transferidos ao sistema para execução. A quarta capacidade requer que a nova peça

esteja dentro da família de peças destinada ao FMS, de modo que as ferramentas usadas pelas máquinas CNC e o efetuator final do robô estejam adaptados ao novo projeto de peça.

19.1.2 Tipos de FMSs

Tendo considerado a questão da flexibilidade, vejamos os tipos de sistemas flexíveis de manufatura. Cada FMS é projetado para uma aplicação específica, ou seja, uma família de peças e processos específicos. Portanto, cada FMS possui seu projeto personalizado e é único. Dadas essas circunstâncias, esperaríamos encontrar uma grande variedade de projetos de sistema para satisfazer um amplo leque de exigências de aplicações.

Os sistemas flexíveis de manufatura podem ser distinguidos de acordo com os tipos de operações que realizam: operações de processamento ou operações de montagem (Seção 2.2.1). Um FMS normalmente é projetado para executar uma ou outra, mas raramente ambas. Uma diferença aplicável aos sistemas de usinagem é se o sistema processará peças rotativas ou prismáticas (Seção 13.2.1). Os sistemas de usinagem flexíveis com múltiplas estações que processam peças rotativas são muito menos comuns do que os sistemas que processam peças prismáticas (não rotativas). Duas outras maneiras de classificar os sistemas flexíveis de manufatura são: pelo número de máquinas e pelo nível de flexibilidade.

Número de máquinas. Os sistemas flexíveis de manufatura podem ser distinguidos de acordo com o número de máquinas no sistema. Algumas categorias típicas

são: (1) célula de máquina única, (2) célula flexível de manufatura e (3) sistema flexível de manufatura.

Uma célula de máquina única consiste de um centro de usinagem CNC combinado com um sistema de armazenamento de peças para operação autônoma (Seção 14.2.2), como na Figura 19.2. As peças concluídas são periodicamente descarregadas da unidade de armazenamento de peças e as peças brutas são nela carregadas. A célula pode ser projetada para operar no modo lote, no modo flexível ou em uma combinação dos dois. Quando operada no modo lote, a máquina processa peças de um único tipo em tamanhos de lote especificados e, depois, é modificada para processar um lote do próximo tipo de peça. Quando operado em um modo flexível, o sistema satisfaz três dos quatro testes de flexibilidade. Ele é capaz de (1) processar tipos diferentes de peças, (2) responder a mudanças no programa de produção e (4) aceitar introduções de novas peças. O critério (3), recuperação de erros, não pode ser satisfeito porque, se a única máquina quebrar, a produção para.

Uma célula flexível de manufatura (do inglês, *flexible manufacturing cell* — FMC) consiste de duas ou três estações de trabalho de processamento (normalmente centros de usinagem CNC ou centros de torneamento) com um sistema de manuseio de peças, que é conectado a uma estação de carga/descarga e geralmente inclui uma capacidade limitada de armazenamento de peças. Uma possível FMC é ilustrada na Figura 19.3. Uma célula de manufatura flexível satisfaz os quatro testes de flexibilidade discutidos anteriormente.

Um sistema flexível de manufatura (FMS) possui quatro ou mais estações de processamento conectadas mecanicamente por um sistema de manuseio de peças comum e eletronicamente por um sistema de computação distribuído. Assim, uma importante distinção entre o FMS e a FMC está no número de máquinas: um FMC possui duas ou três máquinas, enquanto um FMS possui quatro ou mais.¹ Normalmente existem outras diferenças também. Uma delas é que o FMS em geral inclui estações de trabalho não processadoras que apoiam a produção, mas não participam diretamente dela. Essas outras incluem estações de lavagem de peça/paleta, máquinas

de medição por coordenadas e assim por diante. Outra diferença é que o sistema de controle computadorizado de um FMS é geralmente maior e mais sofisticado e, muitas vezes, inclui funções nem sempre encontradas em uma célula, como diagnóstico e monitoramento de ferramentas. Essas funções adicionais são mais necessárias em um FMS do que em uma FMC, já que o FMS é mais complexo.

Algumas das características distintivas das três categorias de células e sistemas flexíveis de manufatura são resumidas na Figura 19.4. A Tabela 19.1 compara os três sistemas em função dos quatro testes de flexibilidade.

Nível de flexibilidade. Outra maneira de classificar os sistemas flexíveis de manufatura é conforme o nível de flexibilidade designado para o sistema. Esse método de classificação pode ser aplicado a sistemas com qualquer número de estações de trabalho, mas sua aplicação parece mais comum com FMCs e FMSs. As duas categorias de flexibilidade são (1) dedicada e (2) de ordem aleatória.

O FMS dedicado é projetado para produzir uma variedade limitada de tipos de peças, e o universo completo de peças que serão fabricadas no sistema é previamente conhecido. A família de peças provavelmente deve ser baseada na uniformização do produto em vez de na semelhança geométrica. Como o projeto do produto é considerado estável, o sistema pode ser elaborado com certo grau de especialização de processo para tornar as operações mais eficientes. Em vez de aplicadas ao uso geral, as máquinas podem ser projetadas para os processos específicos necessários para produzir a limitada família de peças, aumentando assim a taxa de produção do sistema. Em alguns casos, a sequência de máquinas é idêntica ou quase idêntica para todas as peças processadas, de modo que pode ser apropriada uma linha de transferência, em que as estações de trabalho possuem a flexibilidade necessária para processar as diferentes peças do *mix*. Na verdade, o termo *linha de transferência flexível* é muitas vezes utilizado para esse caso [15].

Um FMS de ordem aleatória é mais apropriado quando: a família de peças for grande; houver variações substanciais na configuração das peças; novos projetos de peça forem introduzidos no sistema e alterações de engenharia ocorrerem nas peças atualmente produzidas; e o programa de produção estiver sujeito a alterações de um dia para o outro. Para acomodar essas variações, o FMS de ordem aleatória precisa ser mais flexível do que o FMS dedicado. Ele é equipado com máquinas de uso geral para lidar com as variações do produto e é capaz de processar peças em várias sequências (ordem aleatória). Um sistema

1 Definimos a quantidade de quatro máquinas como a que separa um FMS de uma FMC. Entretanto, nem todos os profissionais concordam com essa definição; alguns podem preferir um valor mais alto, enquanto outros preferem um número menor. Além disso, a distinção entre a célula e o sistema parece aplicar-se apenas a sistemas flexíveis de manufatura que são automatizados. Os correspondentes com operadores desses sistemas, discutidos no capítulo anterior, são sempre referidos como células, independentemente de quantas estações de trabalho estão envolvidas.

Figura 19.2 Célula de máquina única que consiste de um centro de usinagem CNC e uma unidade de armazenamento de peças

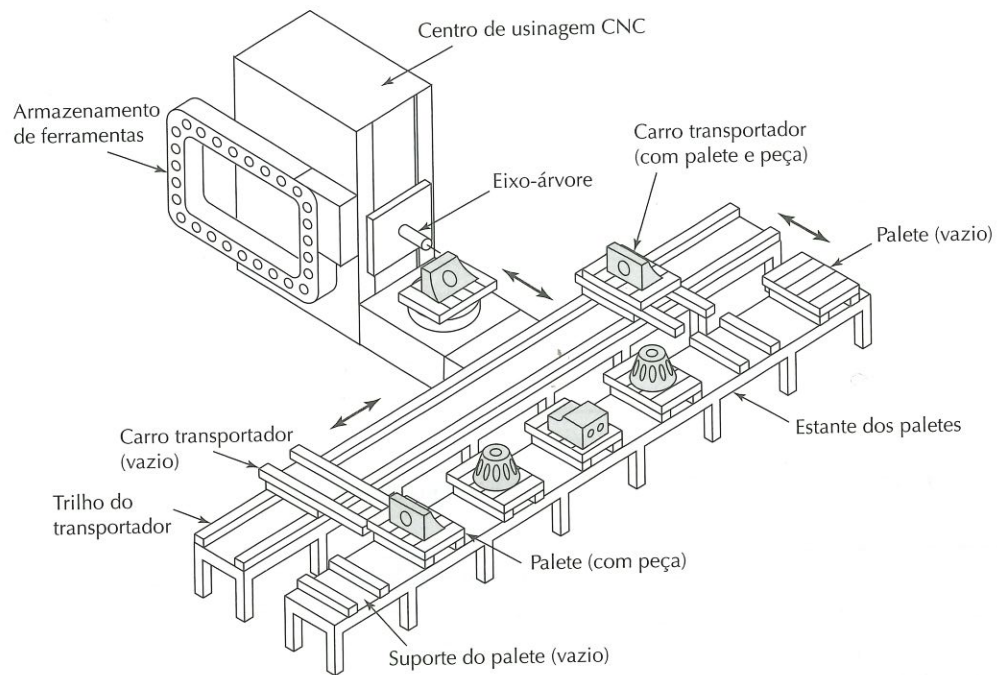


Figura 19.3 Célula flexível de manufatura que consiste de três estações de processamento idênticas (centros de usinagem CNC), uma estação de carga/descarga e um sistema de manuseio de peças

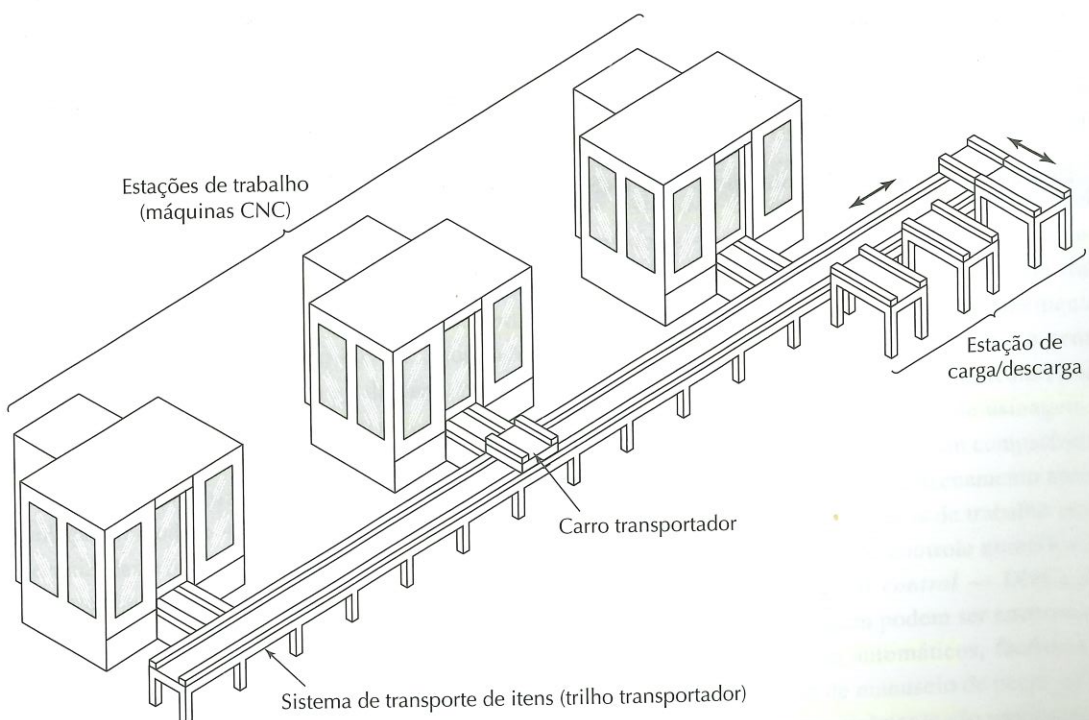


Figura 19.4 Características das três categorias de células e sistemas flexíveis

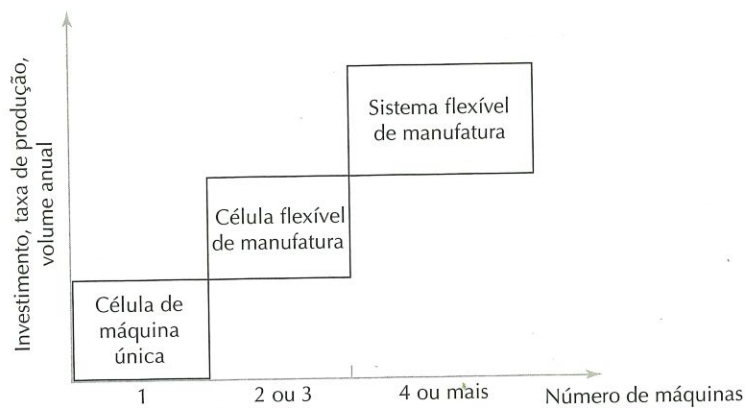


Tabela 19.1 Critérios de flexibilidade aplicados aos três tipos de sistemas e células de manufatura

Critérios de flexibilidade (Testes de flexibilidade)				
Tipo de sistema	1. Variedade de peças	2. Mudança de programa	3. Recuperação de erros	4. Novas peças
Célula de máquina única	Sim, mas o processamento é sequencial, não simultâneo.	Sim	Recuperação limitada por ter apenas uma máquina.	Sim
Célula flexível de manufatura (FMC)	Sim, produção simultânea de peças diferentes.	Sim	Recuperação de erros limitada por ter menos máquinas do que o FMS.	Sim
Sistema flexível de manufatura (FMS)	Sim, produção simultânea de peças diferentes.	Sim	Redundância de máquina minimiza o efeito das paralisações de máquina.	Sim

de controle computadorizado mais sofisticado é necessário para esse tipo de FMS.

Vemos nesses dois tipos de sistema a troca entre a flexibilidade e a produtividade. O FMS dedicado é menos

flexível, mas capaz de taxas de produção mais elevadas. O FMS de ordem aleatória é mais flexível, mas à custa de taxas de produção menores. A comparação desses dois tipos de FMS é apresentada na Figura 19.5. A Tabela 19.2

Figura 19.5 Comparação entre os tipos de FMS dedicado e de ordem aleatória

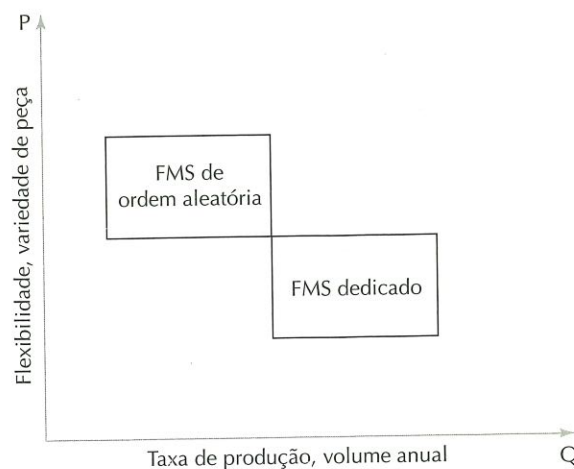


Tabela 19.2 Critérios de flexibilidade aplicados ao FMS dedicado e ao FMS de ordem aleatória

Tipo de sistema	Critérios de flexibilidade (Testes de flexibilidade)			
	1. Variedade de peças	2. Mudança de programa	3. Recuperação de erros	4. Novas peças
FMS dedicado	Limitada. Todas as peças conhecidas previamente.	Mudanças limitadas podem ser toleradas.	Limitada por processos sequenciais.	Não. Novas introduções de peça são difíceis.
FMS de ordem aleatória	Sim. Variações substanciais de peça são possíveis.	Mudanças frequentes e significantes são possíveis.	A redundância de máquinas minimiza o efeito das paralisações de máquina.	Sim. Sistema projetado para novas introduções de peça.

apresenta uma comparação entre o FMS dedicado e o FMS de ordem aleatória, em função dos quatro testes de flexibilidade.

19.2 COMPONENTES DO FMS

Como indicado em nossa definição, existem vários componentes básicos de um sistema flexível de manufatura: (1) estações de trabalho, (2) sistema de manuseio e armazenamento de material e (3) sistema de controle computadorizado. Além disso, embora um FMS seja altamente automatizado, (4) pessoas são necessárias para gerenciar e operar o sistema.

19.2.1 Estações de trabalho

O equipamento de processamento ou montagem usado em um sistema flexível de manufatura depende do tipo de trabalho realizado. Em um sistema projetado para operações de usinagem, os principais tipos de estações de processamento são as máquinas-ferramenta CNC. Entretanto, o conceito de FMS é aplicável também a outros processos. A seguir, apresentamos os tipos de estações de trabalho normalmente encontrados em um FMS.

Estações de carga/descarga. A estação de carga/descarga é a interface física entre o FMS e o resto da fábrica. É onde as peças de trabalho brutas entram e por onde as acabadas saem do sistema. A carga e a descarga podem ser realizadas manualmente (mais comum) ou por meio de sistemas de manuseio automatizados. A estação de carga/descarga deve ser ergonomicamente projetada para permitir a circulação cômoda e segura das peças de trabalho. Gruas mecanizadas e outros dispositivos de manuseio são instalados para ajudar o trabalhador com as peças que são pesadas demais para que ele suspenda manualmente. Certo nível de limpeza deve ser mantido no local de trabalho, e mangueiras de ar ou outras instalações de limpeza são frequentemente utilizadas para remover cavacos e garantir pontos de montagem e fixação limpos. A estação, muitas

vezes, é levantada ligeiramente acima do nível do chão usando uma plataforma do tipo estrado para permitir que cavacos e fluidos de corte caiam através das aberturas para posterior reciclagem ou eliminação.

A carga/descarga da estação inclui uma unidade de entrada de dados e um monitor para comunicação entre o operador e o sistema de computador. Por meio desse sistema, o operador recebe instruções sobre qual peça carregar no próximo paleta a fim de cumprir o programa de produção. Quando diferentes paletes são necessários para diferentes peças, o paleta correto deve ser fornecido para a estação. Quando uma fixação modular for empregada, a fixação correta deve ser especificada e as ferramentas e os componentes necessários devem estar disponíveis na estação de trabalho para construí-la. Quando o procedimento de carga de peça for concluído, o sistema de manuseio deve lançar o paleta no sistema, mas não antes disso; o sistema de manuseio precisa ser impedido de mover o paleta enquanto o operador ainda estiver trabalhando. Essas condições exigem a comunicação entre o computador e o operador na estação de carga/descarga.

Estações de usinagem. As aplicações mais comuns dos sistemas flexíveis de manufatura são as operações de usinagem. Portanto, as estações de trabalho utilizadas nesses sistemas são predominantemente máquinas-ferramenta CNC. O mais comum é o centro de usinagem CNC (Seção 14.3.3), em particular, o centro de usinagem horizontal. Os centros de usinagem CNC possuem características que os tornam compatíveis com o FMS, incluindo a troca e o armazenamento automáticos de ferramentas, o uso de peças de trabalho em paletes, CNC e capacidade para o controle numérico direto (do inglês, *direct numerical control* — DNC) (Seção 7.3). Os centros de usinagem podem ser encomendados com trocadores de paleta automáticos, facilmente conectados com o sistema de manuseio de peças do FMS. Os centros de usinagem geralmente são usados para peças não rotativas. Para as peças rotativas, os centros de

torneamento são utilizados; e para as peças que são basicamente rotativas, mas exigem ferramentas rotativas com múltiplos gumes de corte (fresamento e furação), os centros de fresamento-torneamento (do inglês, *mill-turn*) podem ser usados. Esses tipos de equipamentos são descritos na Seção 14.3.3.

Em alguns sistemas de usinagem, os tipos de operações realizadas são concentrados em determinada categoria, como fresamento ou torneamento. Para fresamento, podem ser usados módulos de fresamento especiais obtendo níveis de produção mais altos do que um centro de usinagem pode atingir. O módulo de fresamento pode ser de eixo-árvore vertical, horizontal ou com múltiplos eixos-árvores. Para operações de torneamento, módulos de torneamento especiais podem ser projetados para o FMS. No torneamento convencional, a peça de trabalho é girada contra uma ferramenta fixada na máquina e movimentada em direção paralela ao eixo de rotação de trabalho. As peças fabricadas na maioria dos FMSs são prismáticas, mas podem exigir algum torneamento em sua sequência de processos. Para esses casos, as peças são mantidas em uma fixação de paletes por todo o processamento no FMS, e um módulo de torneamento é projetado para girar a ferramenta com um gume de corte em torno da peça.

Outras estações de processamento. O conceito do sistema flexível de manufatura tem sido aplicado a outras operações de processamento além da usinagem. Uma dessas aplicações é a fabricação que usa chapas metálicas, descrita em Winship [34]. As estações de processamento consistem de operações de prensagem, como furação, corte e certos processos de dobra e conformação. Além disso, sistemas flexíveis têm sido desenvolvidos para automatizar o processo de forjamento [32], tradicionalmente uma operação que exige muito trabalho. As estações de trabalho no sistema consistem principalmente de um forno de aquecimento, uma prensa de forjamento e uma estação de corte.

Montagem. Alguns sistemas flexíveis de manufatura são projetados para executar operações de montagem. Os sistemas flexíveis de montagem automatizados estão gradualmente substituindo o trabalho manual na montagem de produtos feita em lotes. Robôs industriais muitas vezes são usados como estações de trabalho automatizadas nesses sistemas flexíveis de montagem. Eles podem ser programados para executar tarefas com variações no padrão de sequência e no movimento para acomodar os diferentes tipos de produtos montados no sistema. Outros exemplos de estações de trabalho de montagem flexíveis são as máquinas de posicionamento

de componente programáveis amplamente utilizadas na montagem eletrônica.

Outras estações e equipamentos. A inspeção pode ser incorporada em um sistema flexível de manufatura, quer pela inclusão de uma operação de inspeção em uma estação de processamento, quer pela inclusão de uma estação projetada especificamente para inspeção. As máquinas de medição de coordenadas (Seção 22.4), as sondas de inspeção especial que podem ser usadas em um eixo de um máquina-ferramenta (Seção 22.4.5) e a visão de máquina (Seção 22.6) são três possíveis tecnologias para realizar inspeção em um FMS. A inspeção é especialmente importante nos sistemas flexíveis de montagem para garantir que os componentes sejam corretamente adicionados às estações de trabalho. Examinamos o assunto inspeção automatizada com mais detalhes no Capítulo 21.

Além das citadas acima, outras operações e funções são frequentemente realizadas em um sistema flexível de manufatura. Elas incluem a limpeza de peças e/ou fixações em paletes, os sistemas centrais de fornecimento de refrigeração para o FMS inteiro e os sistemas centralizados de remoção de cavacos normalmente instalados abaixo do nível do solo.

19.2.2 Sistema de manuseio e armazenamento de material

O segundo componente importante de um FMS é o sistema de manuseio e armazenamento de material. Nesta seção, discutiremos as funções do sistema de manuseio, os equipamentos de manuseio de material normalmente utilizados em um FMS e os tipos de layout de FMS.

Funções do sistema de manuseio. O manuseio e armazenamento de material em um sistema flexível de manufatura desempenha as seguintes funções:

- **Possibilitar o deslocamento aleatório e independente de peças de trabalho entre as estações.** As peças precisam ser capazes de se mover de qualquer máquina no sistema para qualquer outra máquina, a fim de fornecer alternativas de encaminhamento para diferentes peças e fazer substituições de máquinas quando estações estiverem ocupadas.
- **Permitir o manuseio de várias configurações de peça de trabalho.** Para peças prismáticas (não rotativas), isso normalmente é feito usando dispositivos modulares de fixação em paleta no sistema de manuseio. O dispositivo de fixação é localizado na face superior do paleta e é projetado para acomodar diferentes configurações

rações da peça por meio de componentes comuns, recursos de troca rápida e outros dispositivos que permitam um rápido ajuste da fixação para uma determinada peça. A base do palete é projetada para o sistema de manuseio de material. Para peças rotativas, robôs industriais normalmente são utilizados para carregar e descarregar as máquinas de torneamento e para mover as peças entre as estações.

- **Fornecer armazenamento temporário.** O número de peças no FMS normalmente excede o de peças efetivamente sendo processadas em qualquer dado momento. Assim, cada estação possui uma pequena fila de peças, ou talvez uma única peça, esperando para ser processada, o que ajuda a manter a alta utilização das máquinas.
- **Fornecer acesso conveniente para carregar e descarregar peças de trabalho.** O sistema de manuseio precisa incluir locais para estações de carga/descarga.
- **Criar compatibilidade com o controle computadorizado.** O sistema de manuseio deve estar sob controle direto do sistema de computador, que o direciona para as diversas estações de trabalho, estações de carga/descarga e áreas de armazenamento.

Equipamento de manuseio de material. Os tipos de sistemas de manuseio de material usados para transferir peças entre as estações em um FMS incluem uma variedade de equipamentos convencionais de transporte de material (Capítulo 10), mecanismos de transferência em linha (Seção 16.1.2) e robôs industriais (Capítulo 8). A função de manuseio de material em um FMS normalmente é compartilhada entre dois sistemas: (1) um sistema primário de manuseio e (2) um sistema secundário de manuseio. O sistema primário de manuseio

estabelece o *layout* básico do FMS e é responsável pela movimentação das peças entre as estações do sistema. Os *layouts* de FMSs são discutidos adiante.

O sistema secundário de manuseio é constituído de dispositivos de transferência, trocadores automáticos de paletes e mecanismos semelhantes localizados nas estações de trabalho do FMS. A função do sistema secundário de manuseio é transferir trabalho do sistema primário para a máquina-ferramenta ou outra estação de manuseio e posicionar as peças com precisão e repetitividade suficientes para executar a operação de processamento ou montagem. Outras finalidades atendidas pelo sistema secundário de manuseio incluem (1) a reorientação da peça, se necessário, para apresentar a superfície que deverá ser processada e (2) o armazenamento de peças em *buffer* para minimizar o tempo de mudança e maximizar a utilização da estação. Em algumas instalações de FMS, as necessidades de posicionamento e registro nas estações de trabalho individuais são satisfeitas pelo sistema primário de manuseio. Nesses casos, não há sistema secundário de manuseio.

Configurações de layout de FMS. O sistema de manuseio de material define o *layout* da FMS. A maioria das configurações de *layout* encontradas nos sistemas flexíveis de manufatura pode ser classificada em cinco categorias: (1) *layout* em linha, (2) *layout* circular (ou em *loop*), (3) *layout* em escada, (4) *layout* em campo aberto e (5) célula centralizada em robô. Os tipos de equipamentos de manuseio de material utilizados nesses cinco *layouts* estão resumidos na Tabela 19.3.

No *layout* em linha (do inglês, *in-line layout*), as máquinas e o sistema de manuseio são dispostos em linha reta. Em sua forma mais simples, as peças seguem de uma estação de trabalho para a próxima em uma sequência bem definida, com o item trabalhado sempre se movendo na

Tabela 19.3 Equipamento normalmente usado como sistema primário de manuseio para os cinco *layouts* de FMS

Configuração de <i>layout</i>	Sistema de manuseio de material típico
<i>Layout</i> em linha	Sistema de transferência linear (Seção 16.1.2) Sistema transportador (Seção 10.2.4) Sistema de veículo guiado por trilho (Seção 10.2.3)
<i>Layout</i> circular	Sistema transportador (Seção 10.2.4) Carros reboque terrestres (Seção 10.2.4)
<i>Layout</i> em escada	Sistema transportador (Seção 10.2.4) Sistema de veículo guiado automaticamente (Seção 10.2.2) Sistema de veículo guiado por trilho (Seção 10.2.3)
<i>Layout</i> em campo aberto	Sistema de veículo guiado automaticamente (Seção 10.2.2) Carros reboque terrestres (Seção 10.2.4)
<i>Layout</i> centralizado em robô	Robô industrial (Capítulo 8)

mesma direção e sem fluxo de retorno, como na Figura 19.6(a). O funcionamento desse tipo de sistema é semelhante a uma linha de transferência (Capítulo 16), exceto no caso em que diversas peças são processadas no sistema. Para os sistemas em linha que exigem maior flexibilidade de roteamento, pode ser instalado um sistema de transferência linear que permita o deslocamento nas duas direções. Um possível arranjo para isso é mostrado na Figura 19.6(b), na qual um sistema secundário de manuseio é fornecido em cada estação de trabalho para separar a maioria das peças da linha principal.

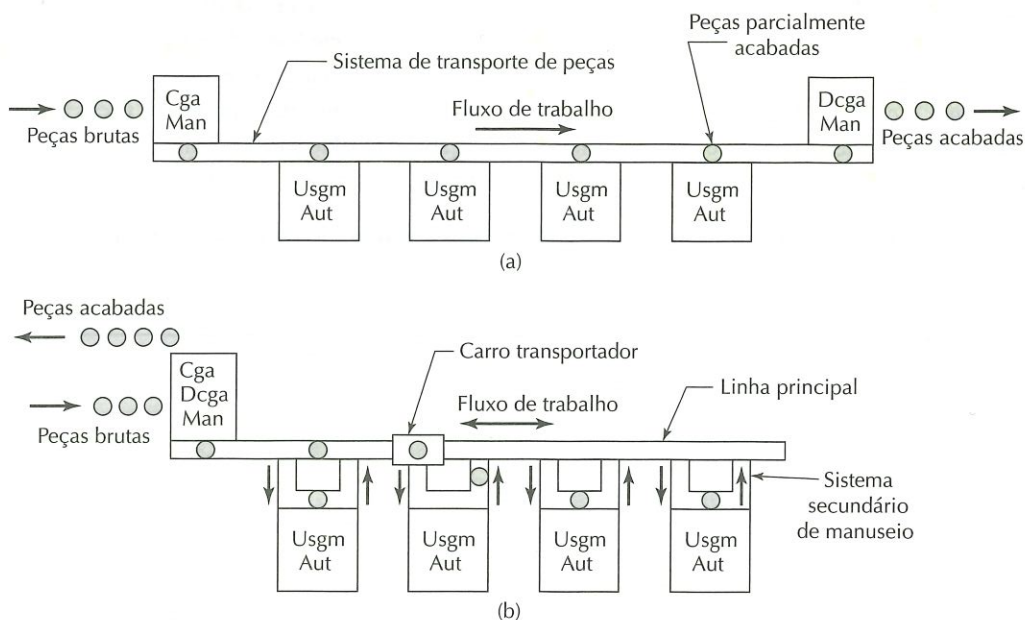
No *layout circular* (do inglês, *loop layout*), as estações de trabalho são organizadas em um *loop* servido por um sistema de manuseio de peças na mesma forma, como mostra a Figura 19.7(a). As peças geralmente fluem em uma única direção, com a capacidade de parar e ser transferidas para qualquer estação. Um sistema secundário de manuseio é mostrado em cada estação de trabalho para permitir que as peças se desloquem sem obstrução em torno do *loop*. A estação ou as estações de carga/descarga normalmente são localizadas em uma extremidade do ciclo. Uma forma alternativa ao *layout circular* é o *layout retangular*. Como mostra a Figura 19.7(b), esse arranjo pode ser usado para retornar paletes à posição inicial em um arranjo de máquina em linha reta.

O *layout em escada* (do inglês, *ladder layout*) consiste de um ciclo retangular com degraus entre as seções retas do ciclo, no qual estações de trabalho são localizadas, como mostra a Figura 19.8. Os degraus aumentam o número de maneiras possíveis para se passar de uma máquina para outra e evitam a necessidade de um sistema secundário de manuseio. Isso reduz a distância média de movimentação e minimiza o congestionamento no sistema de manuseio, reduzindo o tempo de transporte entre as estações.

O *layout em campo aberto* (do inglês, *open field layout*) consiste de múltiplas *loops* e escadas e pode incluir ramais, conforme ilustrado na Figura 19.9. Esse tipo de *layout* em geral é apropriado para o processamento de uma grande família de peças. O número de tipos diferentes de máquina pode ser limitado e as peças são roteadas para estações de trabalho diferentes, dependendo de qual estiver disponível primeiro.

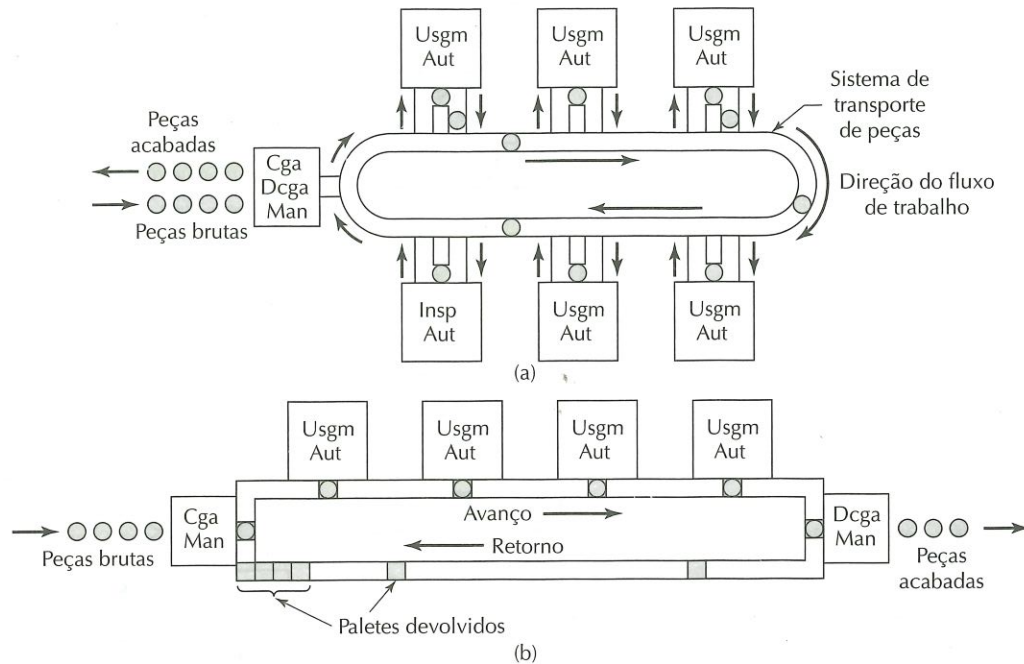
O *layout centralizado em robô* (do inglês, *robot-centered layout*) (Figura 19.1) usa um ou mais robôs como o sistema de manuseio de material. Os robôs industriais podem ser equipados com garras que os tornam bem adaptados para o manuseio de peças rotativas, e os *layouts* de FMS centralizados em robô normalmente são usados para processar peças cilíndricas ou discoidais.

Figura 19.6 Layouts em linha do FMS: (a) fluxo unidirecional semelhante a uma linha de transferência, (b) sistema de transferência linear com sistema secundário de manuseio de peças em cada estação para facilitar o fluxo nas duas direções



Legenda: Cga = estação de carga de peças; Dcga = estação de descarga de peças; Usgm = estação de usinagem; Man = estação manual; Aut = estação automatizada

Figura 19.7 (a) *Layout* circular do FMS, com sistema secundário de manuseio de peças em cada estação para permitir fluxo desobstruído no transportador principal e (b) *layout* retangular para recirculação dos paletes para a primeira estação de trabalho da sequência



Legenda: Cga = estação de carga de peças; Dcga = estação de descarga de peças; Usgm = estação de usinagem; Man = estação manual; Aut = estação automatizada; Insp = estação de inspeção

Figura 19.8 *Layout* em escada do FMS

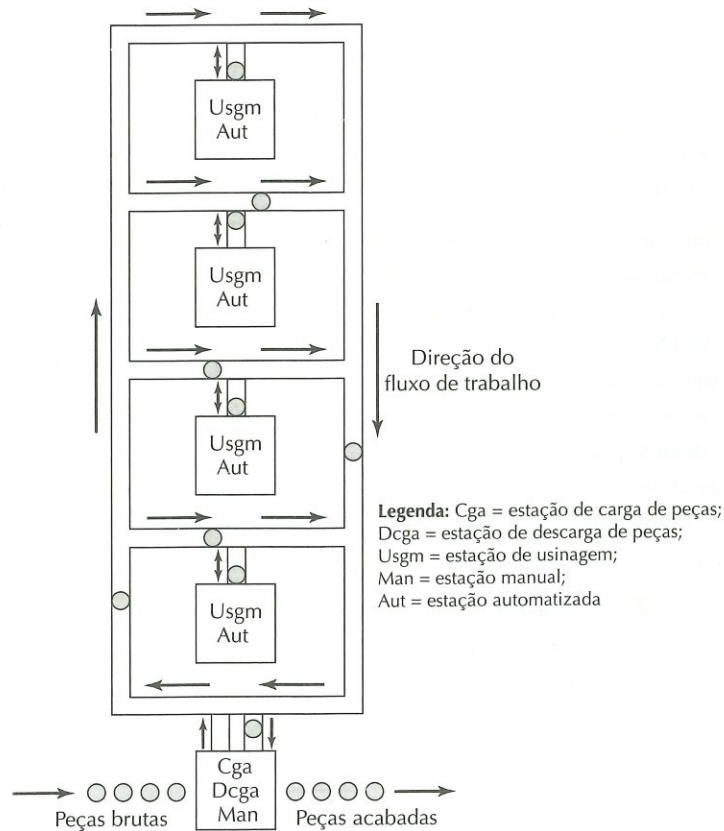
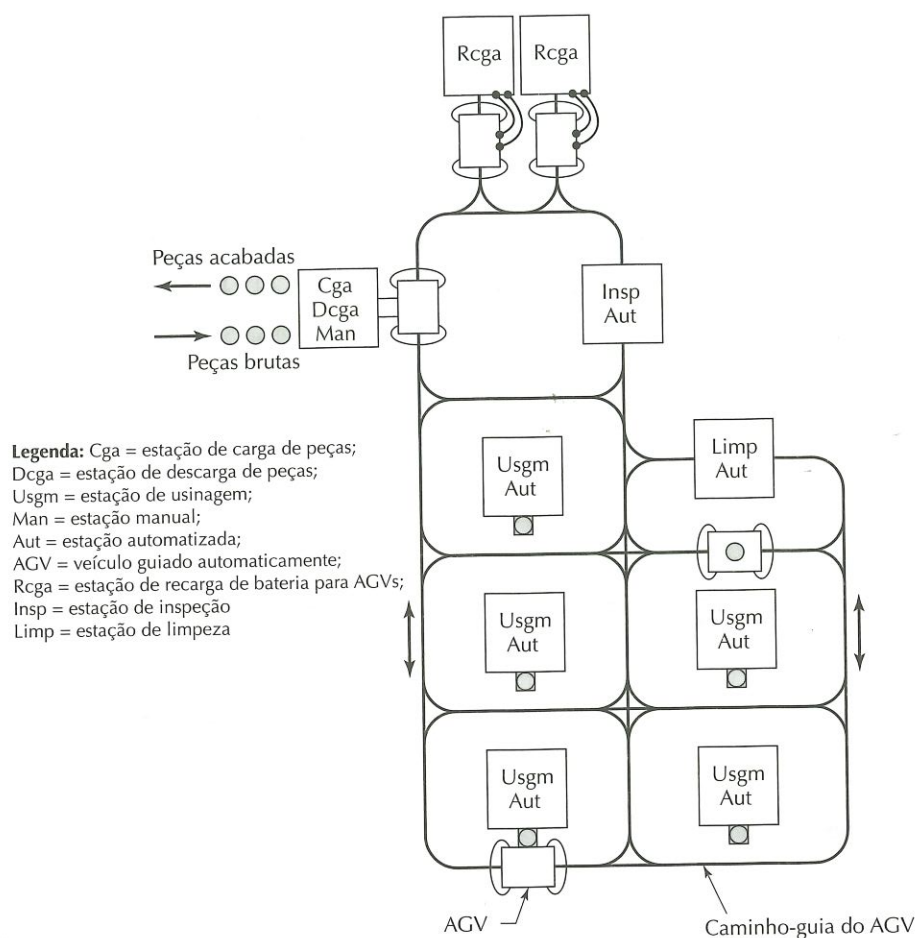


Figura 19.9 Layout em campo aberto do FMS



19.2.3 Sistema de controle computadorizado

O FMS inclui um sistema de computação distribuído que é ligado às estações de trabalho, ao sistema de manuseio de material e a outros componentes de hardware. Um sistema de computador de FMS típico consiste de um computador central e de microcomputadores controlando diversas máquinas e outros componentes. O computador central coordena as atividades dos componentes para obter um bom funcionamento geral do sistema. As funções desempenhadas pelo sistema de controle computadorizado do FMS podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

1. **Controle de estação de trabalho.** Em um FMS totalmente automatizado, cada uma das estações de processamento ou montagem normalmente opera sob algum modo de controle computadorizado. O CNC controla as máquinas-ferramenta individuais em um sistema de usinagem.
2. **Distribuição de instruções de controle para as estações de trabalho.** Algum modo de inteligência central é neces-

sário para coordenar o processamento nas estações individuais. Em um FMS de usinagem, programas de peças precisam ser transferidos para as máquinas, e o DNC é usado para essa finalidade. O sistema DNC armazena os programas, permite o envio de novos programas e a edição de programas existentes conforme o necessário, além de realizar outras funções de DNC (Seção 7.3).

3. **Controle de produção.** A composição e a velocidade em que as várias peças são lançadas no sistema precisam ser controladas. Os dados de entrada necessários para o controle de produção incluem as taxas de produção diária desejadas por peça, o número de peças brutas disponíveis e o número de paletes aplicáveis.² A função de controle de produção é realizada pelo roteamento de um palete aplicável para a área de carga/descarga e pelo fornecimento de instruções ao operador para carregar a peça de trabalho desejada.

² O termo 'palete aplicável' se refere a uma palete que é adaptada para aceitar uma peça de trabalho de determinado tipo.

4. **Controle de tráfego.** Isso se refere ao gerenciamento do sistema primário de manuseio de material que movimentam as peças entre as estações. O controle de tráfego é realizado acionando chaves em ramais e pontos de convergência, parando peças nos locais de transferência da máquina-ferramenta e movendo paletes para estações de carga/descarga.
 5. **Controle do carro transportador.** Essa função de controle é responsável pela operação e pelo controle do sistema secundário de manuseio em cada estação de trabalho. Cada carro transportador precisa estar coordenado com o sistema primário de manuseio e sincronizado com a operação da máquina-ferramenta que ele serve.
 6. **Monitoramento de peças.** O computador precisa monitorar o estado de cada carro e/ou palete nos sistemas secundários de manuseio, bem como o estado de cada um dos vários tipos de peças.
 7. **Controle de ferramentas.** O controle das ferramentas se incumbe do gerenciamento de dois aspectos das ferramentas de corte:
 - **Local da ferramenta.** Isso envolve o controle das ferramentas de corte em cada estação de trabalho. Se alguma ferramenta necessária para processar determinada peça não estiver presente na estação que está especificada no roteamento da peça, o subsistema de controle de ferramenta toma uma ou ambas das seguintes ações: (a) determina se uma estação de trabalho alternativa que possui a ferramenta necessária está disponível e/ou (b) notifica o operador responsável pelo ferramental no sistema que a unidade de armazenamento de ferramenta na estação precisa ser carregada com a ferramenta ou as ferramentas necessárias.
 - **Monitoramento da vida da ferramenta de corte.** Nesse aspecto do controle de ferramenta, para cada uma delas no FMS, um tempo de vida é especificado para o computador. Um registro do uso do tempo de usinagem é mantido para as ferramentas e, quando o tempo de usinagem cumulativo atinge a duração especificada, o computador notifica o operador que uma substituição é necessária.
 8. **Monitoramento e relatório de desempenho.** O sistema de controle computadorizado é programado para coletar dados sobre a operação e o desempenho do sistema flexível de manufatura. Os dados são periodicamente resumidos e relatórios sobre o desempenho do sistema são preparados para a gerência, alguns indicando o desempenho do FMS são listados na Tabela 19.4.
 9. **Diagnóstico.** Função disponível, em maior ou menor grau, em muitos sistemas de manufatura para indicar a provável origem do problema quando ocorre um funcionamento anormal. Também pode ser usado para planejar manutenção preventiva no sistema e para identificar falhas iminentes. A finalidade da função de diagnóstico é reduzir paralisações e inatividades e aumentar a disponibilidade do sistema.
- Um FMS possui características arquiteturais de um sistema de controle numérico distribuído (DNC). Como em outros sistemas DNC, a comunicação bidirecional é utilizada. Os dados e comandos são enviados do computador central para as máquinas e outros componentes de hardware, e dos dados sobre a execução e o desempenho são transmitidos dos componentes de volta para o computador central. Além disso, é fornecido um link do FMS para o computador host corporativo.

Tabela 19.4 Relatórios de desempenho típicos do FMS

Tipo de relatório	Descrição
Disponibilidade	Resumo da proporção de atividade (estabilidade) das estações de trabalho. Detalhes como as razões para a inatividade são incluídos para identificar áreas de problema recorrente.
Utilização	Resumo da utilização de cada estação de trabalho, bem como a utilização média do FMS para períodos especificados (dias, semanas, meses).
Produção	Quantidades diárias e semanais de diferentes peças produzidas pelo FMS. Comparação das quantidades reais com o programa de produção.
Ferramentaria	Informações sobre vários aspectos do controle de ferramenta, como uma listagem das ferramentas em cada estação de trabalho e o estado das ferramentas.
Status	Uma "fotografia" da condição atual do FMS. A supervisão da linha pode requisitar esse relatório a qualquer hora para conhecer o estado atual dos parâmetros operacionais do sistema (por exemplo, áreas problemáticas, utilização, disponibilidade, contagem cumulativa de peças e ferramentaria).

19.2.4 Recursos humanos

Outro componente no FMS é o trabalho humano, necessário para gerenciar as operações do sistema. As funções normalmente realizadas por humanos incluem (1) carregar peças de trabalho brutas, (2) descarregar peças acabadas (ou montagens), (3) trocar e preparar ferramentas, (4) realizar manutenção e reparo de equipamentos, (5) realizar programação de peças NC, (6) programar e operar o sistema de computador e (7) gerenciá-lo.

19.3 APLICAÇÕES E VANTAGENS DO FMS

Nesta seção, trataremos das aplicações dos sistemas flexíveis de manufatura e de suas vantagens.

19.3.1 Aplicações do FMS

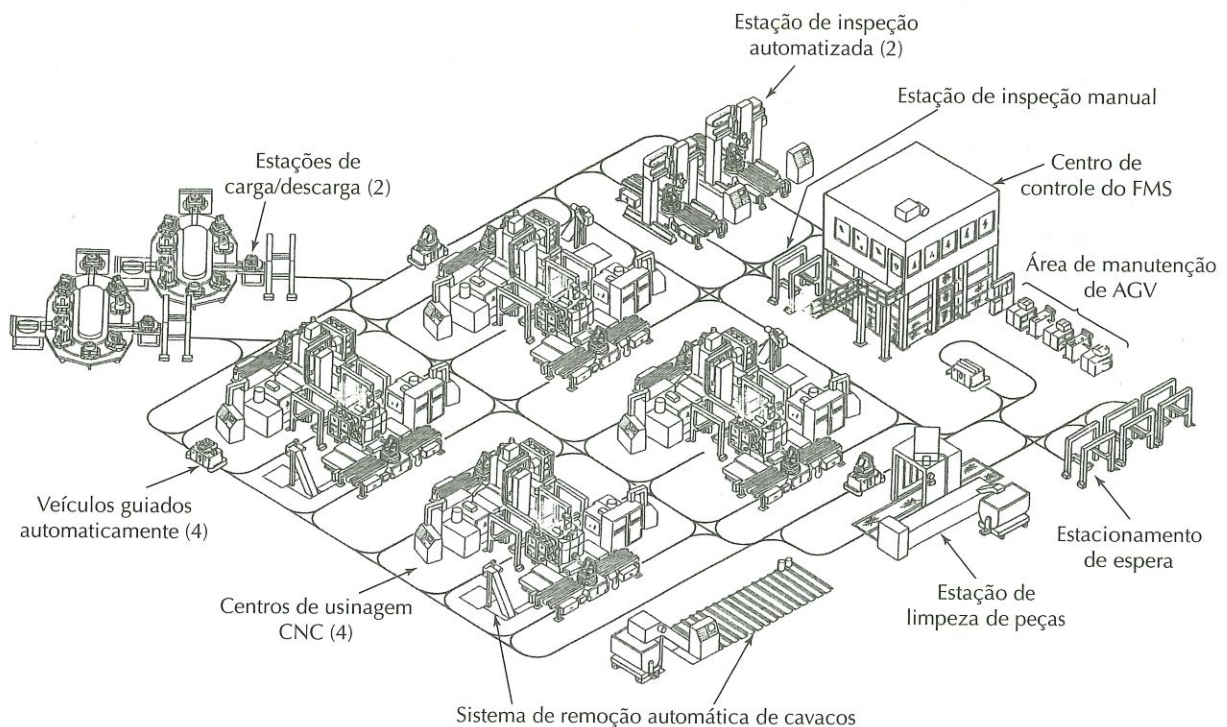
A automação flexível é aplicável a uma variedade de operações de manufatura. Embora a tecnologia FMS seja mais aplicada em operações de usinagem, é utilizada em outras aplicações, como prensagem de chapas de metal, forjamento e montagem. Nesta seção, examinaremos algumas aplicações utilizando estudos de caso como exemplos.

Sistemas de usinagem flexíveis. Historicamente, a maioria das aplicações de sistemas flexíveis de usinagem

tem sido feita em operações de fresamento e furação (peças prismáticas), usando centros de usinagem CNC. As aplicações de FMS para torneamento (peças rotacionais) eram muito menos comuns até recentemente, e os sistemas que estão instalados costumam consistir de menos máquinas. Por exemplo, as células de máquina única constituídas por unidades de armazenamento de peças, os robôs de carga de peças e os centros de torneamento CNC são hoje amplamente utilizados, embora nem sempre de modo flexível. Abordaremos algumas questões por trás dessa anomalia no desenvolvimento dos sistemas de usinagem flexíveis.

Ao contrário das peças rotacionais, as peças prismáticas normalmente são pesadas para um operador humano carregar com facilidade e rapidez na máquina-ferramenta. Assim, foram desenvolvidas fixações em paletes para que essas peças pudessem ser carregadas no palete off-line (que não está posicionado para trabalho) por meio de guindastes e então a peça sobre o palete pudesse ser movida para a posição em frente ao eixo-árvore da máquina-ferramenta. As peças prismáticas também costumam ser mais caras do que as peças rotacionais, e os prazos de fabricação tendem a ser mais longos. Esses fatores oferecem um forte incentivo para produzi-las da maneira mais eficiente possível, utilizando tecnologias avançadas como os FMSs. Por essas razões, a tecnologia atual para aplicações de fresamento e perfuração de FMS é mais madura do que para aplicações de torneamento de FMS.

Figura 19.10 O FMS na Vought Aircraft (o desenho é cortesia da Cincinnati Milacron)



EXEMPLO 19.1**FMS da Vought Aerospace**

Um sistema flexível de manufatura instalado na Vought Aerospace, em Dallas, Texas, pela Cincinnati Milacron, é mostrado na Figura 19.10. O sistema é usado para usinar cerca de 600 componentes diferentes para aviões. O FMS é composto por oito centros de usinagem CNC horizontais, além de módulos de inspeção. O manuseio de peças é realizado por um sistema de quatro veículos guiados automaticamente. A carga e descarga do sistema são feitas em duas estações, que consistem de carrosséis de armazenamento que permitem que as peças sejam armazenadas em paletes para posterior transferência às estações de usinagem pelo AGVs. O sistema é capaz de processar uma sequência de peças individuais, uma de cada tipo, de modo contínuo, assim um conjunto completo de componentes para uma aeronave pode ser fabricado de maneira eficiente, sem lotes.

Outras aplicações de FMS. Prensagem e forjamento são outros dois processos de manufatura para os quais estão sendo feitos esforços para se desenvolver sistemas flexíveis de manufatura. As tecnologias de FMS en-

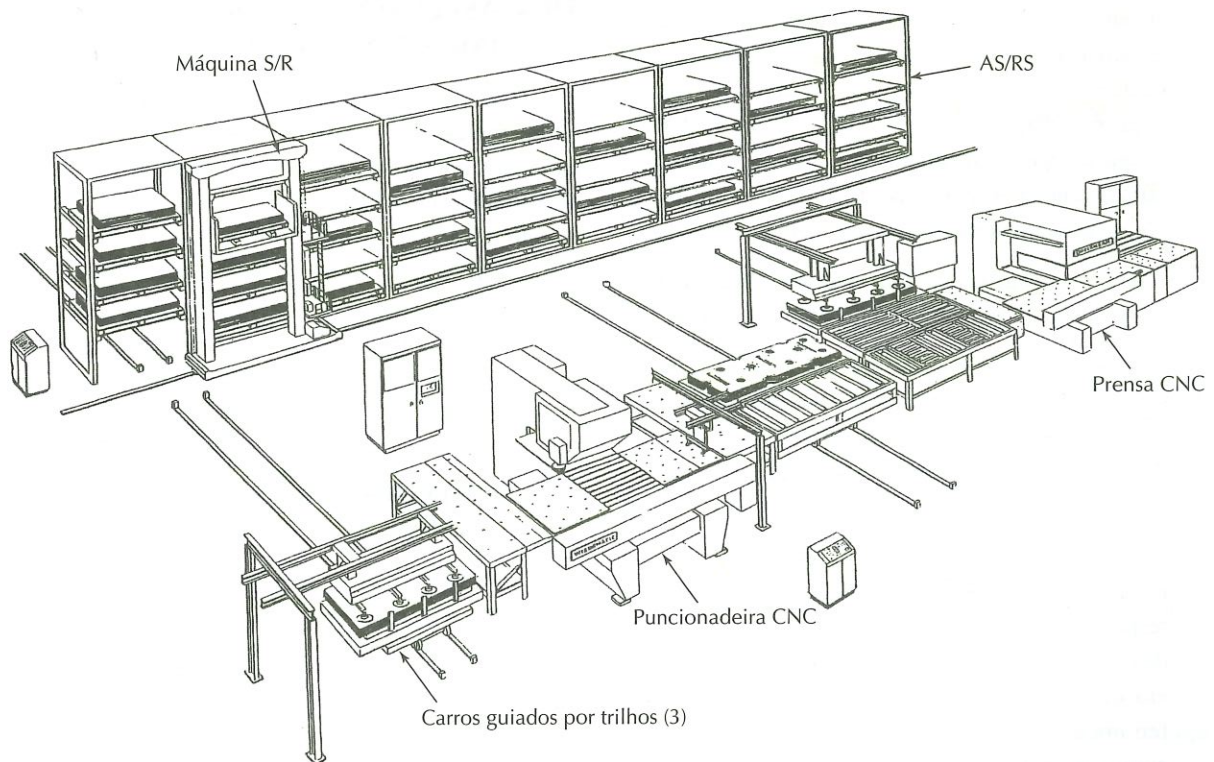
volvidas são descritas em Vaccari [32] e Winship [34]. O exemplo a seguir ilustra os esforços de desenvolvimento na área de prensagem.

EXEMPLO 19.2**Sistema flexível de fabricação**

O termo *sistema flexível de fabricação* (do inglês, *flexible fabricating system* — FFS) normalmente é usado em associação aos sistemas que realizam operações de prensagem em chapas de metal. O conceito de FFS de Wiedemann é ilustrado na Figura 19.11. O sistema é projetado para descarregar chapas de metal armazenadas no sistema de armazenamento/recuperação automatizado (AS/RS), mover o material com carro guiado por trilho até as operações de punção CNC e, depois, mover as peças acabadas de volta para o AS/RS, tudo sob controle computadorizado.

Os conceitos da automação flexível podem ser aplicados às operações de montagem. Embora alguns exemplos tenham incluído robôs industriais para realizar as tarefas de montagem, o próximo exemplo ilustra um sistema de montagem flexível que faz uso mínimo de robôs industriais.

Figura 19.11 Sistema flexível de fabricação para o processamento de chapas metálicas (baseado no esboço providenciado como cortesia pela Wiedemann Division, Cross & Trecker Company)



EXEMPLO 19.3**FMS de montagem na Allen-Bradley**

Um FMS para montagem instalado pela Allen-Bradley Company é relatado por Waterbury [33]. A 'linha de montagem automatizada flexível' produz 125 modelos de motores de arranque. A linha ostenta um prazo de manufatura de um dia em lotes de tamanho tão pequeno quanto um lote unitário e taxas de produção de 600 unidades por hora. O sistema consiste de 26 estações de trabalho que realizam toda a montagem, a submontagem, o teste e o empacotamento. As estações são máquinas de indexação linear e giratória, com robôs *pick-and-place* realizando certas funções de manuseio entre as máquinas. Cada etapa no processo utiliza teste cem por cento automatizado para garantir níveis de qualidade extremamente altos. A linha flexível de montagem é controlada por um sistema de controladores lógicos programáveis da Allen-Bradley.

19.3.2 Vantagens do FMS

Vários benefícios podem ser esperados com as aplicações de FMS bem-sucedidas. As principais vantagens são as seguintes:

- **Maior utilização das máquinas.** Os sistemas flexíveis de manufatura atingem uma maior média de utilização do que as máquinas em uma instalação de produção em lote convencional. As razões para isso incluem (1) funcionamento 24 horas por dia, (2) troca automática das ferramentas das máquinas-ferramenta, (3) troca automática de paletes nas estações de trabalho, (4) filas de peças nas estações e (5) programa de produção dinâmico que compensa irregularidades. É possível atingir de 80 por cento a 90 por cento de utilização de recursos por meio da implementação da tecnologia FMS [19].
- **Menos máquinas necessárias.** Devido à maior utilização de máquina, menos máquinas são necessárias.
- **Redução do espaço necessário no chão de fábrica.** Comparado a uma instalação de capacidade equivalente, um FMS normalmente exige menos área de chão. As reduções das necessidades de espaço de chão são estimadas entre 40 por cento e 50 por cento [19].
- **Maior capacidade de resposta a mudanças.** Um sistema flexível de manufatura melhora a capacidade de resposta a alterações de projeto das peças, introdução de novas peças, mudanças no programa de produção e mix de produtos, paralisações de máquinas e falhas de ferramentas de corte. Podem ser feitos ajustes no programa de produção de um dia para o outro em resposta a pedidos urgentes e solicitações especiais de clientes.
- **Necessidades reduzidas de estoque.** Como peças diferentes são processadas juntas, em vez de separadas em lotes, o trabalho em processo é menor do que em um modelo de produção em lote. O estoque de peças iniciais e acabadas também pode ser reduzido, em geral, entre 60 por cento e 80 por cento [19].
- **Prazos de manufatura menores.** Intimamente relacionado ao trabalho em processo reduzido está o tempo gasto em processo pelas peças. Isso significa entregas mais rápidas ao cliente.
- **Menor necessidade de trabalho direto e maior produtividade de trabalho.** As taxas de produção mais altas e a menor dependência do trabalho direto significam maior produtividade por hora de trabalho com um FMS do que com métodos de produção convencionais. Um FMS pode resultar em economias de trabalho da ordem de 30 por cento a 50 por cento [19].
- **Oportunidade para produção autônoma.** O alto nível de automação em um sistema flexível de manufatura permite que opere por períodos extensos de tempo sem assistência humana. No cenário mais otimista, peças e ferramentas são carregadas no sistema no fim do dia, o FMS continua funcionando durante toda a noite e as peças acabadas são descarregadas na manhã seguinte.

19.4 ASPECTOS DE PLANEJAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO FMS

A implementação de um sistema flexível de manufatura representa grande investimento e empenho por parte da empresa usuária. É importante que a instalação do sistema seja precedida de cuidadoso planejamento e projeto e que sua operação seja caracterizada por uma boa gestão de todos os recursos: máquinas, ferramentas, paletes, peças e pessoas. Nossa discussão sobre essas questões é organizada da seguinte maneira: (1) Aspectos de planejamento e projeto do FMS e (2) aspectos operacionais do FMS.

19.4.1 Aspectos de planejamento e projeto do FMS

A fase inicial do planejamento do FMS precisa considerar as peças que serão produzidas pelo sistema. Os aspectos são semelhantes aos da manufatura celular. Eles incluem:

- **Considerações sobre famílias de peças.** Qualquer sistema flexível de manufatura precisa ser projetado para processar uma faixa limitada de tipos de peças ou pro-

duto. Os limites da faixa precisam ser decididos. Na verdade, a família de peças que será processada no FMS é que precisa ser definida. Essa definição pode ser baseada na comunalidade do produto ou na similaridade das peças. O termo *comunalidade de produto* se refere a diferentes componentes usados no mesmo produto. Muitas instalações de FMS bem-sucedidas são projetadas para acomodar famílias de peças definidas por esse critério, o que permite que todos os componentes necessários para montar determinada unidade de um produto sejam concluídos imediatamente antes do início da montagem.

- *Necessidades de processamento.* Os tipos de peças e suas necessidades de processamento determinam os tipos de equipamento de processamento usados no sistema. Nas aplicações de usinagem, as peças prismáticas são produzidas por centros de usinagem, fresadoras e máquinas-ferramenta semelhantes; as peças rotacionais são usinadas por centros de torneamento e equipamentos semelhantes.
- *Características físicas das peças.* O tamanho e o peso das peças determinam o tamanho das máquinas nas estações de trabalho e o tamanho do sistema de manuseio de material que precisa ser usado.
- *Volume de produção.* As quantidades produzidas pelo sistema determinam quantas máquinas de cada tipo serão necessárias. O volume de produção também é um importante fator na escolha do tipo mais apropriado de equipamento de manuseio de material para o sistema.

Depois que a família de peças, os volumes de produção e as características de peça semelhantes forem decididas, o projeto do sistema pode ter prosseguimento. Importantes fatores que precisam ser especificados no projeto de um FMS incluem:

- *Tipos de estações de trabalho.* Os tipos das máquinas são determinados pelas necessidades de processamento das peças. As considerações sobre as estações de trabalho também precisam incluir a estação ou as estações de carga/descarga.
- *Variações nos roteamentos de processo e layout do FMS.* Se as variações na sequência de processo forem mínimas, o fluxo em linha será mais apropriado. Para um sistema com alta variedade de produto, o circular é mais adequado. Se houver significativa variação no processamento, o layout em escada ou de campo aberto será mais apropriado.
- *Sistema de manuseio de material.* As escolhas do equipamento e do layout do manuseio de material estão

intimamente relacionadas, já que o tipo de sistema de manuseio limita a escolha do layout. O sistema de manuseio de material inclui os sistemas primário e secundário de manuseio (Seção 19.2.2).

- *Trabalho em processo e capacidade de armazenamento.* O nível de trabalho em processo (do inglês, *work-in-process* — WIP) permitido no FMS é uma importante variável na determinação da utilização e eficiência do FMS. Se o nível de WIP for muito baixo, as estações podem se tornar ociosas, causando utilização reduzida. Se for muito alto, pode ocorrer congestionamento. O nível de WIP deve ser planejado, não apenas permitido. A capacidade de armazenamento no FMS precisa ser compatível ao nível de WIP.
- *Ferramental.* As decisões de ferramental incluem os tipos e as quantidades de ferramentas nas estações de trabalho e o grau de duplicação do ferramental nas diferentes estações. A duplicação de ferramentas nas estações tende a aumentar a flexibilidade com que as peças podem ser roteadas através do sistema.
- *Dispositivos de fixação em palete.* Nos sistemas de usinagem para peças prismáticas, é necessário selecionar o número de dispositivos de fixação em palete usados no sistema. Os fatores que influenciam na decisão incluem os níveis de WIP permitidos no sistema e as diferenças no tipo e tamanho das peças. As peças que diferem muito na configuração e no tamanho exigem dispositivos de fixação diferentes.

19.4.2 Aspectos operacionais do FMS

Uma vez que o FMS esteja instalado, seus recursos precisam ser otimizados para atender às necessidades de produção e atingir os objetivos operacionais relacionados ao lucro, à qualidade e à satisfação do consumidor. Os problemas operacionais que precisam ser resolvidos são [20], [22], [29], [30]:

- *Programação e expedição.* O programa de produção no FMS é determinado pelo programa de produção principal (Seção 25.1). A expedição se incumbe de lançar peças no sistema nos tempos corretos. Vários dos problemas a seguir estão relacionados à programação.
- *Carga de máquina.* Refere-se à alocação das operações e dos recursos de ferramental entre as máquinas no sistema para cumprir o programa de produção exigido.
- *Roteamento de peças.* As decisões de roteamento envolvem selecionar as rotas a ser seguidas por cada peça no mix de produção a fim de maximizar o uso dos recursos das estações de trabalho.

- **Agrupamento de peças.** Os tipos de peças precisam ser agrupados para produção simultânea, dadas as limitações sobre ferramentas e outros recursos disponíveis nas estações de trabalho.
- **Gerenciamento de ferramentas.** Gerenciar as ferramentas disponíveis envolve tomar decisões sobre quando mudar de ferramenta e como alocar o ferramental para as estações de trabalho.
- **Alocação de paletes e dispositivos de fixação.** Ocupa-se da alocação dos paletes e dos dispositivos de fixação para as peças sendo produzidas no sistema. Peças diferentes exigem distintos dispositivos de fixação e, antes que determinado tipo de peça seja lançado no sistema, um dispositivo para essa peça precisa estar disponível.

19.5 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA

A maior parte dos problemas operacionais e de projeto identificados na Seção 19.4 pode ser resolvida com a utilização técnicas de análise quantitativa. Os sistemas flexíveis de manufatura constituíram uma área ativa de interesse em pesquisa de operações, e muitas das importantes contribuições estão incluídas em nossa lista de referências. As técnicas de análise de um FMS podem ser classificadas em (1) modelos determinísticos, (2) modelos de filas, (3) simulação de eventos discretos e (4) outras abordagens, incluindo análise heurística.

Os modelos determinísticos são úteis na obtenção de estimativas iniciais do desempenho do sistema. Mais adiante, nesta seção, apresentamos um modelo determinístico útil nos estágios iniciais do projeto de um FMS para fornecer estimativas aproximadas dos parâmetros do sistema, como taxa de produção, capacidade e utilização. Os modelos determinísticos não permitem a avaliação de características operacionais, como o acúmulo de filas e outras dinâmicas que podem prejudicar o desempenho do sistema. Consequentemente, os modelos determinísticos costumam superestimar o desempenho do FMS. De outro lado, se o desempenho real do sistema for muito inferior às estimativas apresentadas por esses modelos, pode ser sinal de má concepção do sistema ou de má gestão das operações do FMS.

Os modelos de filas podem ser usados para descrever algumas das dinâmicas não consideradas nos métodos determinísticos. Esses modelos são baseados na teoria matemática das filas; permitem a inclusão de filas, mas apenas de maneira geral e para configurações de sistema relativamente simples. As medidas de desempenho calculadas

normalmente são valores médios para uma operação estável do sistema. Exemplos de modelos de filas para o estudo de sistemas flexíveis de manufatura são descritos em várias de nossas referências [4], [27], [30]. Provavelmente o mais conhecido dos modelos de filas para FMS é o CAN-Q [25], [26].

Nas fases posteriores do projeto, a simulação de eventos discretos provavelmente oferece o método mais preciso para modelar aspectos específicos de determinado sistema flexível de manufatura [24], [35]. O modelo de computador pode ser construído para imitar de modo bem aproximado os detalhes de uma operação FMS complexa. Características como a configuração do *layout*, o número de paletes no sistema e as regras de programação da produção podem ser incorporadas no modelo de simulação FMS. Na verdade, a simulação pode ser útil para determinar os valores ótimos para esses parâmetros.

Outras técnicas que têm sido aplicadas para analisar problemas operacionais e de projeto de FMS incluem a programação matemática [28] e vários métodos heurísticos [1], [13]. Vários estudos sobre as técnicas de pesquisa de operações direcionadas para os problemas de FMSs estão incluídos entre as referências [2], [6], [16] e [31].

19.5.1 Modelo de gargalo

Importantes aspectos do desempenho de um FMS podem ser descritos matematicamente por um modelo determinista chamado 'modelo de gargalo', desenvolvido por Solberg [27].³ Embora tendo as limitações de uma abordagem determinista, o modelo de gargalo é simples e intuitivo e pode ser usado para fornecer estimativas iniciais dos parâmetros de projeto do FMS, como taxa de produção, número de estações de trabalho e medidas semelhantes. O termo *gargalo* se refere ao fato de que a saída do sistema de produção tem um limite superior, uma vez que o *mix* de produtos que flui através do sistema é fixo. O modelo pode ser aplicado a qualquer sistema de produção que possui essa característica; por exemplo, uma célula operada manualmente ou um *layout* de produção por processo (do inglês, *job shop*). Ele não está limitado a sistemas flexíveis de manufatura.

Terminologia e símbolos. Vamos definir as características, os termos e os símbolos para o modelo de gargalo, uma vez que podem ser aplicados a um sistema flexível de manufatura:

3 Simplificamos um pouco o modelo de Solberg e adaptamos a notação e as medidas de desempenho para manter a relação com a discussão do capítulo.

- *Mix de peças.* O *mix* dos vários tipos de peças ou produtos produzidos pelo sistema é definido por p_j , em que p_j é a fração da saída total de sistema que seja do tipo j . O j subscrito = 1, 2, ... P , em que P é o número total de tipos de peça diferentes fabricados no FMS durante o período de interesse. O somatório dos valores de p_j precisa ser um, ou seja,

$$\sum_{j=1}^P p_j = 1 \quad (19.1)$$

- *Estações de trabalho e servidores.* O sistema flexível de produção possui um número de estações de trabalho diferentes n . Na terminologia do modelo de gargalo, cada estação de trabalho pode ter mais de um servidor, o que significa simplesmente que é possível ter duas ou mais máquinas capazes de realizar a mesma operação. O uso dos termos *estações* e *servidores* no modelo de gargalo é um modo preciso de distinguir máquinas que realizam operações idênticas das que realizam operações diferentes. Considere s_i o número de servidores da estação de trabalho i , em que $i = 1, 2, \dots, n$. Incluímos a estação de carga/descarga como uma das estações do FMS.
- *Roteamento de processo.* Para cada peça ou produto, o roteamento de processo define a sequência de operações, as estações de trabalho onde as operações são realizadas e os tempos de processamento associados. A sequência inclui a operação de carga no início do processamento no FMS e a operação de descarga no fim do processamento. Seja t_{ijk} o tempo de processamento, que é o tempo total que uma unidade de produção ocupa determinada estação de trabalho ou servidor, sem contar qualquer espera na estação. Na notação para t_{ijk} , o i subscrito se refere à estação, j se refere à peça ou ao produto e k se refere à sequência de operações no roteamento de processo. Por exemplo, a quarta operação no plano de processo para a peça A é realizada na máquina 2 e leva 8,5 minutos; portanto, t_{2A4} é igual a 8,5 minutos. Observe que o plano de processo j é exclusivo para a peça j . O modelo de gargalo não prevê convenientemente planos de processo alternativos para a mesma peça.
- *Sistema de manuseio de itens trabalhados.* O sistema de manuseio de material usado para transportar peças ou produtos dentro do FMS pode ser considerado um caso especial de uma estação de trabalho. Vamos designá-lo como a estação $n + 1$. O número de carregadores no sistema (por exemplo, carros transportadores, AGVs, veículos monovia etc.) é análogo ao número de servidores em uma estação de trabalho regular. Seja

s_{n+1} o número de carregadores no sistema de manuseio do FMS.

- *Tempo de transporte.* Seja t_{n+1} o tempo médio de transporte necessário para mover uma peça de uma estação de trabalho para outra no roteamento do processo. Esse valor poderia ser calculado para cada transporte individual com base na velocidade de transporte e nas distâncias entre as estações no FMS, mas é mais conveniente usar um tempo médio de transporte para todos os deslocamentos no FMS.
- *Frequência de operação.* É o número esperado de vezes que determinada operação no roteamento de processo é realizada para cada unidade trabalhada. Por exemplo, uma inspeção poderia ser realizada, na base de amostras, uma vez a cada quatro unidades; logo, a frequência para essa operação seria 0,25. Em outros casos, a peça pode ter uma frequência de operação maior que um, por exemplo, para um procedimento de calibragem que pode ser necessário, em média, mais de uma vez para ser totalmente eficaz. Seja f_{ijk} a frequência de operação para a operação k no plano de processo j na estação i .

Parâmetros operacionais do FMS. Usando os termos descritos acima, podemos definir certos parâmetros operacionais médios do sistema de produção. A *carga média de trabalho* para determinada estação é definida como o tempo médio total gasto na estação por peça e é calculada como:

$$WL_i = \sum_j \sum_k t_{ijk} f_{ijk} p_j \quad (19.2)$$

em que WL_i é a carga média de trabalho para a estação i (minutos); t_{ijk} é o tempo de processamento para a operação k no plano de processo j na estação i (minutos); f_{ijk} é a frequência de operação para a operação k na peça j na estação i e p_j é a fração do *mix* de peças para a peça j .

O sistema de manuseio de itens trabalhados (estação $n + 1$) é um caso especial, como observado acima. A carga de trabalho do sistema de manuseio é o tempo médio de transporte multiplicado pelo número médio de deslocamentos necessários para completar o processamento de uma peça. O número médio de deslocamentos é igual ao número médio das operações no roteamento de processo menos um. Ou seja,

$$n_t = \sum_i \sum_j \sum_k f_{ijk} p_j - 1 \quad (19.3)$$

em que n_t é o número médio de deslocamentos e os outros termos seguem as definições acima. Ilustraremos isso com um exemplo simples.