

CAPÍTULO

3

Modelos e métricas de produção



CONTEÚDO DO CAPÍTULO

3.1 Modelos matemáticos de desempenho da produção

- 3.1.1 Taxa de produção
- 3.1.2 Capacidade de produção
- 3.1.3 Utilização e disponibilidade
- 3.1.4 Tempo de produção
- 3.1.5 Material em processo

3.2 Custos da produção

- 3.2.1 Custos fixos e variáveis
- 3.2.2 Mão de obra direta, matéria-prima e gastos gerais
- 3.2.3 Custo do uso dos equipamentos

Apêndice A3: Procedimentos de nivelamento nos modelos de produção

Companhias de produção bem-sucedidas usam uma variedade de métricas para ajudar a gerenciar suas operações. Métricas quantitativas permitem à companhia acompanhar o desempenho em períodos sucessivos (ou seja, meses e anos), experimentar novas tecnologias e novos sistemas a fim de determinar seus méritos, identificar problemas de desempenho, comparar métodos alternativos e tomar boas decisões. Métricas de produção podem ser divididas em duas categorias básicas: (1) medidas de desempenho da produção e (2) custos da produção. Métricas que indicam o desempenho da produção incluem a taxa de produção, a capacidade da fábrica, o tempo de uso do equipamento (uma medida de confiabilidade) e o tempo de produção. Os custos de produção importantes para uma companhia incluem os custos de material e de trabalho, os custos de produção dos produtos e os custos de operação de um determinado equipamento. Neste capítulo definimos essas métricas e apresentamos como são calculadas.

3.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE DESEMPENHOS DA PRODUÇÃO

Muitos aspectos da produção são quantitativos. No capítulo anterior, vimos alguns deles nos quatro parâmetros de produto: volume produzido Q , variedade de produtos P , número de peças por produto n_p e número de operações para a produção de uma peça n_o . Nesta seção definimos vários parâmetros e variáveis adicionais mediados quantitativamente e desenvolvemos modelos matemáticos que podem ser usados para definir e calcular esses parâmetros. Nos capítulos subsequentes, faremos referência a essas definições nas discussões de tópicos específicos em sistemas de automação e produção.

3.1.1 Taxa de produção

A taxa de produção para um processamento individual ou uma operação de montagem é geralmente expressa

como uma taxa horária, isto é, unidades de trabalho completas por hora (peças concluídas/hora). Vamos considerar como a taxa é determinada para os três tipos de produção: produção em lote, produção por encomenda e produção em massa. Nossa ponto de partida é o tempo de ciclo.

Tempo de ciclo. Para qualquer operação de produção o *tempo de ciclo* (T_c) é definido como o tempo que uma unidade de trabalho leva para ser processada ou montada. É o tempo entre o início do processamento (ou montagem) de uma unidade e o início da próxima. T_c é o tempo que uma peça passa na máquina, mas nem todo esse tempo é produtivo (lembre-se do estudo de Merchant, Seção 2.2.2). Em uma operação de produção típica, como a usinagem, T_c consiste de (1) tempo efetivo de usinagem, (2) tempo de manuseio de peças de trabalho e (3) tempo de manuseio de ferramentas por peça. Como uma equação, pode-se expressar dessa forma:

$$T_c = T_o + T_h + T_{th} \quad (3.1)$$

em que T_c é o tempo de ciclo (minutos/parte concluída), T_o é o tempo efetivo do processamento ou montagem (minutos/peça concluída), T_h é o tempo de manuseio (minutos/peça concluída) e T_{th} é o tempo de manuseio de ferramentas (minutos/peça concluída). O tempo de manuseio de ferramentas é o tempo que se leva trocando as ferramentas quando elas se desgastam, mudando de uma ferramenta para a próxima, o tempo de indexação de ferramentas para inserções indexáveis ou para ferramentas em um torno mecânico ou torre de furação é o de reposicionamento de ferramenta para um próximo passo e assim por diante. Algumas dessas atividades de manuseio de ferramentas não ocorrem em todos os ciclos; dessa forma, devem ser distribuídas sobre o número de peças entre suas ocorrências para se obter um tempo médio por peça.

Cada um dos termos T_o , T_h e T_{th} tem sua contraparte nos outros tipos de produção discreta. Há uma porção do ciclo em que a peça está de fato sendo processada (T_o), uma porção do ciclo em que a peça está sendo manuseada (T_h) e há, em média, uma parte em que as ferramentas estão sendo ajustadas ou substituídas (T_{th}). Portanto, podemos generalizar a Equação (3.1) para cobrir mais operações da produção.

Produção em lote e por encomenda. Na produção em lote, o tempo de processamento de um lote de Q unidades de trabalho é a soma do tempo de preparo e do tempo de processamento; isto é,

$$T_b = T_{su} + QT_c \quad (3.2)$$

em que T_b é o tempo de processamento do lote (minutos), T_{su} é o tempo de preparo do lote (minutos), Q é a quanti-

dade de lotes (peças concluídas), e T_c é o tempo de ciclo por unidade de trabalho (minutos/ciclo). Assumimos que uma unidade de trabalho é terminada a cada ciclo e por isso T_c também tem unidades em minutos/peça concluída. Caso mais de uma peça seja produzida por ciclo, então a Equação (3.2) deve ser ajustada. Dividindo-se o tempo de lote pela quantidade de lotes, temos o tempo médio de produção por unidade de trabalho T_p para uma dada máquina:

$$T_p = \frac{T_b}{Q} \quad (3.3)$$

A taxa média de produção para a máquina é simplesmente o inverso do tempo de produção. Ela é geralmente expressa como uma taxa horária:

$$R_p = \frac{60}{T_p} \quad (3.4)$$

em que R_p é a taxa horária de produção (peças concluídas/hora), T_p é o tempo médio de produção por minuto (minutos/peça concluída) e a constante 60 converte os minutos em horas.

Para a produção por encomenda, quando a quantidade Q é igual a 1, o tempo de produção por unidade de trabalho é a soma dos tempos de preparo e de ciclo:

$$T_p = T_{su} + T_c \quad (3.5)$$

Quando a quantidade é maior que 1, a taxa de produção é determinada como no caso da produção em lote discutido acima.

Produção em massa. Para a produção em massa do tipo quantitativo podemos dizer que a taxa de produção é igual à taxa de ciclo da máquina (inverso da operação de tempo de ciclo) depois que a produção é iniciada e os efeitos do tempo de preparo tornam-se insignificantes. Isto é, à medida que Q fica muito grande,

$$(T_{su}/Q) \rightarrow 0 \text{ e} \\ R_p \rightarrow R_c = \frac{60}{T_c} \quad (3.6)$$

em que R_c é a taxa do ciclo de operação da máquina (peças concluídas/hora) e T_c é o tempo do ciclo de operação (minutos/peça concluída).

Para produção em massa de fluxo em linha, a taxa de produção se aproxima da taxa de ciclo da linha de produção, não levando em conta o tempo de preparo. Entretanto, a operação das linhas de produção é complicada pela interdependência de suas estações de trabalho. Uma complicação é que geralmente é impossível dividir todo o trabalho de forma igual entre todas as estações de trabalho na linha

de produção; dessa forma, uma estação acaba com o tempo de operação maior e determina o ritmo de toda a linha. O termo *operação gargalo* é usado algumas vezes em referência a essa estação. Também incluído no tempo de ciclo está o tempo usado para mover as peças de uma estação para a próxima no fim de cada operação. Em muitas linhas de produção, todas as unidades de trabalho na linha são movidas de modo simultâneo, cada uma para sua respectiva estação seguinte. Levando essas fábricas em conta, o tempo de ciclo de uma linha de produção é o mais longo tempo de processamento (ou montagem) somado ao tempo de transferência das unidades de trabalho entre as estações. Isso pode ser escrito como

$$T_c = T_r + \text{Máx } T_o \quad (3.7)$$

em que T_c é o tempo de ciclo da linha de produção (minutos/ciclo), T_r é o tempo para transferir as unidades de trabalho entre as estações a cada ciclo (minutos/ciclo) e $\text{Máx } T_o$ é o tempo de operação na estação gargalo (o tempo máximo de operação para todas as estações da linha, minutos/ciclo). Teoricamente, a taxa de produção pode ser determinada tomando-se o inverso de T_c como

$$R_c = \frac{60}{T_c} \quad (3.8)$$

em que R_c é a taxa de produção ideal ou teórica, mas vamos chamá-la de taxa de ciclo para sermos mais precisos (ciclos/hora), e T_c é o tempo de ciclo ideal da Equação (3.7) (minutos/ciclo).

As linhas de produção são de dois tipos básicos: (1) manuais e (2) automatizadas. Na operação de linhas de produção automatizadas um complicador é a confiabilidade. Baixa confiabilidade reduz o tempo de produção disponível na linha, o que resulta da interdependência das estações de trabalho na linha automatizada, que é forçada a parar quando uma estação de trabalho quebra. A taxa média real de produção R_p é reduzida a um valor que está, em geral, bem abaixo da R_c ideal dada pela Equação (3.8). Discutimos confiabilidade e parte de sua terminologia na Seção 3.1.3. O efeito da confiabilidade em linhas de produção automatizada é examinado nos capítulos 16 e 17.

3.1.2 Capacidade de produção

Mencionamos a capacidade de produção em nossa discussão na Seção 2.4.3. A capacidade de produção é definida como a taxa máxima de saída que uma unidade de produção (linha de produção, centro de trabalho ou grupo de centros de trabalho) é capaz de produzir sob um dado conjunto de condições operacionais. A unidade de produção geralmente se refere a uma fábrica ou planta e, dessa forma, o termo *capacidade da fábrica* é bastante usado

para essa medida. Como já dissemos, as supostas condições operacionais referem-se ao número de expedientes por dia (um, dois ou três), número de dias na semana (ou mês) em que a fábrica trabalha, níveis de emprego e assim por diante.

O número de horas de operação da fábrica por semana é um fator importante para a definição da capacidade da fábrica. Para a produção química contínua, em que as reações ocorrem em altas temperaturas, a fábrica opera em geral 24 horas/dia, sete dias/semana. Para uma montadora de automóveis a capacidade é definida, de forma típica, por um ou dois expedientes. Na produção discreta, uma tendência crescente é definir a capacidade da fábrica para o total de sete dias por semana, 24 horas/dia. Isso é o máximo de tempo disponível (168 horas/semana) e, se a fábrica trabalha menos horas do que o máximo, então sua capacidade não está sendo utilizada de maneira completa.

Medidas quantitativas de capacidade de fábrica podem ser desenvolvidas tomando por base os modelos de taxa de produção derivados anteriormente. Sendo PC a capacidade de produção de uma dada fábrica sob consideração e a medida de capacidade sendo o número de unidades produzidas por semana; n , o número de máquinas ou centros de trabalho na fábrica. Um *centro de trabalho* é um sistema de produção na fábrica que consiste, de modo geral, de um trabalhador e uma máquina, podendo ser também uma máquina automática sem trabalhador ou vários trabalhadores atuando juntos em uma linha de produção. Um centro de trabalho é capaz de produzir uma taxa R_p de unidades/hora, como definido na Seção 3.1.1, e cada um deles funciona por um determinado número de horas por expediente H_{sh} (8 horas/expediente é comum em produção). A provisão para o tempo de preparo está incluída em R_p de acordo com a Equação (3.4). Deixe S_w indicar o número de expedientes por semana. Esses parâmetros podem ser combinados para calcular a capacidade de produção da fábrica,

$$PC = nS_w H_{sh} R_p \quad (3.9)$$

em que PC é a capacidade de produção semanal da fábrica (unidades produzidas/semana), n é o número de centros de trabalho atuando em produção paralela na fábrica, S_w é o número de expedientes por período (expediente/semana), H_{sh} é igual a horas/expediente (horas) e R_p é a taxa horária de produção de cada centro de trabalho (unidades produzidas/hora). Ainda que tenhamos usado uma semana como o período de tempo de interesse, a Equação (3.9) pode ser facilmente adaptada para outros períodos (meses, anos etc.). Como nas equações anteriores, nossa suposição é a de que as unidades processadas pelo grupo de centros de trabalho são homogêneas e, portanto, o valor de R_p é o mesmo para todas as unidades produzidas.

EXEMPLO 3.1**Capacidade de produção**

A seção de torneamento automático tem seis máquinas, todas dedicadas à produção da mesma peça. A seção funciona com dez turnos/semana. O número de horas por expediente é, em média, oito. A taxa média de produção de cada máquina é de 17 unidades/hora. Determine a capacidade de produção semanal da seção do torno automático.

Solução: Usando a Equação (3.9),

$$PC = 6 (10) (8.0) (17) = 9.160 \text{ unidades produzidas/semana}$$

Se incluirmos a possibilidade na qual cada unidade de trabalho requer n_o operações em sua sequência de processamento, com cada operação demandando um novo preparo, seja na mesma máquina ou em uma diferente, então a equação da capacidade da fábrica deve ser alterada para

$$PC = \frac{nS_w H_{sh} R_p}{n_o} \quad (3.10)$$

em que n_o é o número de operações distintas às quais as unidades de trabalho são submetidas, e os outros termos têm o mesmo significado de antes.

A Equação (3.10) indica os parâmetros de operação que afetam a capacidade da fábrica. As alterações que podem ser feitas para aumentar ou diminuir a capacidade da fábrica a curto prazo são:

1. Alterar o número de turnos por semana S_w . Por exemplo, expedientes aos sábados podem ser autorizados para aumentar a capacidade por algum tempo.
2. Alterar o número de horas trabalhadas por expediente H_{sh} . Por exemplo, horas extras em cada expediente regular podem ser autorizadas para aumentar a capacidade.
3. Aumentar o número de centros de trabalho, n , na fábrica, o que pode ser conseguido com equipamentos que não estavam em uso antes, adquirindo-se novas máquinas e contratando novos trabalhadores. Diminuir a capacidade é mais fácil, exceto pelo impacto econômico e social: os trabalhadores devem ser dispensados e as máquinas desativadas.
4. Aumentar a taxa de produção, R_p , fazendo melhorias nos métodos ou processos tecnológicos.
5. Reduzir o número de operações, n_o , necessárias por unidade de trabalho por meio de operações combinadas, simultâneas ou integração de operações (Seção 1.4.2, estratégias 2, 3 e 4).

Esse modelo de capacidade supõe que todas as n máquinas produzem em cem por cento do tempo e que não há

operações gargalo devido a variações nas rotas do processamento que inibam a fluidez do trabalho pela fábrica. Em parques reais de produção em lote, nos quais cada produto tem uma sequência de operações diferentes, é improvável que o trabalho seja distribuído entre os recursos produtivos (máquinas) de forma perfeitamente equilibrada. Como consequência, há algumas operações que são utilizadas de forma completa enquanto outras, às vezes, ficam aguardando trabalho. Examinemos o efeito de utilização.

3.1.3 Utilização e disponibilidade

A utilização se refere a quanto uma unidade de produção produz em relação a sua capacidade. Expressando como uma equação,

$$U = \frac{Q}{PC} \quad (3.11)$$

em que U é a utilização da fábrica, Q é a quantidade real produzida pela fábrica em um dado período de tempo (ou seja, peças concluídas/semana) e PC é a capacidade de produção para o mesmo período (peças concluídas/semana).

A utilização pode ser avaliada para uma fábrica inteira, uma única máquina na fábrica ou qualquer outro recurso produtivo (ou seja, trabalho). Por conveniência, é em geral definida como a proporção de tempo em que a fábrica está operando em relação ao tempo disponível na definição da capacidade e é normalmente expressa em porcentagem.

EXEMPLO 3.2**Utilização**

Uma máquina de produção funciona 80 horas/semana (dois expedientes, cinco dias) em total capacidade. Sua taxa de produção é de 20 unidades/hora. Durante determinada semana, a máquina produziu mil peças e ficou ociosa o resto do tempo. (a) Determine a capacidade de produção da máquina. (b) Qual foi a utilização da máquina durante a semana em questão?

Solução: (a) A capacidade da máquina pode ser determinada, a partir do dado de 80 horas/semana, da seguinte maneira:

$$PC = 80(20) = 1.600 \text{ unidade/semana}$$

(b) A utilização pode ser determinada como a razão entre o número de peças produzidas pela máquina e sua capacidade.

$$U = 1.000 / 1.600 = 0,625 (62,5\%)$$

Outra forma de avaliar a utilização é pelo tempo em que a máquina foi de fato usada durante a semana. Para produzir mil unidades, a máquina operou

$$H = \frac{1.000 \text{ pc}}{20 \text{ pc/h}} = 50 \text{ h}$$

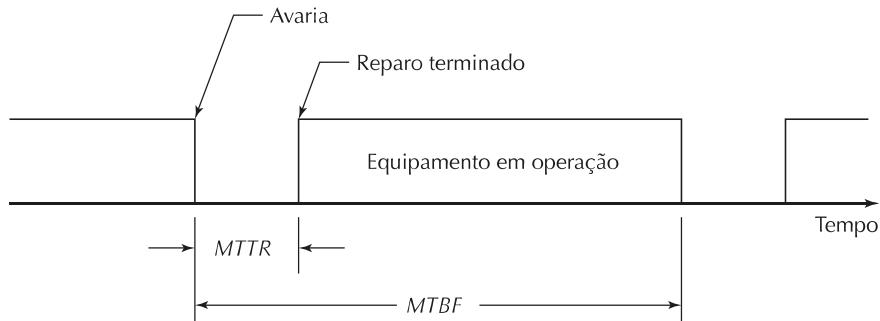
A utilização é definida de acordo com as 80 horas disponíveis.

$$U = 50/80 = 0,625 \quad (62,5\%)$$

A disponibilidade é uma medida comum para a confiabilidade do equipamento, apropriada sobretudo aos equipamentos de produção automatizada. É definida a partir de dois outros termos de confiabilidade: *tempo médio entre falhas* (do inglês, *mean time between failures* — MTBF) e *tempo médio de reparo* (do inglês, *mean time to repair* — MTTR). O MTBF é o espaço médio de tempo em que o equipamento funciona entre avarias e o MTTR é o tempo médio necessário para prestar a manutenção no equipamento e colocá-lo de volta em operação quando ocorre uma avaria, como ilustra a Figura 3.1. A disponibilidade é definida como

$$A = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF} \quad (3.12)$$

Figura 3.1 Escala de tempo mostrando o emprego de MTBF e MTTR para definir a disponibilidade A



3.1.4 Tempo de produção

No ambiente competitivo dos negócios modernos, a habilidade de uma empresa de produção de entregar um produto ao consumidor no menor tempo possível muitas vezes ganha o pedido. Esse tempo é referido como o tempo de produção. De forma específica, definimos o *tempo de produção* (do inglês, *manufacturing lead time* — MLT) como o tempo total necessário para processar uma dada peça ou um dado produto pela fábrica, incluindo qualquer tempo perdido devido a atrasos, tempo gasto no armazenamento, problemas de confiabilidade e assim por diante. Examinemos os componentes do MLT.

A produção normalmente consiste de uma sequência de processamentos individuais e operações de montagem. Entre as operações, há manuseio de materiais, armazena-

mento, inspeções e outras atividades não produtivas. Dividida-se, então, as atividades de produção em duas categorias principais: elementos operacionais e não operacionais. Uma operação é realizada em uma unidade de trabalho quando ela está na máquina de produção. Os elementos não operacionais incluem manuseio, armazenamento temporário, inspeções e outras fontes de atraso quando a unidade de trabalho não está na máquina. Tome T_c como tempo de ciclo da operação em uma dada máquina ou estação de trabalho e T_{no} como o tempo não operacional associado à mesma máquina. Além disso, suponhamos que o número de operações separadas (máquinas) pelas quais a unidade de trabalho deve passar seja igual a n_o . Se tomarmos a produção em lote, então há Q unidades de trabalho no lote. Uma configuração é em geral necessária para pre-

EXEMPLO 3.3

Efeito da utilização e da disponibilidade na capacidade da fábrica

Considere o Exemplo 3.1. Suponhamos que os mesmos dados daquele exemplo fossem aplicados, mas que a disponibilidade das máquinas A fosse igual a 90 por cento e a utilização U fosse igual a 80 por cento. Com esses dados adicionais, calcule a produção esperada da fábrica.

Solução: A Equação (3.9) pode ser alterada para incluir a disponibilidade e utilização como

$$Q = AU(nS_w H_{sh} R_p) \quad (3.13)$$

em que A é a disponibilidade e U é a utilização. Combinando isso com os novos dados, temos

$$Q = 0,90(0,80)(6)(10)(8)(17) = 5.875 \text{ produzidas/semana}$$

parar cada máquina de produção para o produto em particular, o que requer um tempo igual a T_{su} . Dados esses termos, podemos definir o tempo de produção como

$$MLT_j = \sum_{i=1}^{n_{oj}} (T_{sui} + Q_j T_{cji} + T_{noji}) \quad (3.14)$$

em que MLT_j é o tempo de produção da peça ou do produto (minutos), T_{sui} é o tempo de preparo para a operação i (minutos), Q_j é a quantidade de peças ou produtos j no lote sendo processado (peças concluídas), T_{cji} é o tempo de ciclo para a operação i (minutos/peça concluída), T_{noji} é o tempo não operacional associado à operação i (minutos) e i indica a sequência de operações no processamento; $i = 1, 2, \dots, n_{oj}$. A equação de MLT não inclui o tempo em que a matéria-prima permanece armazenada antes de iniciada sua produção.

Para simplificar e generalizar nosso modelo, vamos assumir que todos os tempos de preparo, tempos de ciclo de operação e tempos não operacionais são iguais para as máquinas n_{oj} . Além disso, vamos supor que as quantidades das peças ou dos produtos dos lotes processados por toda a fábrica são iguais e que são todos processados pelo mesmo número de máquinas, de modo que n_{oj} seja igual a n_o . Com essas simplificações, a Equação (3.14) torna-se:

$$MLT = n_o(T_{su} + QT_c + T_{no}) \quad (3.15)$$

em que MLT é o tempo médio de produção para uma peça ou um produto (minutos). Em uma fábrica de produção em lote real, que essa equação pretende representar, os termos n_o , Q , T_{su} , T_c e T_w variariam por produto e por operação. Essas variações podem ser explicadas ponderando-se, de maneira correta, valores médios dos vários termos. O procedimento de nivelamento é explicado no Apêndice no fim deste capítulo.

EXEMPLO 3.4

Tempo de produção

Uma certa peça é produzida em um lote de cem unidades. O lote deve passar por cinco operações para completar o processamento das peças. O tempo médio de preparo é de três horas/operação, e o tempo médio de operação é de seis minutos (0,1 hora). O tempo não operacional médio de manuseio, atrasos, inspeções etc. é de sete horas para cada operação. Determine quantos dias serão necessários para completar o lote, supondo-se que a fábrica funcione em expedientes de oito horas/dia.

Solução: O tempo de produção é calculado pela Equação (3.15).

$$MLT = 5 (3 + 100 \times 0,1 + 7) = 100 \text{ horas}$$

Em 8 horas/dia, isso equivale a $100/8 = 12,5$ dias.

A Equação (3.15) pode ser adaptada para a produção por encomenda e para a produção em massa, com ajustes nos valores dos parâmetros. Para a produção por enco-

menda em que o tamanho do lote é um ($Q = 1$), a Equação (3.15) fica

$$MLT = n_o(T_{su} + T_c + T_{no}) \quad (3.16)$$

Para a produção em massa, o termo Q na Equação (3.15) é muito grande e domina os outros termos. Para produção em massa do tipo quantidade em que muitas unidades são produzidas em uma única máquina ($n_o = 1$), o MLT torna-se simplesmente o tempo de ciclo de operação para a máquina assim que o preparo é terminado e a produção se inicia.

Para produção em massa de fluxo em linha, toda a linha de produção é preparada com antecedência. Além disso, o tempo não operacional entre as etapas de processamento é apenas o tempo de transferência T_r para mover a peça ou o produto de uma estação de trabalho para a próxima. Se as estações de trabalho estão integradas, de modo que todas elas processem suas próprias unidades de trabalho, então o tempo para completar todas as operações é o que cada unidade de trabalho leva para progredir por todas as estações da linha. A estação com o maior tempo de operação define o ritmo para todas as estações:

$$MLT = n_o(T_r + \text{Máx } T_o) = n_o T_c \quad (3.17)$$

em que MLT é o tempo entre o início e o término de uma unidade de trabalho na linha (minutos), n_o é o número de operações da linha, T_r é o tempo de transferência (minutos), $\text{Máx } T_o$ é o tempo de operação do gargalo (minutos) e T_c é o tempo de ciclo da linha de produção (minutos/peça concluída). Tomemos da Equação (3.7). Como o número de estações é igual ao número de operações ($n = n_o$), a Equação (3.17) também pode ser escrita como

$$MLT = n(T_r + \text{Máx } T_o) = nT_c \quad (3.18)$$

em que os símbolos têm o mesmo significado que os descritos acima e n (número de estações de trabalho ou máquinas) está no lugar do número de operações n_o .

3.1.5 Material em processo

Material em processo (do inglês, *work-in-process* — WIP) é a quantidade de peças ou produtos, localizados na fábrica, que estão sendo processados ou estão entre as operações de processamento. WIP é o inventário do que está no estado de ser transformado de matéria-prima em produto acabado. Uma medida aproximada do material em processo pode ser obtida da seguinte forma, usando termos já definidos:

$$WIP = \frac{AU(PC)(MLT)}{S_w H_{sh}} \quad (3.19)$$

em que WIP é o material em processo na fábrica (peças concluídas), A é a disponibilidade, U é a utilização, PC é a

capacidade de produção da fábrica (peças concluídas/semana), MLT é o tempo de produção (semana), S_w é o número de turnos por semana (turnos/semana) e H_{sh} são as horas por turno (horas/turno). A Equação (3.19) declara que o nível de WIP é igual à taxa com que as peças fluem pela fábrica multiplicado pelo tempo que elas gastam na fábrica. As unidades de tempo para $(PC)/S_w H_{sh}$ devem ser consistentes com as unidades do MLT . Examinamos os custos desse inventário em processo na Seção 25.5.2 (disponível no Companion Website).

O material em processo representa um investimento da empresa, mas um investimento que não pode ser transformado em receita até que todo o processamento seja terminado. Muitas companhias de produção sustentam custos maiores porque o trabalho se mantém em processo na fábrica durante muito tempo.

3.2 CUSTOS DA PRODUÇÃO

As decisões em sistemas de produção e automação são geralmente baseadas nos custos relativos das alternativas. Nesta seção examinamos como esses custos e seus fatores são determinados.

3.2.1 Custos fixos e variáveis

Os custos da produção podem ser classificados em duas categorias principais: (1) custos fixos e (2) custos variáveis. *Custo fixo* é aquele que se mantém constante para qualquer nível de resultado da produção. Os exemplos incluem o custo das instalações da fábrica e de equipamen-

tos de produção, seguros e impostos de propriedade. Todos os custos fixos podem ser expressos em quantidades anuais. Despesas como seguro e impostos de propriedade ocorrem de forma natural como custos anuais. Investimentos de capital, como um prédio ou equipamentos, podem ser convertidos para os custos anuais uniformes equivalentes usando-se os fatores das taxas de juros.

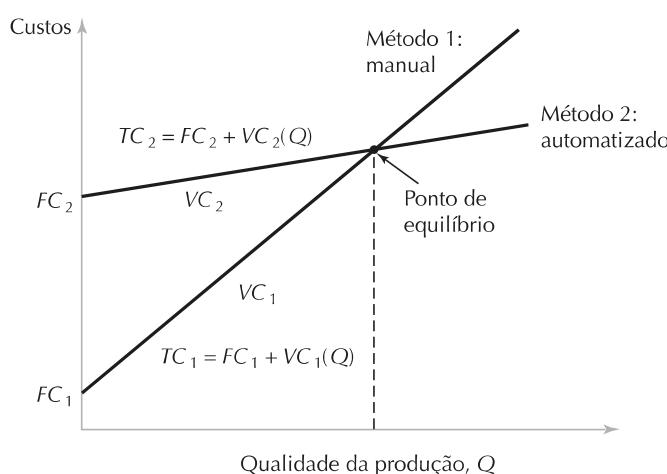
Custo variável é aquele que varia em proporção ao nível de resultados da produção. Conforme a produção aumenta, custos variáveis aumentam. Exemplos incluem mão de obra direta, matéria-prima e energia elétrica para operar equipamentos de produção. O conceito ideal de custo variável é que seja diretamente proporcional ao nível de resultados da produção. Quando custos fixos e variáveis são adicionados, temos a seguinte equação de custo total:

$$TC = FC + VC(Q) \quad (3.20)$$

em que TC é o custo anual total (\$/ano), FC é o custo anual fixo (\$/ano), VC é o custo variável (\$/peça concluída) e Q é o volume anual produzido (peças concluídas/ano).

Quando comparamos os métodos manuais e automatizados (Seção 1.4), é típico que o custo fixo do método automatizado seja alto em relação ao do método manual, e o custo variável da automação seja baixo em relação ao método manual, como mostrado na Figura 3.2. Assim, o método manual tem uma vantagem de custo em uma escala de pequenas quantidades, enquanto a automação tem vantagem para grandes quantidades. Isso reforça os argumentos apresentados na Seção 1.4.1 sobre a adequação do trabalho manual para determinadas situações de produção.

Figura 3.2 Custos fixos e variáveis como funções dos resultados da produção para métodos de produção manual e automatizados



3.2.2 Mão de obra direta, matéria-prima e gastos gerais

Fixos *versus* variáveis não são as únicas classificações possíveis dos custos de produção. Uma classificação alternativa separa os custos em (1) mão de obra direta, (2) matéria-prima e (3) gastos gerais. Essa é muitas vezes uma maneira mais conveniente de analisar custos em produção. O *custo da mão de obra direta* é a soma dos salários e benefícios pagos aos trabalhadores que operam os equipamentos de produção e realizam tarefas de processamento e montagem. O *custo de matéria-prima* é o custo de toda matéria-prima utilizada para fazer o produto. No caso de uma estamparia, a matéria-prima consiste no estoque de folhas de aço usadas para fazer a estampagem. Para o laminador que fez as folhas de aço, a matéria-prima é o minério de ferro ou a sucata de ferro dos quais a folha de aço é laminada. No caso da montagem de produtos, os materiais incluem os componentes fabricados por empresas fornecedoras. Assim, a definição de “matéria-prima” depende da companhia. O produto final de uma companhia pode ser matéria-prima para outra. Em termos de custos fixos e variáveis, a mão de obra direta e a matéria-prima devem ser consideradas variáveis.

Os gastos gerais são todas as outras despesas associadas ao funcionamento da empresa de produção. São divididos em duas categorias: (1) gastos gerais da fábrica e (2) gastos gerais corporativos. Os *gastos gerais da fábrica* consistem nos custos operacionais da fábrica que não se-

jam a mão de obra direta nem a matéria-prima, como as despesas da fábrica listadas na Tabela 3.1, e são tratados como custo fixo ainda que alguns dos itens em nossa lista possam ser correlacionados com o nível dos resultados de produção da fábrica. Os *gastos gerais corporativos* são os custos não relacionados às atividades de produção da companhia, como as despesas corporativas na Tabela 3.2. Muitas companhias operam mais de uma fábrica e essa é uma das razões da divisão dos gastos gerais em categorias de fábrica e corporativa. Fábricas diferentes podem ter gastos gerais significativamente diferentes.

J. Black [1] fornece alguns percentuais típicos para os diferentes tipos de gastos corporativos e de produção; esses são apresentados na Figura 3.3. É possível fazer muitas observações sobre esses dados. Primeiro, o custo total de produção representa apenas cerca de 40 por cento do preço de venda do produto. Os gastos gerais corporativos e o custo total da produção são aproximadamente iguais. Segundo, a matéria-prima (inclusive peças compradas) representa o maior percentual do custo total da produção, cerca de 50 por cento. E, terceiro, a mão de obra direta é uma proporção relativamente pequena do custo total de produção: 12 por cento de custo de produção e cerca de cinco por cento do preço de venda.

Os gastos gerais podem ser alocados de acordo com um número de bases diferentes, incluindo o custo da mão de obra direta, o custo dos materiais, as horas de mão de obra direta e o espaço. O mais comum na indús-

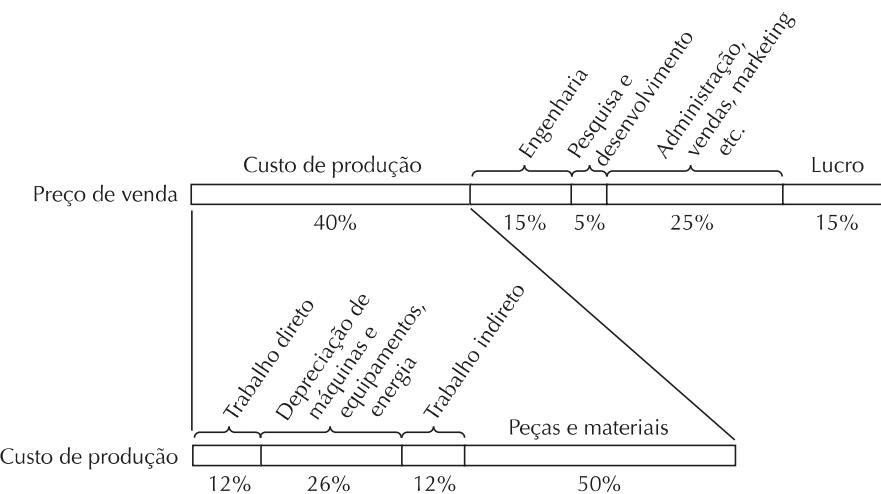
Tabela 3.1 Despesas típicas com gastos gerais da fábrica

Supervisão da fábrica	Impostos cabíveis	Depreciação da fábrica
Chefes de linha	Seguro	Depreciação de equipamentos
Equipe de manutenção	Aquecimento e refrigeração	Benefícios extras
Serviços de custódia	Luz	Manuseio de materiais
Equipe de segurança	Energia para as máquinas	Envio e recebimento
Almoxarife	Serviços de folha de pagamento	Apoio administrativo

Tabela 3.2 Despesas típicas com gastos gerais corporativos

Executivos	Engenharia	Impostos cabíveis
Marketing e vendas	Pesquisa e desenvolvimento	Escritórios
Departamento de contabilidade	Demais equipes de suporte	Equipe de segurança
Departamento financeiro	Seguro	Aquecimento e refrigeração
Advogados	Benefícios extras	Iluminação

Figura 3.3 Discriminação dos custos de um produto fabricado [1]



tria é o custo da mão de obra direta, que usaremos aqui para ilustrar como os gastos gerais são alocados e posteriormente para calcular fatores como o preço de venda do produto.

O procedimento de alocação (simplificado) é o seguinte: para o ano mais recente (ou para os anos), todos os custos são unificados e classificados em quatro categorias — (1) mão de obra direta, (2) materiais, (3) gastos gerais da fábrica e (4) gastos gerais corporativos. O objetivo é determinar a *taxa de gastos gerais* (também chamada de *taxa de encargos*) que pode ser usada no ano seguinte para alocar custos gerais para um processo ou produto como uma função dos custos de mão de obra direta associados ao processo ou produto. Em nosso tratamento, taxas separadas de gastos gerais serão desenvolvidas para gastos gerais da fábrica e gastos gerais corporativos. A *taxa de gastos gerais da fábrica* é calculada como a razão entre despesas com gastos gerais da fábrica (categoria 3) e as da mão de obra direta (categoria 1); isto é,

$$FOHR = \frac{FOHC}{DLC} \quad (3.21)$$

em que *FOHR* é a taxa de gastos gerais da fábrica, *FOHC* são os custos anuais dos gastos gerais da fábrica (\$/ano) e *DLC* são os custos anuais da mão de obra direta (\$/ano).

A *taxa de gastos gerais corporativos* é a razão entre as despesas com gastos gerais corporativos (categoria 4) e as da mão de obra direta:

$$COHR = \frac{COHC}{DLC} \quad (3.22)$$

em que *COHR* é a taxa de gastos gerais corporativos, *COHC* são os custos anuais dos gastos gerais corporativos

e *DLC* são os custos anuais da mão de obra direta (\$/ano). As duas taxas são geralmente expressas em porcentagem. Se o custo de material fosse usado como base de alocação, então ele seria usado como denominador nos dois casos. Vamos apresentar dois exemplos para ilustrar (1) como as taxas de gastos gerais são determinadas e (2) como são usadas para estimar custos de produção e estabelecer preços de venda.

EXEMPLO 3.5

Determinando taxas de gastos gerais

Suponha que todos os custos anuais de uma empresa de produção tenham sido compilados. O resumo é mostrado na tabela a seguir. A companhia administra duas fábricas diferentes além dos escritórios da sede.

Determine (a) a taxa de gastos gerais da fábrica para as duas fábricas e (b) a taxa de gastos gerais corporativos. Essas taxas serão usadas pela empresa para estimar os gastos do ano seguinte.

Categoria de despesa	Fábrica 1 (\$)	Fábrica 2 (\$)	Escritórios (\$)	Total (\$)
Mão de obra direta	800.000	400.000		1.200.000
Matéria-prima	2.500.000	1.500.000		4.000.000
Gasto de fábrica	2.000.000	1.100.000		3.100.000
Gasto corporativo			7.200.000	7.200.000
Total	5.300.000	3.000.000	7.200.000	15.500.000

Solução: (a) Uma taxa separada de gastos gerais deve ser determinada para cada fábrica. Para a fábrica 1, temos:

$$FOHR_1 = \frac{\$2.000.000}{\$800.000} = 2,5 = 250\%$$

Para a fábrica 2,

$$FOHR_2 = \frac{\$1.100.000}{\$400.000} = 2,75 = 275\%$$

(b) A taxa de gastos gerais corporativos é baseada no custo total da mão de obra direta das duas fábricas.

$$COHR = \frac{\$7.200.000}{\$1.200.000} = 6,0 = 600\%$$

EXEMPLO 3.6

Estimando custo de produção e estabelecendo preço de venda

Um pedido de 50 peças de um consumidor deve ser processado pela fábrica 1 do exemplo anterior. A matéria-prima e as ferramentas são fornecidas pelo consumidor. O tempo total de processamento das peças (incluindo tempo de preparo e outros trabalhos diretos) é de cem horas. O custo da mão de obra direta é de \$ 10/hora. A taxa de gastos gerais da fábrica é de 250 por cento e a taxa de gastos gerais corporativos é de 600 por cento.

(a) Calcule o custo do serviço.

(b) Qual preço deve ser cotado para um cliente em potencial se a companhia usa margem de lucro de dez por cento?

Solução:

(a) O custo da mão de obra direta para o serviço é igual a $(100 \text{ horas})(\$ 10/\text{hora}) = \$ 1.000$.

A taxa de gastos gerais da fábrica cobrada, de 250 por cento da mão de obra direta, é igual a $(\$ 1.000)(2,50) = \$ 2.500$. O custo total de fábrica da tarefa, incluindo os gastos gerais da fábrica alocados, é igual a $\$ 1.000 + \$ 2.500 = \$ 3.500$.

A taxa de gastos corporativos cobrada, de 600 por cento da mão de obra direta, é igual a $(\$ 1.000)(6,00) = \$ 6.000$. O custo total da tarefa incluindo os gastos gerais corporativos é igual a $\$ 3.500 + \$ 6.000 = \$ 9.500$.

(b) Se a companhia adota uma margem de lucro de dez por cento, o preço cotado para o consumidor seria igual a $(1,10)(\$ 9.500) = \$ 10.450$.

3.2.3 Custo do uso dos equipamentos

O problema com taxas de gastos gerais da maneira que as apresentamos aqui é que são baseadas apenas no custo do trabalho. Um operador de máquina que opera um antigo e pequeno torno mecânico cujo valor contábil é zero será custeado sob a mesma taxa de gastos gerais que um operador de um novo centro de usinagem CNC que acabou de ser comprado por \$ 500 mil. É evidente que o tempo no centro de usinagem é mais produtivo e deveria

ser avaliado por uma taxa maior. Se as diferenças nas taxas ou diferentes máquinas de produção não forem reconhecidas, os custos de produção não serão medidos de forma precisa pela estrutura de taxa de gastos gerais.

Para lidar com essa dificuldade, é apropriado dividir o custo de um trabalhador operando uma máquina em dois componentes: (1) mão de obra direta e (2) máquina. Associada a cada um há uma taxa aplicável de gastos gerais. Esses custos não se aplicam a todas as operações da fábrica, mas a centros de trabalho individuais. Um centro de trabalho pode ser: (1) um trabalhador e uma máquina, (2) um trabalhador e várias máquinas, (3) vários trabalhadores operando uma máquina ou (4) vários trabalhadores e várias máquinas. Em qualquer dos casos é vantajoso separar a despesa de trabalho da despesa de máquina quando se estima custo total de produção.

O custo da mão de direta consiste dos salários e benefícios pagos para operar o centro de trabalho. Os gastos gerais da fábrica aplicáveis alocados ao custo da mão de obra direta podem incluir impostos estaduais, alguns benefícios extras e supervisão da linha. O custo anual de máquina é o custo inicial, repartido ao longo de sua vida útil sob a incidência da taxa de retorno apropriada usada pela empresa. Isso é feito usando o fator de recuperação de capital, como

$$UAC = IC(A/P, i, n) \quad (3.23)$$

em que UAC é o custo anual uniforme equivalente (\$/ano); IC é o custo inicial da máquina (\$); e $(A/P, i, n)$ é o fator de recuperação de capital que converte o custo inicial no ano zero em uma série de valores anuais de fim de ano uniformes e equivalentes, em que i é a taxa de juros anual e n é o número de anos de vida útil do equipamento. Dados os valores de i e n , $(A/P, i, n)$ pode ser calculado da seguinte forma:

$$(A/P, i, n) = \frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (3.24)$$

Os valores de $(A/P, i, n)$ também podem ser encontrados em tabelas de juros amplamente disponíveis.

O custo anual uniforme pode ser expresso como uma taxa horária dividindo-se o custo anual pelo número de horas de uso anuais do equipamento. A taxa de gastos gerais da máquina é baseada nas despesas de fábrica que são atribuídas de forma direta à máquina; elas incluem a energia necessária ao funcionamento da máquina, o espaço, as despesas com manutenção e os reparos, e assim por diante. Para separar os itens de gastos gerais da fábrica da Tabela 3.1 entre trabalho e máquina, deve-se usar de discernimento, que por vezes é arbitrário. A taxa de custo total para o centro de trabalho é a soma dos custos de trabalho e de máquina, o que pode ser resumido, para um

centro de trabalho com um trabalhador e uma máquina, da seguinte maneira:

$$C_o = C_L(1 + FOHR_L) + C_m(1 + FOHR_m) \quad (3.25)$$

em que C_o é a taxa horária para a operação do centro de trabalho (\$/hora), C_L é a taxa de salários de mão de obra direta (\$/hora), $FOHR_L$ é a taxa de gastos gerais da fábrica para o trabalho, C_m é a taxa horária da máquina (\$/hora) e $FOHR_m$ é a taxa de gastos gerais da fábrica aplicáveis à máquina.

É da opinião do autor que as despesas com gastos gerais corporativos não devem ser incluídas na análise quando comparamos métodos de produção; sua inclusão não serve a nenhum outro propósito que não o de aumentar de maneira dramática o custo das alternativas. Fato é que essas despesas com gastos gerais corporativos estão presentes, seja ou não selecionada qualquer uma das alternativas. Por outro lado, quando se estimam os custos para a tomada de decisões sobre preços, os gastos gerais corporativos devem ser incluídos porque, a longo prazo, esses custos têm de ser recuperados por meio da receita gerada pela venda de produtos.

EXEMPLO 3.7

Custo horário de um centro de trabalho

Os dados fornecidos a seguir são de um centro de trabalho com um trabalhador e uma máquina: taxa de mão de obra direta igual a \$ 10/hora, taxa de gastos gerais da fábrica alocados ao trabalho igual a 60 por cento, investimento de capital em máquina de \$ 100 mil, vida útil da máquina de oito anos, taxa de retorno de 20 por cento,

valor residual em oito anos igual a zero e taxa de gastos gerais da fábrica aplicáveis à máquina igual a 50 por cento. O centro de trabalho será operado em um expediente de oito horas, 250 dias/ano. Determine a taxa horária apropriada para o centro de trabalho.

Solução: O custo de trabalho por hora é igual a $= \$ 10 (1 + 0,60) = \$ 16/\text{hora}$.

O custo do investimento da máquina deve ser anualizado, com a vida útil de oito anos e a taxa de retorno de 20 por cento. Primeiro, calcula-se o fator de recuperação de capital:

$$(A/P, 20\%, 8) = \frac{0,20 (1 + 0,20)^8}{(1 + 0,20)^8 - 1} = \frac{0,20(4,2998)}{4,2998 - 1} = 0,2606$$

Agora o custo anual uniforme para o custo inicial de \$ 100 mil pode ser determinado:

$$UAC = \$100.000(A/P, 20\%, 8) = 100.000(0,2606) = \$26.060,00/\text{yr}$$

O número de horas por ano é igual a $(8 \text{ horas/dia})(250 \text{ dias/ano}) = 2.000 \text{ horas/ano}$. Usando isso para dividir UAC , tem-se que $26.060/2.000 = \$ 13,03/\text{hora}$. Aplicando a taxa de gastos gerais da fábrica, temos

$$C_m(1 + FOHR_m) = \$13,03(1 + 0,5) = \$19,55/\text{h}$$

A taxa de custo total para o centro de trabalho é

$$C_o = 16 + 19,55 = \$35,55/\text{h.}$$

Referências

- [1] BLACK, J. T. *The design of the factory with a future*. New York, NY: McGraw-Hill, 1991.
- [2] GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.

Questões de revisão

- 3.1 Qual é o tempo de ciclo em uma operação de produção?
- 3.2 O que é um gargalo?
- 3.3 O que é capacidade de produção?
- 3.4 Como a capacidade de produção pode ser aumentada ou diminuída a curto prazo?
- 3.5 O que é utilização em uma fábrica?
- 3.6 O que é disponibilidade?
- 3.7 O que é tempo de produção?
- 3.8 O que é material em processo?
- 3.9 Como são distinguidos os custos fixos dos custos variáveis em produção?
- 3.10 Nomeie cinco típicos gastos gerais da fábrica.
- 3.11 Nomeie cinco típicos gastos gerais corporativos.

Problemas

Conceitos de produção e modelos matemáticos

- 3.1 Uma determinada peça passa por seis máquinas em uma fábrica de produção em lote. Os tempos de preparo e operação para cada máquina são fornecidos na tabela a seguir. O tamanho do lote é cem, e o tempo não operacional médio por máquina é de 12 horas. Determine (a) o tempo de produção e (b) a taxa de produção para a operação 3.

Máquina	Tempo de preparo (h)	Tempo de operação (min)
1	4	5
2	2	3,5
3	8	10
4	3	1,9
5	3	4,1
6	4	2,5

- 3.2 Suponha que a peça do exercício anterior seja produzida em grandes quantidades em uma linha de produção na qual é utilizado um sistema automático de manuseio das peças entre as máquinas. O tempo de transferência entre as estações é de 15 segundos. O tempo total necessário para preparar toda a linha é de 150 horas. Admita que os tempos de operação em cada máquina continuem os mesmos. Determine (a) o tempo de produção de uma peça saindo da linha, (b) a taxa de produção para a operação 3 e (c) a taxa de produção teórica para toda a linha de produção.
- 3.3 A peça habitual produzida em determinada fábrica de produção em lotes deve ser processada de forma sequencial por seis máquinas em média. Vinte novos lotes de peças são lançados a cada semana. O tempo médio de operação é de seis minutos, o tempo médio de preparo é de cinco horas, o tamanho médio do lote é igual a 25 peças e o tempo não operacional médio por lote é de 10 horas/máquina. Há 18 máquinas na fábrica trabalhando em paralelo, e cada uma pode ser preparada para qualquer tipo de trabalho realizado na fábrica, que opera em uma média de 70 horas produtivas por semana. A taxa de descarte é desprezível. Determine (a) o tempo de produção de uma peça habitual, (b) a capacidade da fábrica e (c) a utilização da fábrica. (d) Como você esperaria que o tempo não operacional fosse afetado pela utilização da fábrica?
- 3.4 Com base nos dados do problema anterior e em suas respostas, determine o nível médio de material em processo (o número de peças em processo) da fábrica.
- 3.5 Uma média de 20 novos pedidos são feitos por mês a uma fábrica. Em média, um pedido consiste de 50 peças
- que são processadas de forma sequencial por dez máquinas na fábrica. O tempo de operação por máquina para cada peça é de 15 minutos. O tempo não operacional por pedido em cada máquina gira em torno de oito horas, e o tempo de preparo necessário por pedido é de quatro horas. Há um total de 25 máquinas na fábrica trabalhando em paralelo. Cada uma das máquinas pode ser preparada para realizar qualquer tarefa da fábrica. Apenas 80 por cento das máquinas estão sempre prontas (os outros 20 por cento estão em manutenção ou sofrendo reparos). A fábrica funciona 160 horas por mês. Entretanto, o gerente da fábrica reclama que um total de cem horas extras por máquina deve ser autorizado a cada mês para que os compromissos de produção sejam atendidos. (a) Qual o tempo de produção para um pedido habitual? (b) Qual a capacidade da fábrica (em uma base mensal) e por que as horas extras têm de ser autorizadas? (c) Qual a utilização da fábrica de acordo com a definição dada no texto? (d) Determine o nível médio de material em processo (número de peças em processo) na fábrica.
- 3.6 O tempo médio entre falhas para uma certa máquina é de 250 horas e o tempo médio de reparo é de seis horas. Determine a disponibilidade da máquina.
- 3.7 Um milhão de unidades de certo produto devem ser produzidas anualmente em máquinas de produção dedicadas que trabalham 24 horas por dia, cinco dias por semana, 50 semanas por ano. (a) Se o tempo de ciclo de uma máquina para produzir uma peça é de um minuto, quantas dessas máquinas serão necessárias para acompanhar a demanda? Suponha que a disponibilidade, a utilização e a eficiência dos trabalhadores sejam iguais a cem por cento e que não haverá perdas de tempo de preparo. (b) Resolva a parte (a) com disponibilidade igual a 0,9.
- 3.8 O tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo em um determinado departamento da fábrica são de 400 horas e de oito horas, respectivamente. O departamento opera 25 máquinas em um expediente de oito horas por dia, cinco dias por semana, 52 semanas por ano. Toda vez que uma máquina sofre avaria custa à companhia \$ 200 por hora (por máquina) em perdas de receita. Uma proposta foi feita para a instalação de um programa de manutenção preventiva nesse departamento, que seria realizada nas máquinas durante a noite, de modo que não houvesse interrupções na produção durante o expediente regular. É esperado que o efeito desse programa seja a duplicação da média de MTBF e que metade do tempo de reparo emergencial, que normalmente é realizado durante o dia, seja durante a noite. O custo da equi-

- pe de manutenção será de \$ 1.500 por semana. Entretanto, uma redução da equipe de manutenção do expediente diurno resultará em uma economia durante o expediente normal de \$ 700 por semana. (a) Calcule a disponibilidade das máquinas do departamento antes e depois da instalação do programa de manutenção preventiva. (b) Determine quantas horas por ano as 25 máquinas no departamento estão sofrendo reparos tanto antes como depois da instalação do programa de manutenção preventiva. Nesse item e no item (c) ignore os efeitos de enfileiramento nas máquinas que podem ter de aguardar pela equipe de manutenção. (c) O programa de manutenção preventiva será autossuficiente em termos de economia dos custos de perda de receita?
- 3.9 Há nove máquinas na seção do torno automático de certa fábrica. O tempo de preparo em um torno automático é de cerca de seis horas. O tamanho médio do lote de peças processadas pela seção é igual a 90. O tempo médio de operação é de oito minutos. Sob as regras da fábrica, um operador pode ser atribuído a até três máquinas. Assim, há três operadores na seção para os nove tornos. Além dos operadores dos tornos, há dois preparadores que realizam exclusivamente o preparo das máquinas; eles são mantidos ocupados durante todo o expediente. A seção funciona em um expediente de oito horas por dia, seis dias por semana. Entretanto, uma média de 15 por cento do tempo de produção é perdida devido a avarias nas máquinas. Perdas com descarte são desprezíveis. O gerente de controle de produção afirma que a capacidade da seção deveria ser de 1.836 peças por semana, mas a produção atual é de cerca de apenas 1.440 unidades por semana. Qual é o problema? Propõha uma solução.
- 3.10 Certa fábrica é especializada em pedidos de um tipo único lidando com peças de complexidade média e alta. Uma peça típica é processada de forma sequencial por dez máquinas em lotes de tamanho igual a um. A fábrica tem um total de oito máquinas-ferramenta convencionais e funciona 35 horas por semana de tempo de produção. As máquinas-ferramenta são intercambiáveis de modo que possam ser preparadas para qualquer operação necessária para qualquer uma das peças. Os valores médios de tempo na peça são: usinagem por máquina igual a 0,5 hora, tempo de manuseio por máquina de 0,3 hora, tempo de troca de ferramenta por máquina de 0,2 hora, tempo de preparo por máquina de seis horas e tempo não operacional por máquina de 12 horas. Uma máquina programável nova, que é capaz de realizar as dez operações em um único preparo, foi comprada pela fábrica. A programação da máquina para essa peça necessitará 20 horas, mas pode ser feita *off-line* sem ocupar a máquina. O tempo de preparo será de dez horas. O tempo total de usinagem será reduzido para 80 por cento de seu valor anterior devido aos avançados algoritmos de controle de ferramentas; o tempo de manuseio será o mesmo que de uma máquina, e o total de trocas de ferramenta será reduzido em 50 por cento, pois será realizado de forma automática sob o controle do programa. Para essa única máquina é esperado que o tempo não operacional seja de 12 horas. (a) Determine o tempo de produção do método tradicional e do novo método. (b) Calcule a capacidade da fábrica para as seguintes alternativas: (i) um parque contendo as oito máquinas tradicionais e (ii) um parque contendo duas das novas máquinas programáveis. Suponha que os trabalhos habituais sejam representados pelos dados acima. (c) Determine o nível médio de material em processo para as duas alternativas na questão (b), se a fábrica operar em sua máxima capacidade. (d) Identifique quais das dez estratégias de automação (Seção 1.5.2) estão representadas (ou possivelmente representadas) pela nova máquina.
- 3.11 Uma fábrica produz caixas de papelão. A sequência de produção consiste de três operações: (1) corte, (2) vincagem e (3) impressão. Há três máquinas na fábrica, uma para cada operação. As máquinas são cem por cento confiáveis e operam da seguinte forma, quando em cem por cento de utilização: (1) no *corte*, grandes rolos de papelão são alimentados na máquina e cortados em unidades. Cada rolo contém material suficiente para 4 mil unidades. O tempo de ciclo da produção é de 0,03 minutos/unidade, mas leva 35 minutos para mudar os rolos entre os ciclos. (2) Na *vincagem*, as linhas são pressionadas nas unidades para permitir que estas sejam dobradas em caixas depois. As unidades da operação anterior, de corte, são divididas em lotes cuja quantidade inicial é de 2 mil unidades. A vincagem é realizada em 4,5 minutos por cem unidades. O tempo de mudança das matrizes na máquina de vincagem é igual a 30 minutos. (3) Na *impressão*, as unidades vincadas são impressas com rótulos para um consumidor em particular. As unidades da operação anterior, de vincagem, são divididas em lotes cuja quantidade inicial é de mil unidades. A taxa de ciclo de impressão é igual a 30 unidades por minuto. Entre os lotes, é necessária a mudança das placas de impressão, o que leva 20 minutos. É permitida a criação de um estoque de materiais em processo entre as máquinas 1 e 2 e entre as máquinas 2 e 3, de modo que essas máquinas possam operar da forma mais independente possível. Com base nessa informações, determine a produção máxima possível dessa fábrica durante uma semana de 40 horas em unidades terminadas/

semana (as unidades terminadas foram cortadas, vincadas e impressas). Suponha que a operação esteja em estado estacionário e não em inicialização.

Custos de operações de produção

- 3.12 Na teoria, qualquer fábrica tem um nível otimizado de produção. Suponha que uma fábrica tem custos fixos anuais FC iguais a \$ 2 milhões. O custo variável VC é relacionado em forma de função com a produção anual Q , de modo que possa ser descrita pela função $VC = \$ 12 + \$ 0,005Q$. O custo anual total é dado por $TC = FC + VC \times Q$. O preço unitário de venda do produto, P , é igual a \$ 250. (a) Determine o valor de Q que minimiza o custo unitário UC , em que $UC = TC/Q$, e calcule o lucro anual obtido pela fábrica para essa quantidade. (b) Determine o valor de Q que maximiza o lucro anual obtido pela fábrica e calcule o lucro para essa quantidade.
- 3.13 Os custos do ano mais recente de uma dada companhia de produção foram compilados, e o resumo é apresentado na tabela a seguir. A companhia administra duas fábricas diferentes além dos escritórios na sede. Determine (a) a taxa de gastos gerais da fábrica para cada uma das fábricas e (b) a taxa de gastos gerais corporativos. A empresa usará essas taxas para estimar os custos do ano seguinte.

Categoria de despesa	Fábrica 1 (\$)	Fábrica 2 (\$)	Escritórios (\$)
Mão de obra direta	1.000.000	1.750.000	
Matéria-prima	3.500.000	4.000.000	
Gastos de fábrica	1.300.000	2.300.000	
Gastos corporativos			5.000.000

- 3.14 A taxa horária para um dado centro de trabalho deve ser determinada tendo por base os seguintes dados: custo de mão de obra direta de \$ 15/hora; a taxa de gastos gerais da fábrica aplicáveis ao trabalho de 35 por cento; o investimento de capital em máquinas de \$ 200 mil; a vida útil da máquina de cinco anos; a taxa de retorno de 15 por cento; o valor residual em cinco anos igual a zero; e a taxa de gastos gerais da fábrica aplicáveis às máquinas de 40 por cento. O centro de trabalho funcionará em dois expedientes de oito horas/dia, 250 dias por ano. Determine a taxa horária apropriada para o centro de trabalho.
- 3.15 No problema anterior, se a carga de trabalho da fábrica só consegue justificar a operação de um expe-

diente, determine a taxa horária aproximada do centro de trabalho.

- 3.16 Na operação de uma determinada máquina, um trabalhador é requisitado a um custo de mão de obra direta de \$ 10/hora. A taxa de gastos gerais de fábrica aplicável é de 50 por cento; o investimento de capital no sistema é igual a \$ 250 mil; a vida útil esperada é de dez anos; não há valor residual no fim desse período; e as taxas de gastos gerais de fábrica aplicáveis às máquinas são de 30 por cento. A unidade de trabalho vai funcionar 2 mil horas/ano. Use uma taxa de retorno de 25 por cento para determinar a taxa horária apropriada para essa unidade de trabalho.
- 3.17 No problema anterior, suponha que a máquina será operada em três expedientes, ou 6 mil horas/ano, em vez de 2 mil horas/ano. Note o efeito do aumento da utilização da máquina na taxa horária comparada à taxa determinada no problema anterior.
- 3.18 O ponto de equilíbrio deve ser determinado para dois métodos de produção, um manual e outro automatizado. O método manual requer dois trabalhadores custando \$ 9/hora cada; juntos eles produzem a uma taxa de 36 unidades/hora. O método automatizado tem um custo inicial de \$ 125 mil, uma vida útil de quatro anos, valor residual igual a zero e custos anuais de manutenção de \$ 3 mil. Nenhum trabalho (exceto o de manutenção) é necessário para o funcionamento da máquina, mas a energia necessária é de 50 kW (em produção). O custo da energia elétrica é de \$ 0,05/kWh. Se a taxa de produção da máquina automática é de cem unidades/hora, determine o ponto de equilíbrio para os dois métodos, usando uma taxa de retorno de 25 por cento.

Apêndice A3: procedimentos de nivelamento nos modelos de produção

Como indicado na apresentação dos modelos de produção na Seção 1.1, procedimentos de nivelamento especiais são necessários para reduzir as variações inerentes aos dados reais de fábrica para valores únicos de parâmetros usados em nossas equações. Este apêndice explica os procedimentos de nivelamento.

Uma média aritmética contínua é usada para calcular os valores de quantidade de lote, Q , e o número de operações (máquinas) nas rotas do processamento, n_Q . Deixe n_Q ser igual ao número de lotes dos vários modelos de peças ou produtos a serem considerados. Isso pode ser o número de lotes processados pela fábrica durante certo período de tempo (ou seja, semana, mês, ano) ou uma amostra de tamanho n_Q tomada desse período de tempo para análise. A quantidade média de lotes é dada por

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{n_Q} Q_j}{n_Q} \quad (\text{A3.1})$$

em que Q é a quantidade média de lotes, em peças concluídas; Q_j é a quantidade de lotes para o modelo de peça ou produto j do total n_Q de lotes ou modelos sendo considerados, em peças concluídas, em que $j = 1, 2, \dots, n_Q$. A média de operações no processamento é um cálculo similar:

$$n_o = \frac{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj}}{n_Q} \quad (\text{A3.2})$$

em que n_o é a média de operações em todas as rotas de processamento em consideração, n_{oj} é o número de operações na rota de processamento para o modelo de peça ou produto j e n_Q é o número de lotes sob consideração.

Quando os dados da fábrica são usados para aferir os termos T_{su} , T_c e T_{no} , médias ponderadas devem ser usadas. Para calcular o tempo total médio de preparo para n_Q diferentes modelos de partes ou produtos, primeiramente computamos o tempo médio de preparo para cada máquina, ou seja,

$$T_{suj} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{oj}} T_{sujk}}{n_{oj}} \quad (\text{A3.3})$$

em que T_{suj} é o tempo médio de preparo para um modelo de produto ou peça j , em minutos; T_{sujk} é o tempo de preparo para a operação k na sequência de processamento da peça ou do produto no modelo j , também em minutos; $k = 1, 2, \dots, n_{oj}$; e n_{oj} é igual ao número de operações na sequência de processamento da peça ou do produto no modelo j . Utilizando os valores de n_Q do T_{suj} calculados na equação anterior, podemos calcular o tempo total médio de preparo para todos os modelos de peças ou produtos, dados

$$T_{su} = \frac{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj} T_{suj}}{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj}} \quad (\text{A3.4})$$

em que T_{su} equivale ao tempo total médio de preparo para todos os modelos n_Q de peças ou produtos incluídos no grupo de interesse, expresso em minutos. Os outros termos já foram detalhados.

Um procedimento semelhante é utilizado para obter os tempos médios para o ciclo do tempo de operação T_c e para o tempo de inatividade T_{no} . Considerando primeiro o tempo do ciclo,

$$T_{cj} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{oj}} T_{cjk}}{n_{oj}} \quad (\text{A3.5})$$

em que T_{cj} é o tempo médio do ciclo de operação para um modelo de produto ou peça j , em minutos; T_{cjk} é a duração do ciclo para a operação k na sequência de processamento da peça ou do produto no modelo j ; $k = 1, 2, \dots, n_{oj}$, em minutos; e n_{oj} é igual ao número de operações na sequência de processamento da peça ou do produto no modelo j . A duração média do ciclo para todos os modelos n_Q é dada por

$$T_c = \frac{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj} T_{cj}}{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj}} \quad (\text{A3.6})$$

em que T_c é a duração média do ciclo para todos os modelos n_Q de peças ou produtos considerados, em minutos. Os outros termos já foram definidos. Os mesmos tipos de equação se aplicam ao tempo de inatividade T_{no} ,

$$T_{noj} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{oj}} T_{nojk}}{n_{oj}} \quad (\text{A3.7})$$

em que T_{noj} equivale ao tempo médio de inatividade para uma peça ou um produto no modelo j , expresso em minutos; T_{nojk} é igual ao tempo de inatividade para a operação k na sequência de processamento da peça ou do produto no modelo j , também em minutos. A média geral para todos os modelos (lotes) é

$$T_{no} = \frac{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj} T_{noj}}{\sum_{j=1}^{n_Q} n_{oj}} \quad (\text{A3.8})$$

em que T_{no} equivale ao tempo médio de inatividade para todas as peças ou todos os produtos considerados, expresso em minutos. Os outros termos já foram definidos.