

Medida de Eficiência em Linhas de Produção

Luiz Henrique Moraes (USP/Escola Politécnica) lmoraes@ford.com
Miguel Cezar Santoro (USP/Escola Politécnica) santoro@usp.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma formulação objetiva e prática para a medida de eficiência em linhas de produção. Tal formulação baseia-se em uma metodologia genérica, denominada OEE ("overall equipment effectiveness", eficácia global de equipamento), que foi adaptada e simplificada para aplicação em linhas de produção. Dessa forma, são revisados conceitos fundamentais relacionados a linhas de produção e medida de eficiência e depois é proposta uma estrutura para medir a eficiência em linhas de fabricação e montagem.

Palavras-chave: Linhas de Produção, Eficiência e Tempo de Ciclo.

1. Introdução

Em sistemas de produção contínuos, em especial em linhas de montagem e fabricação, é prioritária a obtenção de uma elevada produtividade mediante uma apropriada distribuição de recursos físicos e procedimentos operacionais adequados. Entretanto, a produtividade em tais sistemas de produção, caracterizados por elevado volume e baixa variedade de produtos, depende diretamente da eficiência de suas operações críticas ou "gargalos".

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma formulação objetiva e prática para a medida de eficiência em linhas de produção. Tal formulação baseia-se em uma metodologia **genérica**, denominada OEE (*overall equipment effectiveness*, eficácia global de equipamento), que foi adaptada e simplificada para aplicação em linhas de produção. Esta abordagem é justificada por duas razões: (a) importância de uma medida de eficiência, especialmente em sistemas de alto volume; (b) falta de uma terminologia clara e abrangente na maioria das empresas e mesmo na literatura a respeito de eficiência.

Este artigo foi organizado em três itens, refletindo o desenvolvimento lógico da formulação de eficiência apresentada no final:

- a) conceito de linha de produção: é apresentada uma classificação de sistemas de produção e são discutidos conceitos relacionados a linhas de montagem e linhas de fabricação.
- b) conceito e medida de eficiência: é abordado o conceito de eficiência e são apresentadas formulações relacionadas a uma medida de eficiência denominada OEE, empregada em muitas empresas.
- c) medida de eficiência em linhas de produção: é proposta uma estrutura para medir a eficiência em linhas de fabricação e montagem, incluindo uma formulação simples e prática para tempo de ciclo.

É importante esclarecer que em outros tipos de sistema de produção o conceito de eficiência também é de grande importância, porém outros critérios se destacam, por exemplo, velocidade e pontualidade de entrega em sistemas intermitentes que operam sob encomenda. Por esta razão decidiu-se avaliar a medida de eficiência em linhas de produção, deixando esta medida aplicada a outros tipos de sistemas como assunto para futuros trabalhos.

2. Conceito de Linha de Produção

Mais importante que as características de um produto ou serviço, assim como as características de seu processo, é o tipo de sistema de produção empregado (STARR, 1978). Ignorando-se o ponto de vista tecnológico, todos os sistemas de produção podem ser considerados como pertencentes a três categorias básicas: projeto, intermitente (*job shop*) e contínuo (*flow line*). Além disso, a produção de projetos também pode ser considerada um caso especial de sistemas intermitentes. Para o autor, enquanto em sistemas intermitentes os produtos são fabricados em lotes, em sistemas contínuos os itens são produzidos da maneira cadenciada. Sistemas contínuos normalmente são do tipo “produção para estoque” (*make-for-stock*) e utilizam predominantemente máquinas especiais (*special purpose*), enquanto sistemas intermitentes costumam ser do tipo “produção sob encomenda” (*made-to-order*) e empregam máquinas universais (*general purpose*).

É importante esclarecer que sistemas de produção característicos de indústrias de processos, por exemplo, indústrias química, petroquímica e alimentícia, são também sistemas contínuos. Entretanto, neste trabalho tais sistemas não são considerados, pois se deseja propor uma abordagem destinada a uma categoria especial de sistemas contínuos, representada pelas linhas de fabricação e montagem, ou simplesmente linhas de produção.

O projeto de linhas de produção baseia-se no conceito de balanceamento de capacidade. Nesta atividade, é possível empregar modelos matemáticos para avaliação e otimização das duas categorias básicas de sistemas contínuos de produtos discretos, isto é, linhas de montagem e linhas de fabricação. A seguir são apresentados alguns conceitos relacionados a tais sistemas de produção.

“Uma linha de montagem é um conjunto de estações de trabalho seqüencialmente dispostas, normalmente interligadas por um sistema contínuo de movimentação de materiais, e projetada para montar componentes e realizar qualquer operação necessária à obtenção de um produto acabado.” (ASKIN&STANDRIDGE, 1993).

Em problemas envolvendo linhas de montagem (sistemas seriais confiáveis), falhas no sistema e outros fatores probabilísticos normalmente são desconsiderados. Entretanto, na avaliação de linhas de fabricação (sistemas seriais gerais), tais falhas são de grande relevância.

Os mesmos autores abordam uma importante categoria de linha de fabricação, denominada linha de transferência, definida como um “conjunto de máquinas automáticas e estações de inspeção dispostas em série e interligadas por um sistema comum de controle e movimentação de materiais.” Em linhas de transferência, estações e máquinas podem ser isoladas de falhas em outras estações mediante o emprego de áreas de estoque em processo denominadas pulmões. Uma estação poderá manter-se improdutiva em razão de uma falha na própria estação, no sistema de movimentação ou em uma outra estação ou máquina da linha. No caso de uma falha em outra estação, poderá ocorrer bloqueio ou ociosidade da linha, caso essa estação seja respectivamente posterior ou anterior ao ponto de observação. Dessa forma, é necessário determinar a eficiência de uma linha considerando parâmetros de manutenção – tempos de reparo e tempos entre falhas – e capacidade de pulmões em cada máquina ou estação.

Observe-se que as considerações apresentadas são aplicáveis a qualquer linha de fabricação, embora em linhas de transferência seja necessário já durante o projeto estabelecer onde serão localizados os pulmões de estoque em processo, o que explica a preocupação dos autores mencionados em definir claramente as linhas de transferência.

É interessante destacar que o projeto e operação de um sistema contínuo inicia-se com o planejamento de capacidade, que por sua vez inclui decisões sobre novos produtos, inovação tecnológica de produto e processo, integração vertical, turnos de trabalho e horas extras, localização e dimensionamento de fábricas, etc. (BUFFA, 1983) Uma vez que a eficiência constitui um conceito elementar para as atividades de planejamento de capacidade, é possível confirmar sua importância em sistemas contínuos.

3. Conceito e Medida de Eficiência

Inicialmente, é importante apresentar alguns esclarecimentos sobre o significado do termo capacidade, de importância fundamental neste trabalho. A maioria dos textos de Administração da Produção apresenta o conceito de capacidade, ou quantidade de produção por período de tempo. A capacidade normalmente é expressa em unidades de peças, componentes ou produtos fabricados ou montados em um determinado período de tempo, por exemplo, peças por hora. Em alguns casos, quando um sistema de produção está associado a produtos ou processos distintos, a capacidade pode ser expressa não pelo produto, mas pelos insumos. Assim, podem ser utilizadas medidas associadas ao trabalho empregado, por exemplo, homens-hora por dia, ou aos materiais consumidos (MOREIRA, 1996).

Por outro lado, é raro encontrar na literatura definições claras a respeito de eficiência, que se constitui de uma medida que permite definir a capacidade real de um sistema em relação a uma capacidade teórica ou “de projeto”. Alguns textos que abordam este conceito definem a eficiência como a relação da capacidade real pela capacidade efetiva, definindo capacidade real como a capacidade observada em um período de tempo pré-determinado e a capacidade efetiva como a máxima capacidade apresentada pelo sistema considerando paradas programadas, intervalos entre turnos, etc. (SLACK *et al.*, 1997; STEVENSON, 1996; SHAFER&MEREDITH, 1998; MARKLAND *et al.*, 1998). Entretanto, nenhuma referência pesquisada aborda de maneira satisfatória a definição de capacidade efetiva, que deveria ser definida em função do tempo de ciclo da operação “gargalo”, conforme será apresentado no próximo item. As equações 3.1 e 3.2 são coerentes com os autores mencionados, e acrescentam a definição de capacidade ideal ou efetiva em função do tempo de ciclo. Observe-se que capacidade ideal equivale ao valor inverso do tempo de ciclo, e que na equação 3.2 foi inserido o número "60" no numerador, pois a capacidade é expressa em "peças/hora" e o tempo de ciclo em "minutos".

(3.1) $E (\%) = Cr / Ci$
E (%): eficiência (do sistema)
Cr: capacidade real (peças / hora)
Ci: capacidade ideal (peças / hora)

(3.2) $Ci = 60 / tg$
Ci: capacidade ideal (peças / hora)
tg: tempo de ciclo da operação "gargalo" (min)

Com relação aos fatores que afetam a eficiência de um sistema de produção, é de grande interesse uma metodologia para avaliar e medir a eficiência, definida mediante uma medida denominada OEE (*overall equipment effectiveness*, eficácia global de equipamento). A aplicação desta medida permite avaliar de maneira simples o efeito de parâmetros de manutenção, variações no tempo de ciclo, problemas de qualidade e outras interrupções sobre a capacidade ou eficiência do sistema (NAKAJIMA, 1988).

O OEE equivale ao produto de três índices: disponibilidade, qualidade e desempenho. A Disponibilidade representa o percentual do tempo operacional – tempo durante o qual a máquina opera em cada dia – no qual a máquina encontra-se disponível, isto é, não se encontra parada devido a quebra, falha, preparação, troca de ferramentas, etc. Em outras palavras, a Disponibilidade equivale à relação entre o tempo disponível – durante o qual a máquina não encontra-se parada devido às causas mencionadas – pelo tempo operacional.

A Qualidade indica o percentual de peças "boas" produzidas no "gargalo", isto é, peças produzidas que não foram retrabalhadas ou rejeitadas na operação "gargalo". Finalmente, o Desempenho leva em consideração todos os demais fatores, tais como variações de ciclo, falta de materiais, espera ou bloqueio, falta de pessoal, etc. Observe-se que todas as causas "desconhecidas" refletem-se no Desempenho, pois este índice equivale à relação da capacidade total – ou capacidade ideal incluindo peças rejeitadas ou retrabalhadas – pela capacidade disponível – determinada em função de todas as paradas "reconhecidas" devido a problemas de manutenção, preparação e ferramentas.

As formulações para OEE e seus componentes são apresentadas nas equações 3.3 a 3.6. Observe-se que tais formulações são mais práticas, diretas e simples que as formulações propostas originalmente pelo autor mencionado. Entretanto, não faz parte do escopo deste trabalho comparar as formulações originais com as aqui apresentadas, mas apenas propor uma estrutura para avaliar a eficiência em linhas de produção. A equivalência entre as formulações de eficiência (equação 3.1) e OEE (equação 3.3) é facilmente verificada na equação 3.7.

Finalmente, é necessário considerar aspectos relacionados à determinação do tempo de ciclo de uma operação, que constitui o valor inverso da capacidade efetiva ou ideal, e do tempo-padrão de um processo, relacionado à utilização de pessoal. Uma apresentação de tópicos relacionados à determinação do tempo de ciclo estaria além do escopo deste trabalho, portanto serão apresentados apenas algumas considerações fundamentais no próximo item.

(3.3) $E (\%) = OEE (\%) = D (\%) \times Q (\%) \times De (\%)$
E (%): eficiência
D (%): disponibilidade
Q (%): qualidade
De (%): desempenho

(3.4) TD : tempo disponível (h)

$$D(\%) = TD/TO = Cd/Ci$$

(3.5)

$$Q(\%) = Cr/Ct$$

(3.6)

$$De(\%) = Ct/Cd$$

- equivalência entre (3.3) e (3.1):

$$(3.3) E(\%) = OEE(\%) = D(\%) \times Q(\%) \times De(\%)$$

- substituindo 3.4 a 3.6 em 3.3:

$$(3.7) E(\%) = \frac{Cd}{Ci} \times \frac{Cr}{Ct} \times \frac{Ct}{Cd} \quad (3.7)$$

- eliminando-se Cd e Ct das frações:

$$(3.1) E(\%) = Cr / Ci$$

TO: tempo operacional (h)

Cd: capacidade disponível (produto de capacidade ideal e disponibilidade): $Cd = D(\%) \times Ci$

Ci: capacidade ideal (peças / hora), definida na equação 3.2

Cr: capacidade real (peças / hora), isto é, capacidade total excluindo peças rejeitadas ou retrabalhadas na operação.

Ct: capacidade total (peças / hora)

4. Medida de Eficiência em Linhas de Produção

Conforme abordado no item 2, linhas de montagem e de fabricação constituem as duas categorias básicas de linhas de produção, que entre si diferem tanto por suas características como pelos modelos empregados para sua análise. Dessa forma, enquanto linhas de montagem caracterizam-se por alta disponibilidade de máquinas e equipamentos e emprego intensivo de pessoal, linhas de fabricação em geral baseiam-se na aplicação intensiva de capital – máquinas e equipamentos –, portanto sua capacidade é altamente sensível à disponibilidade de recursos físicos. Por outro lado, na análise de linhas de montagem podem ser empregados modelos de balanceamento, enquanto modelos probabilísticos de filas podem ser utilizados para análise de linhas de fabricação.

Em uma linha de fabricação, uma operação poderá tornar-se parcial ou completamente inativa em razão de uma falha na mesma, no sistema de movimentação ou em uma outra operação da linha. Assim, quando ocorre uma falha em alguma máquina ou equipamento, verifica-se bloqueio ou ociosidade respectivamente nas operações anteriores ou posteriores àquela em que a falha ocorre. Dessa forma, as operações de uma linha devem ser protegidas de falhas em outras operações mediante o emprego de pulmões de estoque em processo. Isso significa que as máquinas anteriores à falha deverão abastecer pulmões, que serão posteriormente utilizados para abastecer o processo durante falhas em outras máquinas e equipamentos. Em alguns casos, a linha poderá operar em regime parcial – apenas algumas operações – para alcançar um nível pré-determinado de estoque nos pulmões. Portanto, o emprego de pulmões em linhas de fabricação é algo que, de uma maneira ou outra, sempre acaba surgindo como solução natural para lidar com a baixa disponibilidade de máquinas e equipamentos.

Conforme sugerido no item 2, a eficiência de uma linha de fabricação é definida como a relação da capacidade real pela capacidade ideal. A capacidade real é aquela observada durante um determinado período de tempo, enquanto a capacidade ideal é definida como o valor inverso ao maior tempo de ciclo presente na linha. O tempo de ciclo, por sua vez, é definido como o intervalo de tempo médio entre a finalização de duas peças consecutivas em uma operação de fabricação ou montagem, conforme apresentado nas equações 5.1 e 5.2. Observe-se que estas formulações equivalem às equações 3.1 e 3.2, entretanto foi substituído o termo "tg" por "to", pois a metodologia também pode ser aplicada em outras operações além do gargalo.

A determinação do tempo de ciclo requer a realização de um estudo de tempos. No caso de máquinas dedicadas com abastecimento automático e máquinas de transferência, o tempo de ciclo é medido diretamente. Entretanto, em máquinas dedicadas com abastecimento manual é necessário considerar os diversos elementos da operação. No caso de operações flexíveis, o tempo de ciclo da operação é definido como a relação do tempo de ciclo de cada máquina pelo número de máquinas que constitui a operação (equação 5.3). Caso a operação seja constituída por máquinas com ciclos diferentes, o tempo de ciclo da operação é identificado mediante a somatória das capacidades ideais de cada máquina (equações 5.4 a 5.6). Na verdade, as equações 5.4 a 5.6 equivalem à equação 5.3 se os tempos de todas as máquinas forem iguais, e a equação 5.3 seria reduzida a uma expressão de igualdade entre os tempos de ciclo da máquina e da operação no caso de uma única máquina dedicada constituindo a operação.

Uma alocação ótima de pulmões permite que a capacidade real se aproxime da capacidade disponível da linha. A capacidade disponível é definida como o produto da capacidade ideal e da disponibilidade da operação crítica (equações 5.7 e 5.8). Obviamente a equação 5.7 pode ser aplicada a todas as operações da linha, mas sua relevância é maior nas operações que restringem a capacidade do processo, denominadas operações "gargalo", tanto devido a um tempo de ciclo elevado como em função de uma baixa disponibilidade. Em geral, tais operações são aquelas que apresentam maior utilização, e portanto limitam a capacidade do sistema.

- (5.1) $E (\%) = Cr / Ci$
 E (%): eficiência (do sistema)
 Cr: capacidade real (peças / hora)
 Ci: capacidade ideal (peças / hora)
- (5.2) $Ci = 60 / to$
 Ci: capacidade ideal (peças / hora)
 to: tempo de ciclo da operação (min)
- tempo de ciclo de operação com máquinas idênticas:
 (5.3) $to = tm / M$
 to: tempo de ciclo da operação (min)
 tm: tempo de ciclo da máquina (min)
 M: número de máquinas que constitui a operação
- tempo de ciclo de operação com máquinas diferenciadas:
 (5.4) $to = 60 / Cio$
 to: tempo de ciclo da operação (min)
 Cio: capacidade ideal da operação (peças / hora)
 Ci-x: capacidade ideal da máquina "x" (peças / hora)
 tm-x: tempo de ciclo da máquina "x" (min)
- (5.5) $Cio = Ci-1 + Ci-2 + Ci-3 + \dots + Ci-M$
- (5.6) $Ci-x = 60 / tm-x$
- capacidade disponível e disponibilidade: Cd : capacidade disponível (peças / hora)

$$(5.7) Cd = Ci \times D (\%)$$

$$(5.8) D (\%) = TF / (TF + TR)$$

Ci: capacidade ideal (peças / hora)

D (%): disponibilidade (do "gargalo")

TF: tempo entre falhas (horas)

TR: tempo de reparo (horas)

Observe-se que na equação 5.8 é apresentada uma formulação distinta daquela apresentada na equação 3.4 para Disponibilidade, devido à importância, em linhas de produção, dos parâmetros de manutenção: (a) tempo entre falhas, normalmente representado pela sigla MTBF (*mean time between failures*, tempo médio entre falhas) e definido como o intervalo de tempo entre duas paradas ou falhas em uma máquina ou equipamento; e (b) tempo de reparo, normalmente representado pela sigla MTTR (*mean time to repair*, tempo médio de reparo) e definido como o tempo necessário para que uma máquina ou equipamento retorne à sua condição operacional. Neste trabalho, o tempo entre falhas e o tempo de reparo serão representados respectivamente pelas siglas TF e TR, e permitem determinar o índice de disponibilidade.

A importância dos fatores apresentados baseia-se no fato de que, em linhas de produção, uma máquina com tempo de ciclo e disponibilidade equivalente a outras poderá ter maior impacto no resultado do sistema, caso os parâmetros TF e TR sejam elevados. Por exemplo, uma máquina que possua TF e TR de respectivamente 9 e 1 hora terá um impacto menor que outra de mesmo tempo de ciclo e TF e TR de respectivamente 90 e 10 horas, pois no segundo caso as falhas ocorrerão com menor frequência entretanto sua duração será severa. Observe-se que em ambos os casos a disponibilidade é de 90%, entretanto as falhas da primeira máquina serão "absorvidas" por um pulmão de 1 hora, contra 10 horas na segunda máquina.

Na prática, o índice de qualidade normalmente é superior a 99%, pois é raro rejeitar ou retrabalhar mais que 1% das peças produzidas na própria operação gargalo. O mais comum é encontrar uma rejeição maior em operações posteriores, mas isto é considerado na eficiência final da linha, e não no OEE ou na eficiência de uma operação, conforme será explicado no item 5. Portanto, é possível incluir desempenho e qualidade em uma única medida, que neste trabalho é denominada Proteção, agregando fatores relacionados a qualidade, variação de ciclo, falta de pessoal, etc., e principalmente agregando perdas devido a espera e bloqueio, enquanto a disponibilidade agrega apenas perdas devido a manutenção, preparação e troca de ferramentas.

Portanto, a proteção é definida como a relação da eficiência pela disponibilidade, ou da capacidade real pela capacidade disponível. Isso significa que a eficiência equivale ao produto de disponibilidade e proteção, ou que a capacidade real depende destes dois índices e da capacidade ideal (equações 5.9 e 5.10).

$$(5.9) P (\%) = E (\%) / D (\%) = Q (\%) \times De (\%)$$

$$(5.10) E (\%) = D (\%) \times P (\%)$$

P (%): proteção

E (%): eficiência

D (%): disponibilidade

Q (%): qualidade

De (%): desempenho

Finalmente, deve-se considerar que tempos de reparo devido a manutenção corretiva, preventiva ou planejada, tempos para troca de ferramentas ou preparação e tempos devido a outras paradas programadas ou imprevistas não afetam o tempo de ciclo da operação, mas determinam a disponibilidade do equipamento. Por sua vez, a disponibilidade de cada operação, combinada com a alocação de pulmões e com a própria configuração da linha de fabricação, determinará a eficiência do sistema, e portanto sua capacidade e rentabilidade.

5. Conclusão

Conforme mencionado na introdução, a justificativa deste trabalho baseia-se tanto na importância do conceito de eficiência em linhas de produção como na ausência de definições claras, objetivas e práticas, tanto na literatura como na prática. Isso também deverá motivar futuros trabalhos envolvendo a aplicação prática das formulações apresentadas. Em tais aplicações, três aspectos deverão ser considerados, conforme abordado a seguir.

Em primeiro lugar, deve-se considerar que em linhas de fabricação normalmente é interessante estratificar a disponibilidade em dois ou mais índices, por exemplo, separando o percentual de tempo em que uma operação permanece inativa devido a manutenção corretiva, preparação (*setup*), etc., ou mesmo devido a diversos tipos de manutenção, por exemplo, manutenção mecânica, eletro-eletrônica e hidráulica.

A segunda implicação está relacionada às linhas de montagem, nas quais recomenda-se estratificar não a disponibilidade, mas o índice de proteção. Isso se deve a duas razões: (a) tais sistemas de produção em geral constituem-se de máquinas e equipamentos de elevada disponibilidade; (b) normalmente não existe espaço entre as operações para alocação de pulmões, portanto o elevado número de peças e componentes empregados geram frequentes paradas por falta de material. Observe-se que, neste caso, a medida de proteção deve ser estratificada não em desempenho e qualidade, como proposto na medida de OEE, mas em índices que reflitam espera, bloqueio e falta de materiais.

Finalmente, deve-se observar que o índice de qualidade, que no item 4 foi agregado ao índice de proteção, reflete apenas perdas por rejeição e retrabalho na operação "gargalo". Isso significa que a capacidade real apresentada na operação "gargalo" é inferior à capacidade real no final da linha, e esta diferença equivale ao índice de rejeição após a operação considerada, o que é igualmente válido tanto em linhas de fabricação como em linhas de montagem.

Futuros trabalhos incluem não apenas aplicações da estrutura proposta a problemas reais envolvendo linhas de montagem e fabricação, mas também abordagens adaptadas para outros tipos de sistemas de produção. Um outro tópico relevante que se pretende abordar consiste na determinação do tempo de ciclo, apresentada de maneira simplificada neste texto, e em sua relação com uma medida denominada "takt time", na verdade um caso especial de tempo de ciclo.

Referências

ASKIN, R.G. & STANDRIDGE, C.R. (1993) - *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*. John Wiley & Sons. New York.

BUFFA; E.S. (1983) - *Modern Production and Operations Management*. John Wiley & Sons. 7ª Edição. New York.

MARKLAND, R.E.; VICKERY, S.K. & DAVIS, R.A. (1998) - *Operations Management: concepts in manufacturing and services*. South Western College. 2ª Edição. Saint Paul, MN.

MOREIRA, D.A. (1996) - *Administração da Produção e Operações*. Pioneira. 2ª Edição. São Paulo.

NAKAJIMA, S. (1988) - *Introduction to Total Productive Maintenance* (tradução do original em Japonês, "TPM Nyumon", 1984). Productivity Press. Cambridge, MS.

SHAFER, S.M. & MEREDITH, J.R. (1998) - *Operations Management: a process approach with spreadsheets*. John Wiley & Sons. New York.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A. & JOHNSTON, R. (1997) - *Administração da Produção* (tradução do original em Inglês "Operations Management", 1995). Atlas. São Paulo.

STARR, M.K. (1978) - *Operations Management*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ.

STEVENSON, W.J. (1996) - *Production and Operations Management*. Richard D. Irwin. 5ª Edição. New York.