

# Sistemas de armazenamento

## CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 11.1 Desempenho do sistema de armazenamento e estratégias de localização
  - 11.1.1 Desempenho do sistema de armazenamento
  - 11.1.2 Estratégias de localização no armazenamento
- 11.2 Métodos e equipamentos convencionais de armazenamento
- 11.3 Sistemas automatizados de armazenamento
  - 11.3.1 Sistemas automatizados de armazenamento e recuperação
  - 11.3.2 Sistemas de armazenamento em carrossel
- 11.4 Análise de engenharia dos sistemas de armazenamento
  - 11.4.1 Sistemas automatizados de armazenamento e recuperação (R/S)
  - 11.4.2 Sistemas de armazenamento em carrossel

A função de um sistema de armazenamento de material é armazenar materiais por um período de tempo e permitir acesso a esses materiais quando necessário. O material armazenado por empresas de produção incluem uma variedade de tipos, como indicado na Tabela 11.1. As categorias de (1) a (5) estão relacionadas diretamente ao produto, as de (6) a (8) referem-se ao processo e às categorias (9) e (10) reportam-se ao suporte geral às operações da fábrica. As diferentes categorias de materiais precisam de métodos e controles de armazenamento distintos. Muitas plantas de produção usam métodos manuais para armazenar e recuperar os itens. A função de

armazenamento é por vezes realizada de modo ineficiente, em termos de recursos humanos, espaço no chão da fábrica e controle de materiais. Há métodos automatizados disponíveis para melhorar a eficiência da função de armazenamento.

Neste capítulo, descrevemos os tipos de métodos e equipamentos de armazenamento, dividindo-os em convencionais e automatizados. A última parte apresenta uma análise quantitativa dos sistemas de armazenamento automatizado, com ênfase em duas medidas de desempenho importantes: capacidade de armazenamento e taxa de transferência (no inglês, *throughput*).

Tabela 11.1 Tipos de materiais típicos armazenados em uma fábrica

Tipó	Descrição
1. Materiais brutos	Estoque de material bruto a ser processado (por exemplo, barras, chapas de metal, granulados plásticos para moldagem)
2. Peças compradas	Peças de fornecedores a ser processadas ou montadas (por exemplo, peças fundidas, componentes comprados)
3. Materiais em processo	Peças parcialmente completas entre as operações de processamento ou peças aguardando montagem
4. Produto finalizado	Produto completo aguardando envio
5. Retrabalho e descarte	Peças que não atendem às especificações, que serão retrabalhadas ou descartadas
6. Refugo	Cavacos, limalhas, óleos e outros resíduos que sobraram após o processamento devem ser eliminados, às vezes usando precauções especiais
7. Ferramentas	Ferramentas de corte, serras, dispositivos de fixação, moldes, tintas, varetas de solda e outras ferramentas usadas na produção ou montagem; suprimentos como capacetes, luvas etc.
8. Peças de reposição	Peças necessárias para a manutenção e o reparo dos equipamentos da fábrica
9. Materiais de escritório	Papel, formulários, instrumentos de escrita e outros itens usados no escritório da fábrica
10. Registros da fábrica	Registros sobre produtos, equipamentos e pessoal

## 11.1 DESEMPENHO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO E ESTRATÉGIAS DE LOCALIZAÇÃO

Antes de descrever os métodos e equipamentos de armazenamento, descreveremos certos termos e características operacionais relacionadas aos sistemas de armazenamento. Nossa abordagem é organizada nos seguintes tópicos: (1) desempenho do sistema de armazenamento e (2) estratégias de localização de armazenamento.

### 11.1.1 Desempenho do sistema de armazenamento

O desempenho de um sistema de armazenamento na realização de sua função deve ser suficiente para justificar seu investimento e seu custo operacional. As muitas medidas usadas para avaliar o desempenho de um sistema de armazenamento incluem (1) capacidade de armazenamento, (2) densidade de armazenamento, (3) acessibilidade e (4) taxa de transferência. Além disso, as medidas-padrão usadas para sistemas mecanizados e automatizados incluem (5) utilização e (6) confiabilidade.

A capacidade de armazenamento pode ser definida e medida de duas maneiras: (1) como o espaço total volumétrico disponível ou (2) como o número total de compartimentos de armazenamento disponíveis no sistema para manter itens ou cargas. Em muitos sistemas de armazenamento, os materiais são guardados em cargas unitizadas que são mantidas em contêineres de tamanho-padrão (paletes, caixas ou outros recipientes). O contêiner-padrão

pode ser facilmente manuseado, transportado e armazenado pelos sistemas de armazenamento e de transporte de materiais, que podem ser conectados a ele. Assim, a capacidade de armazenamento é medida de forma conveniente como pelo número de cargas unitizadas que o sistema pode manter. A capacidade física do sistema de armazenamento deve ser maior que o número máximo previsto de cargas que serão armazenadas, para oferecer espaços vazios aos materiais que entram no sistema e permitir variações na máxima exigência de armazenamento.

A densidade de armazenamento é definida como o espaço volumétrico disponível para o armazenamento real em relação ao espaço volumétrico total das instalações. Em muitos armazéns, os espaços de corredor e os espaços aéreos desperdiçados somam um volume maior do que o disponível para o armazenamento real de matéria-prima. A área do piso é algumas vezes usada para avaliar a densidade do armazenamento porque é conveniente fazer a medida no plano do piso da instalação. Entretanto, a densidade volumétrica é normalmente uma medida mais apropriada que a densidade de área.

Para uma utilização eficiente do espaço, o sistema de armazenamento deve ser projetado para atingir uma densidade alta. Entretanto, conforme a densidade é aumentada, a acessibilidade, outra medida importante do desempenho de armazenamento, é afetada. A acessibilidade se refere à capacidade de se acessar qualquer item ou carga armazenados no sistema. Na concepção de um sistema de armazenamento, as compensações adequadas devem ser feitas entre a densidade de armazenamento e a acessibilidade.

A taxa de transferência do sistema é definida como a taxa horária sob a qual o sistema de armazenamento (1) recebe e armazena as cargas e/ou (2) busca e entrega cargas para a estação de saída. Em quaisquer operações de fábrica ou armazém, há certos períodos do dia em que as taxas necessárias de transações de armazenamento e/ou recuperação são maiores do que em outros. O sistema de armazenamento deve ser projetado para a maior taxa de transferência demandada durante o dia.

A taxa de transferência do sistema é limitada pelo tempo que se leva para realizar uma transação de armazenamento ou recuperação (do inglês, *storage/retrieval* — A/R ou S/R). Uma transação típica de armazenagem consiste dos seguintes elementos: (1) pegar a carga na estação de entrada, (2) movimentar-se até a localização do armazenamento, (3) colocar a carga no local e (4) voltar para a estação de entrada. Uma transação de recuperação consiste de: (1) mover-se até o local do armazenamento, (2) pegar o item armazenado, (3) mover-se para a estação de saída e (4) descarregar na estação de saída. Cada elemento leva um tempo e a soma é o tempo de transação que determina a taxa de transferência do sistema de armazenamento. A taxa de transferência pode, algumas vezes, ser aumentada por meio da combinação de transações de armazenamento e recuperação em um ciclo, reduzindo desse modo o tempo de movimentação; isso é chamado de ciclo de comando duplo. Quando somente uma transação de armazenamento ou recuperação é realizada no ciclo, ele é chamado de ciclo de comando único. A habilidade de realização de ciclos de comando duplo em vez de ciclos de comando único depende de questões de demanda e agendamento. Se, durante um certo período do dia, há demanda apenas para transações de armazenamento e não de recuperação, então não é possível incluir os dois tipos de transação em um mesmo ciclo. Caso os dois tipos de transação sejam necessários, então uma taxa de transferência maior será atingida por meio do agendamento de ciclos de comando duplo. Esse agendamento é mais facilmente realizado por um sistema de armazenamento computadorizado (automatizado) do que por um sistema controlado manualmente.

Há variações na maneira com que um ciclo de armazenamento e recuperação é realizado, dependendo do tipo de sistema de armazenamento. Em sistemas operados manualmente, o tempo é muitas vezes perdido na procura da localização de armazenamento do item que está sendo guardado ou retirado. Por outro lado, os sistemas manuais podem alcançar alta eficiência por meio da combinação de múltiplas transações de armazenamento e/ou recuperação em um ciclo, reduzindo assim o tempo de movimentação entre as estações de entrada e saída. Os

tempos dos elementos estão sujeitos a variações e motivações dos trabalhadores humanos, e há falta de controle sobre as operações.

Duas medidas adicionais de desempenho, aplicáveis aos sistemas de armazenamento mecanizado e automatizado, são a utilização e a disponibilidade. A utilização é definida como a proporção de tempo em que o sistema está de fato sendo usado para a realização de operações de A/R comparada ao tempo em que está disponível. A utilização varia ao longo do dia, conforme os requisitos mudam de uma hora para outra. É desejável projetar um sistema de armazenamento automatizado para utilização relativamente alta, de cerca de 80 a 90 por cento. Se a utilização é muito baixa, então o sistema foi provavelmente superdimensionado. Se a utilização é muito alta, então não há provisão para períodos de pico ou falhas do sistema.

A disponibilidade é uma medida de confiabilidade do sistema, definida como a proporção do tempo em que o sistema está pronto para operar (não está quebrado) comparada às horas normais de um turno (Seção 3.1.3). Falhas e mau funcionamento do equipamento causam tempo de inatividade. As razões para o tempo de inatividade incluem falhas no computador, falhas mecânicas, travamento de carga, manutenção corretiva e procedimentos incorretos de funcionários usando o sistema. A confiabilidade de um sistema pode ser aumentada seguindo-se bons procedimentos de manutenção preventiva e tendo peças de reparo disponíveis para os componentes críticos. Os procedimentos de substituição devem ser concebidos para atenuar os efeitos da inatividade do sistema.

### 11.1.2 Estratégias de localização de armazenamento

Muitas estratégias podem ser usadas para organizar o estoque em um sistema de armazenamento. Essas estratégias de localização de armazenamento afetam as medidas de desempenho discutidas acima. As duas estratégias básicas são (1) armazenamento aleatório e (2) armazenamento dedicado. Vamos explicar como essas estratégias são comumente aplicadas em operações de armazenagem. Cada tipo de item guardado em um armazém é conhecido como unidade de manutenção de estoque (do inglês, *stock-keeping-unit* — SKU). A SKU identifica de forma única aquele tipo de item. Os registros de estoque da instalação de armazenamento mantêm uma contagem das quantidades de cada SKU que estão armazenadas.

No armazenamento aleatório, os itens são estocados em qualquer localização disponível no sistema. Na implementação comum do sistema aleatório, os itens que chegam são colocados na localização mais próxima disponível.

Quando o pedido de uma SKU é recebido, o estoque é recuperado do armazenamento de acordo com uma política de primeiro a entrar, primeiro a sair para que os itens mantidos no armazenamento por mais tempo sejam usados para compor o pedido.

No armazenamento dedicado, as SKUs são designadas a localizações específicas das instalações. Isso significa que as localizações são reservadas para todas as SKUs armazenadas no sistema, e assim o número de localizações do armazenamento para cada SKU deve ser suficiente para acomodar o nível máximo de estoque. A base para especificar as localizações de armazenamento é normalmente uma das seguintes: (1) os itens são armazenados em uma sequência de número de peça ou número de produto; (2) os itens são armazenados segundo nível de atividade, com as SKUs mais ativas sendo localizadas mais próximas à estação de entrada/saída; ou (3) os itens são armazenados de acordo com as razões de atividade por espaço, com as mais altas sendo localizadas próximas à estação de entrada/saída.

Quando comparamos os benefícios das duas estratégias, geralmente vemos que um espaço total menor é necessário em um sistema que utilize o armazenamento aleatório, mas as maiores taxas de transferência podem normalmente ser alcançadas quando uma estratégia de armazenamento dedicado é implementada com base no nível de atividade. O Exemplo 11.1 ilustra a vantagem de densidade do armazenamento aleatório.

#### EXEMPLO 11.1

##### Comparação das estratégias de armazenamento

Suponha que um total de 50 SKUs deve ser mantido em um sistema de armazenamento. Para cada SKU, a quantidade média de pedidos é de cem caixas, a taxa média de diminuição é de duas caixas por dia e o nível de segurança do estoque é de dez caixas. Cada

caixa requer uma localização de armazenamento no sistema. Com base nesses dados, cada SKU tem um ciclo de estoque que dura 50 dias. Como há um total de 50 SKUs, a gerência agendou pedidos de modo que uma SKU diferente chegue a cada dia. Determine o número de localizações de armazenamento necessárias no sistema sob duas estratégias alternativas: (a) armazenamento aleatório e (b) armazenamento dedicado.

**Solução:** As estimativas de requisitos de espaço são baseadas nas quantidades médias de pedidos e outros valores na sentença do problema. Primeiro calculamos os níveis máximo e médio de estoque para cada SKU, que variam ao longo do tempo, como mostra a Figura 11.1. O nível máximo do estoque, que ocorre logo depois que um pedido foi recebido, é a soma da quantidade do pedido e do nível de segurança do estoque:

$$\text{Nível máximo do estoque} = 100 + 10 = 110 \text{ caixas}$$

O estoque médio é a média entre o nível máximo e o mínimo do estoque sob a suposição da taxa uniforme de demanda. O valor mínimo ocorre justamente antes de um pedido ser recebido quando o estoque está em seu nível de segurança:

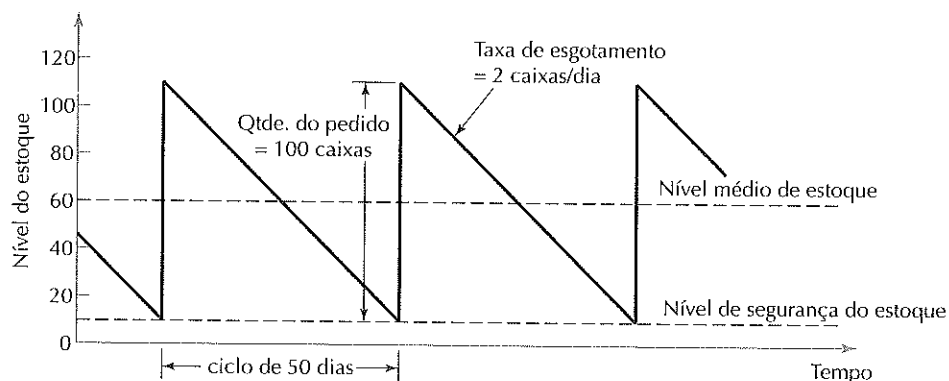
$$\text{Nível mínimo de estoque} = 10 \text{ caixas}$$

$$\text{Nível médio de estoque} = (100 + 10) / 2 = 60 \text{ caixas}$$

(a) Sob uma estratégia de armazenamento aleatório, o número de localizações necessárias para cada SKU é igual ao nível médio de estoque do item, uma vez que os pedidos estão agendados para chegar todos os dias ao longo do ciclo de 50 dias. Isso quer dizer que, quando o nível de estoque de uma SKU, próximo do início de seu ciclo, está alto, o nível de outra SKU, próximo do fim de seu ciclo, está baixo. Assim, o número de localizações de armazenamento necessárias no sistema é:

$$\text{Número de localizações de armazenamento} = (50 \text{ SKUs})(60 \text{ caixas}) = 3.000 \text{ localizações}$$

Figura 11.1 Nível de estoque como uma função do tempo para cada SKU no Exemplo 11.1



(b) Sob uma estratégia de armazenamento dedicado, o número de localizações necessárias para cada SKU deve ser igual a seu nível máximo de estoque. Dessa maneira, o número de localizações de armazenamento no sistema é:

$$\text{Número de localizações de armazenamento} = (50 \text{ SKUs})(110 \text{ caixas}) = 5.500 \text{ localizações}$$

Algumas das vantagens de ambas as estratégias podem ser obtidas em uma alocação de armazenamento dedicado baseada em classe, em que o sistema de armazenamento é dividido em várias classes de acordo com o nível de atividade, e uma estratégia de armazenamento aleatório é usado dentro de cada classe. As classes contendo as SKUs mais ativas são localizadas próximas ao ponto de entrada/saída do sistema de armazenamento para aumentar a taxa de transferência, e as localizações aleatórias dentro das classes reduzem o número total de compartimentos de armazenamento necessários. No fim

do capítulo, examinamos o efeito do sistema de armazenamento baseado em classes sobre a taxa de transferência no Exemplo 11.4 e em muitos de nossos problemas.

## 11.2 MÉTODOS E EQUIPAMENTOS CONVENCIONAIS DE ARMAZENAMENTO

Uma variedade de métodos e equipamentos de armazenamento está disponível para armazenar os muitos materiais listados na Tabela 11.1. A escolha de um método e equipamento depende muito do material a ser armazenado, da filosofia operacional da equipe que gerencia as instalações de armazenamento e das limitações orçamentárias. Nesta seção discutimos os tipos de métodos tradicionais (não automatizados) e equipamentos. Os sistemas de armazenamento automatizados são discutidos na próxima seção. As características de aplicação dos diferentes tipos de equipamentos estão resumidas na Tabela 11.2.

Tabela 11.2 Características de aplicação dos tipos e métodos e equipamentos de armazenamento

Equipamento de armazenamento	Vantagens e desvantagens	Aplicações típicas
Armazenamento a granel	É possível alta densidade; baixa acessibilidade; custo por metro quadrado mais baixo possível	Armazenamento de itens de baixa rotatividade, de estoque grande ou de grandes cargas unitizadas
Sistemas de estantes	Baixo custo; boa densidade de armazenamento; boa acessibilidade	Cargas paletizadas em armazéns
Prateleiras e caixas	Alguns itens do estoque não são claramente visíveis	Armazenamento de itens individuais em prateleiras; armazenamento de mercadorias em caixas
Armazenamento e gavetas	Conteúdo da gaveta é facilmente visível; boa acessibilidade; custo relativamente alto	Pequenas ferramentas; pequenos itens em estoque; peças de reparo
Sistemas automatizados de armazenamento	Altas taxas de transferência; facilita o uso de sistema computadorizado de controle de estoque; equipamento com o custo mais alto; facilita a interface com o sistema automático de manuseio de materiais	Armazenamento de materiais em processo; centro de armazenamento e distribuição de produtos finais; recebimento de pedidos; conjuntos de peças para montagem eletrônica

**Armazenamento a granel (Bulk Storage).** É o armazenamento do estoque em uma área aberta. O estoque é geralmente mantido em cargas unitizadas, em paletes ou recipientes similares, e essas cargas são empilhadas para aumentar a densidade de armazenamento. A densidade mais alta é atingida quando as cargas estão posicionadas próximas umas das outras em ambas as direções do piso, como na Figura 11.2(a). Entretanto, isso oferece um acesso muito limitado às cargas internas. Para aumentar a acessibilidade, as cargas podem ser organizadas em filas e blocos, de modo que corredores naturais sejam criados entre os paletes, como na Figura 11.2(b). As larguras dos blocos podem ser projetadas para oferecer um balanço

adequado entre densidade e acessibilidade. Dependendo da forma e do suporte físico fornecido pelos itens armazenados, pode haver restrição em quão alto as cargas possam ser empilhadas e, em alguns casos, as cargas não podem ser empilhadas, seja por causa da forma física ou da resistência à compressão limitada de cada uma delas. A inability de empilhar as cargas no armazenamento a granel reduz sua densidade, removendo um de seus principais benefícios.

Ainda que o armazenamento a granel seja caracterizado pela ausência de equipamentos específicos de armazenamento, equipamentos de manuseio de materiais devem ser usados para armazenar os materiais e recuperá-los. Ca-

### 11.3 SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE ARMAZENAMENTO

Os equipamentos de armazenamento descritos na seção anterior requerem trabalhador humano para acessar os itens em estoque. O sistema de armazenamento propriamente dito é estático. Sistemas de armazenamento mecanizados e automatizados são disponibilizados para reduzir ou eliminar a quantidade de intervenção humana necessária para operar o sistema. O nível de automação varia. Em sistemas menos automatizados, um operador humano é necessário para lidar com cada transação de armazenamento/recuperação. Em sistemas altamente automatizados, as cargas são armazenadas ou recuperadas sob controle do computador, sem participação humana, exceto para informar dados ao computa-

dor. A Tabela 11.2 lista vantagens e desvantagens bem como aplicações típicas dos sistemas de armazenamento automatizado.

Um sistema de armazenamento automatizado representa um investimento significativo e, muitas vezes, requer uma forma nova e diferente de se fazer negócios. As companhias têm razões diferentes para a automação da função de armazenamento. A Tabela 11.3 fornece uma lista de possíveis objetivos e razões por trás das decisões de uma companhia em automatizar suas operações de armazenamento. Os sistemas de armazenamento automatizado se dividem em dois tipos gerais: (1) sistemas automatizados de armazenamento/recuperação e (2) sistemas de armazenamento em carrossel. Esses dois tipos são discutidos nas seções seguintes.

**Tabela 11.3 Possíveis objetivos e razões possíveis para a automação das operações de armazenamento de uma companhia**

- |   |
|---|
| • Aumentar a capacidade de armazenamento  |
| • Aumentar a densidade de armazenamento   |
| • Recuperar espaço de chão da fábrica atualmente usado para armazenar materiais em processo           |
| • Melhorar a segurança e reduzir roubos   |
| • Melhorar a segurança na função de armazenamento   |
| • Reduzir o custo de trabalho e/ou aumentar a produtividade do trabalho em operações de armazenamento |
| • Melhorar o controle de estoque  |
| • Melhorar a rotatividade do estoque  |
| • Melhorar o serviço ao consumidor  |
| • Melhorar a taxa de transferência ( <i>throughput</i> )  |

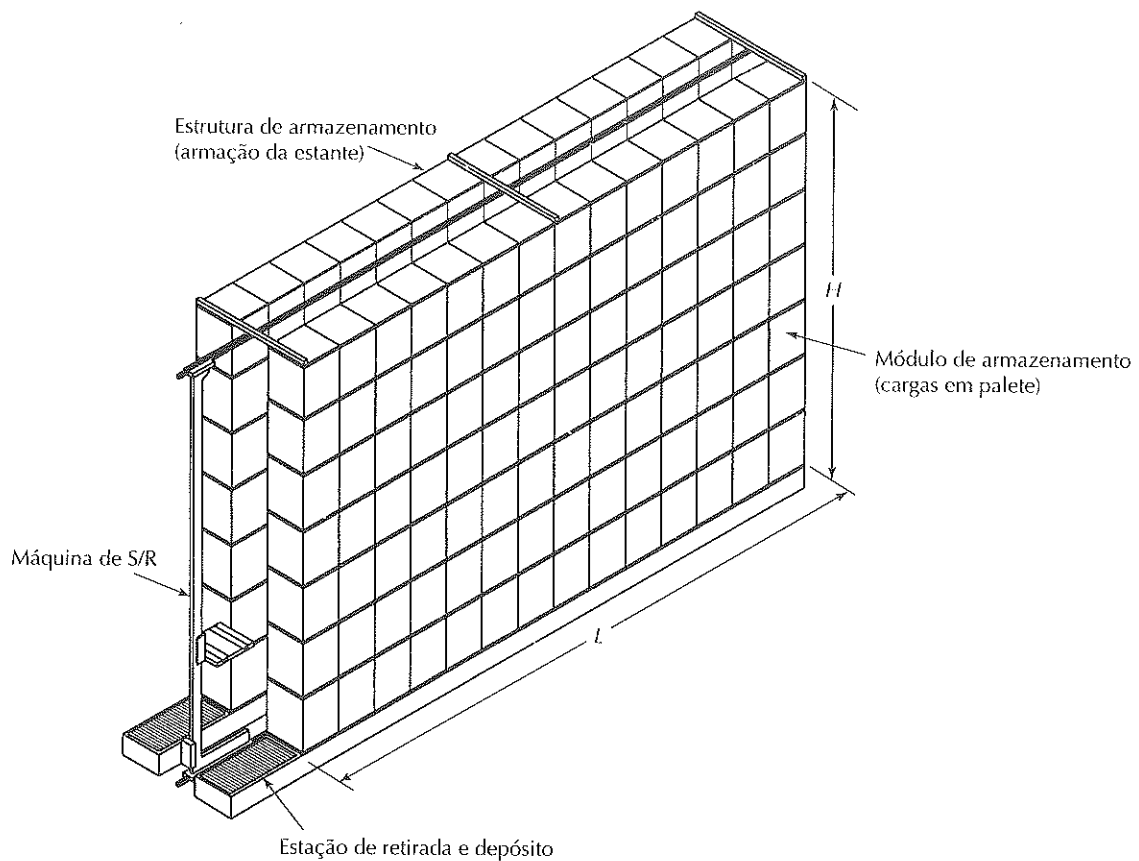
#### 11.3.1 Sistemas automatizados de armazenamento e recuperação

Um sistema automatizado de armazenamento/recuperação (do inglês, *automated storage/retrieval system* — AS/RS) é um sistema que executa operações de armazenamento e recuperação com velocidade e precisão sob um grau definido de automação. A Figura 11.5 mostra um corredor de um AS/RS que trata e armazena cargas unitizadas em paletes. Uma variedade abrangente de automação é encontrada em AS/RSs disponíveis comercialmente. Em um nível mais sofisticado, as operações são totalmente automatizadas, controladas por computador e integradas de modo completo com as operações da fábrica ou depósito. Em outro extremo, trabalhadores humanos controlam o equipamento e rea-

lizam as transações de armazenamento e recuperação. Os sistemas de armazenamento/recuperação automatizados são projetados sob medida para cada aplicação, ainda que os projetos sejam baseados em componentes modulares padronizados disponíveis em cada respectivo fornecedor de AS/RS.

Nossa definição de AS/RS pode ser interpretada de modo a incluir os sistemas de armazenamento em carrossel. Entretanto, na indústria de manuseio de materiais, os sistemas baseados em carrossel são diferentes dos AS/RS. A maior diferença está na construção do equipamento. O AS/RS básico consiste de uma estrutura em estante para o armazenamento de cargas e um mecanismo de armazenamento/recuperação cujos movimentos são lineares (movimento em  $x$ - $y$ - $z$ ), como mostrado na Figura 11.5. Em contrapartida, o sistema de carrossel usa cestos suspensos

Figura 11.5 Sistema automatizado de armazenamento/recuperação de cargas unitizadas



a partir de um transportador aéreo que gira em torno de um trilho em circuito fechado oval para entregar os cestos para a estação de carga/descarga (Figura 11.6). As diferenças entre um AS/RS e um sistema de armazenamento em carrossel são resumidas na Tabela 11.4.

Um AS/RS consiste de um ou mais corredores de armazenamento que são, cada um, atendidos por uma máquina de armazenamento/recuperação (do inglês, *storage/retrieval*, S/R). Essas máquinas de S/R são algumas vezes chamadas de guindastes ou, mais comumente, transelevadores. Os corredores têm estantes de armazenamento para os materiais. Os transelevadores são usados para colocar e recuperar os materiais das estantes. Cada corredor do AS/RS tem uma ou mais estações de entrada/saída em que os materiais são entregues para o sistema de armazenamento ou são retirados do sistema. Essas estações de entrada/saída (E/S) são chamadas de estações de retirada e depósito (do inglês, *pickup-and-deposit*, P&D) na terminologia de AS/RS. As estações de E/S podem ser operadas manualmente ou conectadas a algum tipo de sistema de transporte automatizado como um transportador ou um AGVS.

Tipos de AS/RS. Muitas categorias importantes do sistema automatizado de R/S podem ser apontadas. Os tipos principais são:

- *AS/RS para carga unitizada (Unit load)*. É normalmente um sistema automatizado, grande, projetado para lidar com cargas unitizadas armazenadas em paletes ou em outro recipiente-padrão. O sistema é controlado por computador e os transelevadores são automatizados e projetados para manusear os contêineres de cargas unitizadas. O AS/RS ilustrado na Figura 11.5 é um sistema de cargas unitizadas. Outros sistemas descritos abaixo representam variações do sistema AS/RS para cargas unitizadas.
- *AS/RS de profundidade (Deep-lane)*. É um sistema de armazenamento de cargas unitizadas de alta densidade adequado quando grandes quantidades de estoque são armazenadas, mas o número de tipos de itens em estoque (SKUs) é relativamente pequeno. Em vez de armazenar cada carga unitizada de modo que ela possa ser acessada diretamente do corredor (como em um sistema de cargas unitizadas convencional), o sistema de



Figura 11.6 Carrossel horizontal de armazenamento

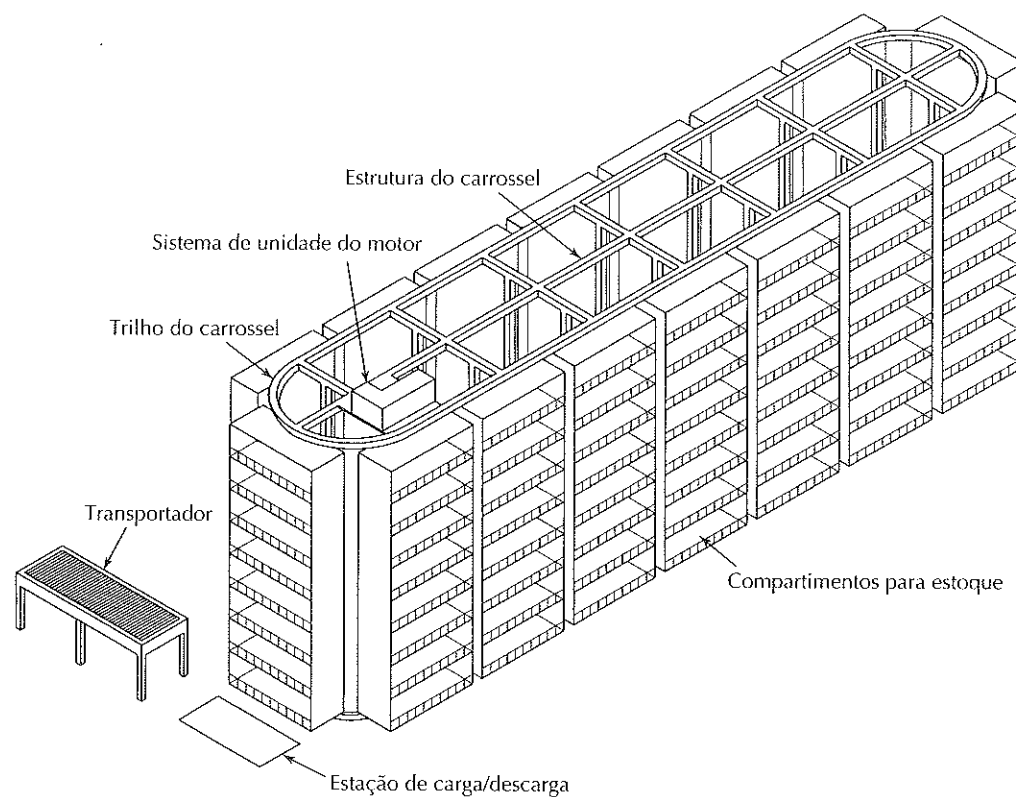


Tabela 11.4 Diferenças entre um AS/RS e um sistema de armazenamento em carrossel

Característica	AS/RS básico	Sistema básico de armazenamento em carrossel
Estrutura de armazenamento	Sistema de estante para suportar paletes ou sistema de prateleiras para suportar caixas	Cestos suspensos a partir de um transportador aéreo ou tróle
Movimentos	Movimentos lineares do transelevador	Rotação dos transportadores aéreos ao longo de um trilho oval
Operação de armazenamento e recuperação	O transelevador se desloca até os compartimentos na estrutura de estantes	O transportador gira para trazer os cestos para a estação de carga e descarga
Replicação da capacidade de armazenamento	Corredores múltiplos, cada um com uma estrutura de estante e transelevador	Carrosséis múltiplos, cada um com um trilho oval e caixas suspensas

profundidade armazena dez ou mais cargas em uma única estante, uma atrás da outra.

Cada estante é projetada para um fluxo (do inglês, *flow-through*) com a entrada de um lado e a saída do outro. As cargas são retiradas de um lado da estante por um transelevador projetado para retirada e outro transelevador carrega as cargas no lado de entrada da estante.

- AS/RS *miniload* (ou armazém automático para caixas — AAC). Esse sistema de armazenamento é usado para tratar de cargas pequenas (peças individuais ou suprimentos) contidas em caixas ou gavetas. O transelevador é projetado para recuperar a caixa e entregá-la à estação E/S no fim do corredor de modo que os itens individuais possam ser retirados das caixas. A estação E/S é normalmente operada por um trabalhador humano. A caixa ou gaveta deve então retornar para sua localização no sistema. Um AS/RS *miniload* é geralmente menor que um AS/RS para carga unitizada e, muitas vezes, é fechado para a segurança dos itens armazenados.
- AS/RS *tripulado* (*man-on-board*, ou “homem a bordo”). Um sistema de armazenamento e recuperação



*man-on-board* (também chamado de *man-aboard*) representa uma abordagem alternativa para o problema de recuperação de itens individuais do estoque. Nesse sistema, um operador humano fica sobre o transelevador. Enquanto um sistema de *miniload* entrega uma caixa inteira para a estação de retirada do fim do corredor e deve depois devolver essa caixa para seu compartimento próprio no armazenamento, com o sistema *man-on-board* o trabalhador recolhe os itens individuais diretamente de suas localizações no estoque. Isso oferece a oportunidade de aumentar a taxa de transferência do sistema.

- *Sistema automatizado de recuperação de itens.* Esses sistemas de armazenamento também são projetados para a recuperação de um item individual ou de caixas pequenas com produtos; entretanto, os itens são guardados em pistas em vez de caixas ou gavetas. Quando um item é recuperado, ele é empurrado de sua pista e cai em um transportador para a entrega na estação de retirada. A operação é, de certo modo, similar à de uma máquina de doces, exceto pelo fato de que um sistema de recuperação de itens tem mais pistas de armazenamento e um transportador para levar os itens para uma localização central. Cada pista de itens a ser fornecidos é reabastecida de forma periódica, normalmente a partir do fundo do sistema para que haja escoamento dos itens, permitindo a rotatividade do estoque no modo primeiro que entra, primeiro que sai.
  - *Módulos de armazenamento por elevador vertical* (do inglês, *vertical lift storage modules — VLSM*) [10]. Também chamados de sistemas automatizados de armazenamento e recuperação por elevador vertical (VL-AS/RS) [7]. Todos os tipos anteriores de AS/RS são projetados em torno de um corredor horizontal. O mesmo princípio de usar um corredor central para acessar as cargas é usado, exceto pelo fato de que o corredor é vertical. Os módulos de armazenamento por elevador vertical, alguns com altura de dez metros (30 pés) ou mais, são capazes de suportar grandes estoques ao passo que economiza um valioso espaço de chão da fábrica.
- Aplicações de AS/RS. A maioria das aplicações da tecnologia de AS/RS tem sido associada às operações de estocagem e distribuição. Um AS/RS também pode ser usado para armazenar materiais brutos e materiais em processo na produção. Três áreas de aplicação podem ser distinguidas para os sistemas de armazenamento e recuperação: (1) armazenamento e tratamento de cargas unitizadas, (2) preparação de encomendas e (3) armaze-

namento de materiais em processo. As aplicações de armazenamento e recuperação de cargas unitizadas são representadas pelos sistemas AS/RS de armazenamento de cargas unitizadas e de profundidade. Esses tipos de aplicações são encontrados com facilidade em estoques para mercadorias acabadas em um centro de distribuição, raramente em produção. Os sistemas de profundidade são usados na indústria de alimentos. Como descrito acima, a preparação de encomendas envolve a recuperação de materiais em quantidades menores que unidades de carga unitizadas completas. Os sistemas de recuperação de itens, *miniload* e *man-on-board*, são usados para essa segunda área de aplicação.

O armazenamento de materiais em processo (do inglês, *work-in process storage — WIP*) é uma aplicação mais recente da tecnologia de armazenamento automatizado. Enquanto é desejável minimizar a quantidade de materiais em processo, eles são inevitáveis e devem ser gerenciados com eficiência. Os sistemas automatizados de armazenamento, sejam os automatizados de armazenamento e recuperação ou os em carrossel, representam uma maneira eficiente de armazenar materiais entre as etapas de processamento, em particular em produções em lote e por encomenda. Em alta produção, os materiais em processo são muitas vezes levados entre as operações por sistemas transportadores, que desse modo servem tanto às funções de armazenamento como às de transporte.

Os méritos de um sistema automatizado de WIP para produção em lote ou por encomenda podem ser mais bem-vistos comparando o sistema com o modo tradicional de lidar com os materiais em processo. A fábrica típica contém múltiplas células de trabalho, cada uma realizando suas próprias operações de processamento em diferentes peças. Em cada célula, pedidos que consistem de uma ou mais peças aguardam no pátio da fábrica para ser processados, enquanto outros pedidos terminados aguardam para ser movidos para a próxima célula na sequência. Não é incomum para uma fábrica comprometida com a produção em lote ter centenas de pedidos em curso simultaneamente, todos eles representam materiais em processo. As vantagens de manter todo esse estoque na fábrica inclui (1) tempo perdido da busca de pedidos, (2) peças ou pedidos inteiros tornando-se perdidos temporária ou permanentemente, resultando algumas vezes na repetição de pedidos para reprodução de peças extraviadas, (3) pedidos não sendo processados de acordo com suas prioridades relativas em cada célula e (4) pedidos gastando muito tempo na fábrica, causando atraso na entrega para o consumidor. Esses problemas indicam baixo controle dos materiais em processo.

Os sistemas de armazenamento e recuperação também são usados em operações de alta produção. Na indústria automobilística, algumas montadoras usam AS/RSs de grande capacidade para armazenar temporariamente chassis de carros e pequenos caminhões entre as principais etapas de montagem. O AS/RS pode ser usado na colocação e no sequenciamento das unidades de trabalho de acordo com o cronograma de produção mais eficiente [1].

Os sistemas automatizados de armazenamento ajudam a recuperar o controle sobre o WIP. As razões que justificam a instalação de sistemas automatizados de armazenamento para materiais em processo incluem:

- *Armazenamento em buffer na produção.* Um sistema de armazenamento pode ser usado como uma zona de armazenamento em buffer entre dois processos cujas taxas de produção são significativamente diferentes. Um simples exemplo é uma sequência de dois processos em que a primeira operação de processamento alimenta um segundo processo que opera em uma taxa de produção baixa. A primeira operação precisa de apenas um turno para atender aos requisitos de produção, enquanto a segunda precisa de dois turnos para produzir o mesmo número de unidades. Um buffer de processo é necessário entre essas operações para armazenar de maneira temporária a saída do primeiro processo.
- *Suporte para a entrega just-in-time.* O *just-in-time* (JIT) é uma estratégia de produção em que as peças necessárias para a produção e/ou montagem são recebidas imediatamente, antes que sejam necessárias na fábrica. Isso resulta em uma dependência grande por parte da fábrica para que os fornecedores entreguem as peças a tempo para o uso na produção. Para reduzir a chance de esgotamento dos estoques devido a atrasos dos fornecedores, algumas fábricas instalam sistemas automatizados de armazenamento como buffers de armazenamento para materiais que chegam. Ainda que essa abordagem subverta os objetivos do JIT, ela também reduz alguns de seus riscos.
- *Conjuntos de peças para montagem.* É o sistema de armazenamento usado para guardar componentes para a montagem de produtos ou subconjuntos. Quando um pedido é recebido, os componentes necessários são recuperados, reunidos em conjuntos ou kits (caixas) e entregues no local de produção para a montagem.
- *Compatibilidade com sistemas de identificação automática.* Os sistemas automatizados de armazenamento podem ser facilmente conectados a dispositivos de identificação automática, como leitores de códigos de barras. Isso permite que as cargas sejam armazenadas

e recuperadas sem necessidade de operadores humanos para identificá-las.

- *Controle computadorizado e rastreamento de materiais.* Combinado com a identificação automática, um sistema de armazenamento de WIP permite que se conheça a localização e o estado de um material em processo.
- *Suporte à automação em toda a fábrica.* Dada a necessidade de armazenamento de alguns materiais em processo na produção em lote, um sistema automatizado de armazenamento de tamanho adequado é um subsistema importante em uma fábrica totalmente automatizada.

**Características operacionais e de componentes de um ASAS/RS.** Praticamente todos os sistemas automatizados de armazenamento e recuperação descritos acima consistem dos seguintes componentes (Figura 11.5): (1) estrutura de armazenamento, (2) veículo de S/R, (3) módulos de armazenamento (por exemplo, paletes para cargas unitizadas) e (4) uma ou mais estações de retirada e reposição. Além disso, um sistema de controle é necessário para operar o AS/RS.

A sustentação de armazenamento é a estrutura da estante, fabricada em aço, que suporta as cargas contidas no AS/RS. A estrutura da estante deve possuir resistência e rigidez suficientes para que ela não se deforme de modo significativo devido às cargas no armazenamento ou a outras forças na estrutura. Os compartimentos individuais de armazenamento na estrutura devem ser projetados para suportar os módulos de armazenamento usados para conter os materiais. A estrutura deve também ser usada para sustentar o teto e as laterais do edifício em que o AS/RS reside. Outra função da estrutura de armazenamento é dar suporte ao hardware de corredor necessário para alinhar os transelevadores com respeito aos compartimentos de armazenamento do AS/RS. Esse hardware inclui trilhos guia na parte superior e inferior da estrutura assim como batentes e outros recursos necessários para proporcionar uma operação segura.

O transelevador é usado para realizar as transações de armazenamento, entregar as cargas da estação de entrada para o armazenamento e trazê-las para a estação de saída. Para realizar essas transações, o transelevador de armazenamento e recuperação deve ser capaz de se movimentar horizontal e verticalmente para alinhar sua plataforma (ou berço, que carrega a carga) ao compartimento de armazenamento na estrutura da estante. O transelevador consiste de um mastro rígido no qual um sistema de elevador é montado para a movimentação vertical da plataforma. As

rodas são unidas na base do mastro para permitir o deslocamento horizontal ao longo de um sistema de trilhos que atravessa o comprimento do corredor. Um trilho paralelo na parte superior da estrutura de armazenamento é usado para manter o alinhamento do mastro e da plataforma em respeito à estrutura da estante.

A plataforma inclui um mecanismo de deslocamento para movimentar as cargas de e para os compartimentos de armazenamento. O projeto do sistema de deslocamento também deve permitir que as cargas sejam transferidas do transelevador para as estações de E/S ou outra interface de tratamento de materiais do AS/RS. A plataforma e o mecanismo de deslocamento são posicionados e operados automaticamente no AS/RS comum. Os transelevadores do tipo *man-on-board* (homem a bordo) são equipados para que um operador humano possa ficar na plataforma.

Para realizar os movimentos desejados do transelevador, três sistemas são necessários: movimento horizontal do mastro, movimento vertical da plataforma e o movimento transversal do mecanismo de transferência entre a plataforma e um compartimento de armazenamento. Os modernos transelevadores estão disponíveis com velocidades horizontais de até 200 m/min (600 pés/min) ao longo do corredor e velocidades verticais ou de elevação de até 50 m/min (150 pés/min). Essas velocidades determinam o tempo necessário para que o carrinho se movimente da estação de E/S para uma localização particular no corredor de armazenamento. A aceleração e a desaceleração têm efeito mais significativo no tempo de deslocamento de pequenas distâncias. A transferência do mecanismo de deslocamento é realizada por qualquer um de muitos mecanismos, incluindo garfos (para cargas em paletes) e dispositivos de fricção para bandejas de lona de fundo plano.

Os módulos de armazenamento são os contêineres de cargas unitizadas dos materiais armazenados. Incluem paletes, contêineres e cestos de cabo de aço, bandejas de plástico e gavetas especiais (usadas em sistema *miniload*). Esses módulos são geralmente fabricados em um tamanho-padrão que pode ser manuseado automaticamente pelo mecanismo de transporte do transelevador. O tamanho padrão também é projetado para encaixar no compartimento de armazenamento da estrutura da estante.

A estação de retirada e depósito é onde as cargas são transferidas para e do AS/RS. Geralmente é localizada no fim do corredor para o acesso do sistema externo de manuseio que traz as cargas para o AS/RS e as leva embora. As estações de retirada e as estações de depósito podem estar localizadas em lados opostos do corredor de armazenamento ou combinadas na mesma localização. Isso depende da origem das cargas que chegam e do destino das cargas que saem. Uma estação de E/S deve ser compatível

tanto com o mecanismo de deslocamento do transelevador quanto com o sistema de tratamento externo. Os métodos comuns para o tratamento de cargas em uma estação de E/S incluem a carga e descarga manual, empilhadeiras, transportadores (por exemplo, de roletes) e AGVS.

O principal problema dos controles do AS/RS é posicionar o transelevador dentro de uma tolerância aceitável em um compartimento de armazenamento na estrutura da estante para depositar ou retirar uma carga. As localizações dos materiais armazenados no sistema devem ser determinadas para direcionar o transelevador para um compartimento de armazenamento em particular. Dentro de um dado corredor no AS/RS, cada compartimento é identificado por sua posição vertical e horizontal e se está do lado direito ou esquerdo do corredor. Um esquema baseado em códigos alfanuméricos pode ser usado para esse propósito. Usando esse esquema de identificação de localização, cada unidade de material armazenado no sistema pode ser referenciada a uma localização específica no corredor. O registro dessas localizações é chamado de "arquivo de localização de item" (do inglês, *item location file*). Toda vez que uma transação de armazenamento é terminada, ela deve ser registrada no arquivo de localização de itens.

Dado um compartimento de armazenamento específico, o transelevador deve ser comandado a se mover para aquela localização e posicionar o mecanismo de deslocamento para a transferência da carga. Um método de posicionamento usa procedimento de contagem, em que o número de baias e níveis são contados na direção do movimento (horizontal e verticalmente), para determinar a posição. Um método alternativo é um procedimento de identificação numérica em que cada compartimento tem em sua face um alvo refletivo com identificações de localização em código binário. O transelevador utiliza escâneres óticos para ler o alvo e posicionar o mecanismo de deslocamento para o depósito ou a retirada de uma carga.

Os controles computadorizados e os controladores lógicos programáveis são usados para determinar a localização necessária e guiar o transelevador para seu destino. O controle por computador permite que a operação física do AS/RS seja integrada ao sistema de informações e criação de registros, o que por sua vez permite que as transações de armazenamento sejam informadas em tempo real, os registros de estoque sejam mantidos de modo preciso, o desempenho do sistema seja monitorado e a comunicação com outros sistemas de computador da instalação seja facilitada. Esses controles automáticos podem ser substituídos ou complementados por controles manuais, quando necessário, sob condições de emergência ou para a operação *man-on-board* do transelevador.

### 11.3.2 Sistemas de armazenamento em carrossel

Um sistema de armazenamento em carrossel consiste de uma série de caixas ou cestos suspensos a partir de um transportador aéreo de corrente que gira em torno de um longo sistema oval de trilhos, como mostrado na Figura 11.6. O propósito do transportador de corrente é posicionar as caixas em uma estação de carga e descarga no fim do percurso. A operação é similar à do sistema de transportador aéreo elétrico usado por empresas de lavagem a seco para levar as roupas prontas até a frente da loja. A maioria dos carrosséis é operada por trabalhador humano na estação de carga e descarga. Esse trabalhador ativa o carrossel para entregar uma caixa desejada à estação. Uma ou mais peças são removidas da caixa, ou adicionadas a ela, e então o ciclo é repetido. Alguns sistemas em carrossel são automatizados por meio da utilização de mecanismos de transferência na estação de carga e descarga para mover as cargas para o carrossel e a partir dele.

**Tecnologia do carrossel.** Os carrosséis (armazéns rotativos) podem ser classificados como horizontais e verticais. A configuração horizontal mais comum (Figura 11.6) existe em uma variedade de tamanhos entre três metros (dez pés) e 30 metros (cem pés) de comprimento. Aqueles que ocupam as posições mais altas desse intervalo têm densidade de armazenamento maior, e o tempo médio de ciclo de acesso é maior. Por esse motivo, a maioria dos carrosséis tem entre dez metros e 16 metros (entre 30 e 50 pés) de comprimento para atingir um balanço adequado entre esses fatores concorrentes.

Um sistema de armazenamento em carrossel horizontal consiste de uma armação soldada de aço que suporta o sistema oval de trilhos. O carrossel pode ser um sistema aéreo (chamado de unidade orientada ao topo) ou um sistema montado no chão (chamado de unidade montada no chão). Na unidade orientada ao topo, um sistema motorizado de polias é montado no topo da armação e dirige o sistema do trole aéreo. As caixas são suspensas a partir dos troles. Na unidade montada no chão, o sistema de direção por polias é montado na base da estrutura e o sistema de troles se desloca sobre um trilho na base; isso aumenta a capacidade de transporte de carga para o sistema de armazenamento em carrossel e também elimina o problema de sujeiras e óleo pingando dos sistemas de rola-dores aéreos em cima dos conteúdos do armazenamento nos sistemas orientados ao topo.

O projeto das caixas e cestos individuais do carrossel deve ser consistente com as cargas que serão armazenadas. As larguras das caixas variam entre cerca de 50 centímetros a 75 centímetros (de 20 a 30 polegadas), e as

profundidades são de cerca de 55 centímetros (22 polegadas). As alturas dos carrosséis horizontais são tipicamente de 1,8 a 2,4 metros (de seis a oito pés). As caixas-padrão são feitas de telas de aço para aumentar a visibilidade do operador.

Os carrosséis verticais são construídos para funcionar em torno de um transportador vertical. Ocupam bem menos espaço no chão do que a configuração horizontal, mas precisam de espaço aéreo suficiente. O teto do edifício limita a altura dos carrosséis verticais e, por essa razão, sua capacidade de armazenamento é normalmente menor do que a média dos carrosséis horizontais.

Os controles para os sistemas de armazenamento em carrossel variam desde chamadas de controle manual até controle computadorizado. Os controles manuais incluem pedais, interruptores de mão e teclados especializados. O controle por pedal permite ao operador na estação de retirada girar o carrossel em ambas as direções para a posição da caixa desejada. O controle manual envolve a utilização de um interruptor montado em um braço que se projeta da estrutura do carrossel dentro do alcance do operador e, novamente, o controle bidirecional é o modo comum de operação. O controle pelo teclado permite uma variedade maior de funções de controle do que os tipos anteriores. Quando um operador informa a posição da caixa desejada, o carrossel é programado para entregar a caixa na estação de retirada pela menor rota (ou seja, movimentação horária ou anti-horária do carrossel).

O controle computadorizado aumenta as oportunidades de automação do carrossel mecânico e do gerenciamento dos registros de estoque. Para o lado mecânico, a carga e descarga automáticas estão disponíveis em sistemas modernos de armazenamento em carrossel. Isso permite que o carrossel seja conectado a um sistema de manuseio automatizado sem necessidade de participação humana nas operações de carga e descarga. As funções de gerenciamento de dados fornecidas pelo controle computadorizado incluem a capacidade de manter dados sobre as localizações das caixas, itens em cada caixa e outros registros de controle de estoque.

**Aplicações de carrossel.** Os sistemas de armazenamento em carrossel oferecem uma taxa de transferência relativamente alta e são muitas vezes uma alternativa atraente em relação a um AS/RS *miniload* nas operações de produção, em que são reconhecidos seu custo relativamente baixo, sua versatilidade e sua alta confiabilidade. As aplicações típicas do sistema de armazenamento em carrossel incluem (1) operações de R/S, (2) transporte e alojamento, (3) material em processo e (4) utilização especializada.

As operações de R/S podem ser realizadas com eficiência usando carrosséis quando os itens individuais devem ser selecionados de grupos de itens no estoque. Algumas vezes chamados de operações de "seleção e carregamento" (do inglês, *pick and load*), esses procedimentos são comuns em retiradas de pedidos de ferramenta em almoxarifado, materiais brutos em depósito, peças de reposição ou outros itens em empresa de atacado e materiais em processo em fábrica. Em pequenas montagens eletrônicas, os carrosséis são usados para o armazenamento de kits de peças que serão transportadas para as estações de trabalho de montagem.

Em aplicações de transporte e alojamento, o carrossel é usado para transportar e/ou classificar os materiais enquanto são armazenados. Um exemplo disso está nas operações de montagem em andamento em que as estações de trabalho estão localizadas em torno de um carrossel de movimento contínuo e os trabalhadores têm acesso às caixas individuais de armazenamento do carrossel. Eles retiram o trabalho das caixas para completar suas respectivas tarefas na montagem e, então, colocam seu trabalho em outra caixa para a próxima operação em alguma outra estação de trabalho. Outro exemplo de aplicação de transporte e alojamento é a classificação e consolidação dos itens. Cada caixa é definida para coletar os itens de um tipo ou consumidor particular. Quando a caixa está cheia, a carga coletada é removida para a expedição ou outro local.

Os sistemas de armazenamento em carrossel muitas vezes competem com os sistemas automatizados de armazenamento e recuperação para aplicações em que os materiais em processo devem ser armazenados temporariamente. As aplicações dos sistemas em carrossel na indústria eletrônica são comuns.

Um exemplo de utilização especializada dos sistemas de carrossel é o teste elétrico de produtos ou componentes, em que o carrossel é usado para armazenar o item durante o teste por um período específico de tempo. O carrossel é programado para entregar os itens para a estação de carga ou descarga na conclusão do período de teste.

## 11.4 ANÁLISE DE ENGENHARIA DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO

Muitos aspectos do projeto e da operação de um sistema de armazenamento são suscetíveis de análise quantitativa de engenharia. Nesta seção, examinamos o dimensionamento da capacidade e o desempenho da taxa de transferência para os dois tipos de sistemas automatizados de armazenamento.

### 11.4.1 Sistemas automatizados de armazenamento e recuperação (R/S)

Enquanto os métodos desenvolvidos aqui são especificamente para sistemas automatizados de R/S, abordagens similares podem ser usadas para analisar as instalações tradicionais de armazenamento, como depósitos consistindo de porta-paletes e armazenamento a granel.

#### *Dimensionando a estrutura de estantes do AS/RS.*

A capacidade total de armazenamento de um corredor do estoque depende de quantos compartimentos de armazenamento estejam organizados horizontal e verticalmente nos corredores, como indicado no diagrama da Figura 11.7. Isso pode ser expresso como:

$$\text{Capacidade por corredor} = 2n_y n_z \quad (11.1)$$

em que  $n_y$  é o número de compartimentos de carga ao longo do comprimento do corredor e  $n_z$  é o número de compartimentos de carga que compõem a altura do corredor. A constante 2 explica o fato de que as cargas estejam contidas em ambos os lados do corredor.

Se assumirmos um compartimento de tamanho-padrão (para aceitar uma carga unitizada de tamanho-padrão), então as dimensões do compartimento que faceiam o corredor devem ser maiores que as dimensões da carga unitizada. Suponhamos que  $x$  e  $y$  sejam iguais às dimensões de profundidade e largura de uma carga unitizada (por exemplo, um tamanho-padrão de palete, como na Tabela 10.3) e  $z$  seja igual à altura da carga unitizada. A largura, o comprimento e a altura da estrutura da estante do corredor do AS/RS estão relacionadas com as dimensões da carga unitizada e o número de compartimentos a seguir [6]:

$$W = 3(x + a) \quad (11.2a)$$

$$L = n_y(y + b) \quad (11.2b)$$

$$H = n_z(z + c) \quad (11.2c)$$

em que  $W$ ,  $L$  e  $H$  são a largura, o comprimento e a altura de um dos corredores da estrutura de estantes do AS/RS (mm, pol);  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as dimensões da carga unitizada (mm, pol) e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são tolerâncias projetadas em cada compartimento de armazenamento para proporcionar o espaço da carga unitizada, contando com o tamanho das vigas de suporte na estrutura da estante (mm, pol). Para o caso de cargas unitizadas contidas em paletes-padrão, os valores recomendados para as tolerâncias são de: 150 milímetros (seis polegadas) para  $a$ ; 200 milímetros (oito po-