Balanceamento de uma Linha de Produção

Uma linha de produção consiste num conjunto de Postos de Trabalho (PT) cuja posição é fixa e cuja sequência é ditada pela lógica das sucessivas operações a realizar e descritas na gama operatória. Recorde-se que um PT pode ser constituído por um único Operador ou por vários Operadores realizando operações manuais eventualmente assistidas por ferramentas ou pequenos equipamentos.

O balanceamento de uma linha de produção consiste em distribuir a carga das várias operações o mais uniformemente possível pelos vários PT´s.

Quando se inicia a fabricação de um novo produto, a Engenharia de Processo começa por estudar todas as operações necessárias executar, estima a sua duração e, tendo em conta as relações de precedência entre todas as operações, procede ao chamado balanceamento da linha que se vai constituir para fabricar aquele produto.

O balanceamento de uma linha constituída por muitas operações para processamento de um produto consiste em encontrar a solução para uma das duas seguintes alternativas:

- Dado um tempo de ciclo, determinar o número mínimo necessário de PT´s;
- Dado um número de PT´s, determinar o tempo de ciclo mínimo possível.

Cada PT apresenta sempre algum tempo ocioso, já que na prática não se consegue uma eficiência de 100%.

Num problema de balanceamento consideramos tipicamente os seguintes símbolos e definições:

- N – Número de PT´s existentes na linha. Normalmente um PT é ocupada por um único Operador o qual pode realizar uma ou mais operações. Contudo, um PT pode ter mais do que um Operador, ou um Operador pode intervir em mais do que um PT;
- T_c – Tempo de ciclo[1]. Tempo decorrido entre a fabricação de duas unidades sucessivas à saída da linha, ou seja o tempo máximo de desempenho permitido a cada PT;
- t_i – Tempo médio correspondente à operação de ordem i;
- $\sum t_i$ – Tempo total necessário para produzir uma unidade, ou soma das durações de todas as operações.

Entre estas variáveis existem as seguintes relações:

$$N_{\min} = \frac{1}{T_c} \sum_{1}^{n} t_i$$

[1] Ou TAKT **time** (do alemão **Taktzeit**, onde **Takt** significa compasso, ritmo e **Zeit** significa tempo, período)

Em que N_{min} representa o número mínimo de PT´s necessários à linha (o resultado deve ser arredondado para a unidade imediatamente superior)

$$\varepsilon = \frac{1}{N.T_c}.\sum_1^n t_i$$

Em que ε representa a eficiência do balanceamento da linha.

$$f = N.T_c - \sum_1^n t_i$$

Em que f representa a folga do conjunto das operações.

Não existe nenhum método exacto para o cálculo do balanceamento de uma linha de produção. Na prática utilizam-se métodos heurísticos, entre os quais, o mais popular é o do "tempo de operação mais longo".

Consideremos o seguinte exemplo:

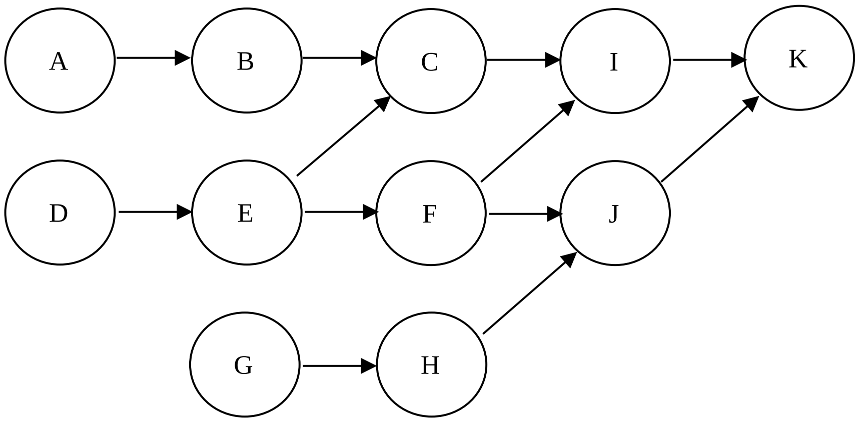
A montagem de um produto requer 11 operações. Os tempos médios de cada operação e as suas precedências são as seguintes:

Operações	**Durações** (minutos)	**Precedências**
A	1,10	-
B	1,50	A
C	0,30	B, E
D	1,30	-
E	1,70	D
F	0,50	E
G	0,70	-
H	0,20	G
I	0,50	C, F
J	1,10	F, H
k	0,40	I, J

A produção necessária é 180 unidades por turno de 8 horas. O tempo de produção disponível é de 450 minutos.

Pretendemos especificar uma linha com uma quantidade mínima de PT´s e determinar quais as operações que se podem agrupar em cada PT. Os tempos de movimentação do produto entre cada dois PT´s podem considerar-se desprezáveis face aos tempos de operação, pois os PT´s encontram-se muito próximos uns dos outros.

Começamos por desenhar o diagrama de sequências operatórias:



O tempo de ciclo necessário atingir é:

$$T_c = 450 \text{ min/dia} / 180 \text{ unid/dia} = 2{,}5 \text{ min/unidade}$$

O número mínimo de PT´s será então:

$$N = \text{Tempo de processamento} / \text{Tempo de ciclo} = \sum t_i / T_c = 8{,}9 / 2{,}5 = 3+$$

O que significa que, pelo menos, 4 PT´s são necessários.

Começamos com uma operação de cada vez. Notemos que as operações A, D e G iniciam o processo (não têm precedentes).

Escolhemos a operação mais longa de entre este grupo (operação D) e inscrevemo-la no Quadro adiante. O PT1 fica assim com 1,20 minutos de folga. As operações seguintes são agora A, G e E. A operação mais longa de entre estas é E com 1,70 minutos, mas não serve pois é mais longa do que a folga de 1,20 minutos existente. Portanto, escolhemos A com uma duração de 1,10 minutos (que é mais longa do que os 0,70 minutos da operação G). Juntamos a operação A no Quadro, restando agora 0,10 minutos à Estação 1. As operações G, E e B podem iniciar-se. Como a duração de qualquer destas operações é superior à folga de 0,10 minutos, temos de iniciar um novo PT.

Começamos com E, pois é a operação mais longa entre G, E e B. Restam 0,8 minutos no PT2 e F pode iniciar-se. Entre G, B e F, B é a operação mais longa com 1,50 minutos mas não cabe. Escolhemos a operação imediatamente inferior, ou seja G com 0,7 minutos restando 0,10 minutos de folga. H pode agora iniciar-se. O conjunto das operações B, F e H têm uma duração superior a 0,10 minutos, pelo que temos de optar por outro PT.

O PT3 inicia-se com B (operação mais longa), restando 1,00 minutos e a operação C pode iniciar-se. Entre F, H e C, F é a mais longa com 0,50 minutos, restando 0,50 minutos. Restam H e C (I e J não podem iniciar-se ainda pois têm também como precedentes C e H).

Entre C e H escolhemos C com 0,30 minutos. Restam 0,20 minutos e já pode iniciar-se I. A operação H dura exactamente 0,20 minutos pelo que completa a folga.

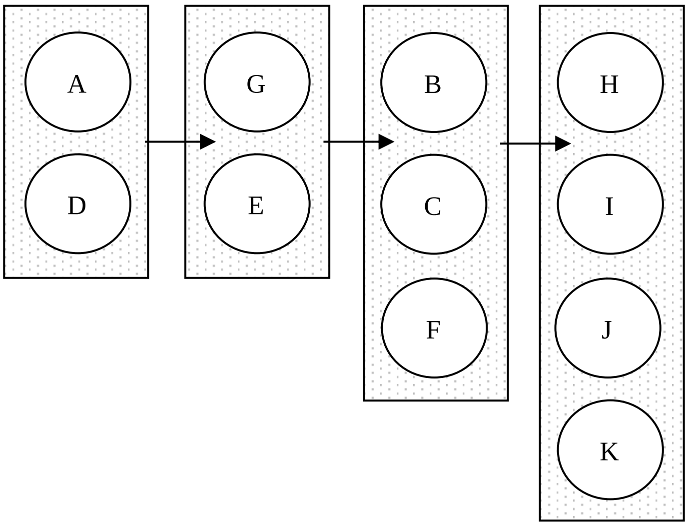
Juntamos um novo PT (o quarto). Entre J e I escolhemos a operação J por ser a mais longa, deixando 1,40 minutos de folga onde cabe a operação I com 0,50 minutos. Por último temos a operação k com 0,40 minutos, restando 0,50 minutos. E o balanceamento do sistema estará terminado com 4 PT´s, conforme pretendido.

PT	**Operações**	**Durações**	**Folgas**	**Operações disponíveis**
				A, D, G
1	D	1,30	1,20	A, G, E
	A	1,10	0,10	G, E, B
2	E	1,70	0,80	G, B, F
	G	0,70	0,10	B, F, H
3	B	1,50	1,00	F, H, C
	F	0,50	0,50	H, C
	C	0,30	0,20	H, I
	H	0,20	0,00	I, J
4	J	1,10	1,40	I
	I	0,50	0,90	k
	k	0,40	0,50	
			9,30	

A folga total do sistema é: $f = N.T_c - \sum t_i = 4 \times 2{,}5 - 9{,}3 = 0{,}7$ min

E a eficiência do sistema é: $\varepsilon = \sum t_i / N.T_c = 9{,}3 / (4 \times 2{,}5) = 0{,}93$ ou 93 %

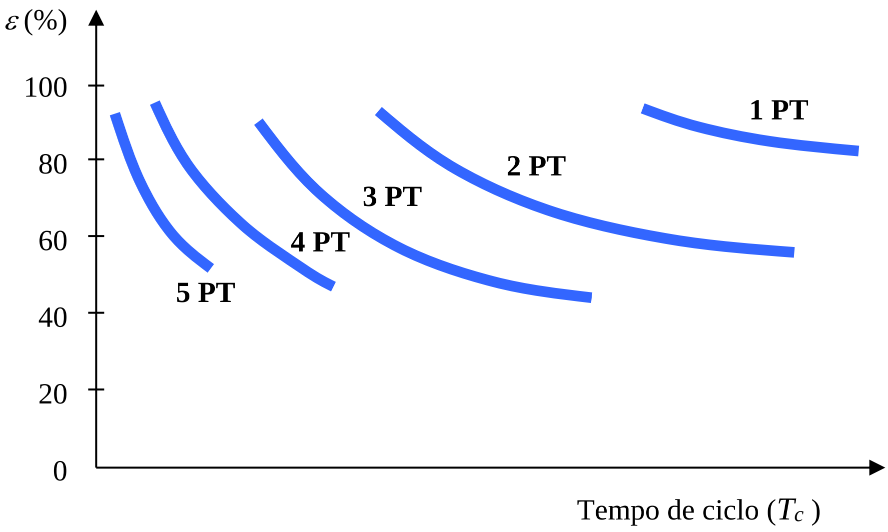
De notar que o PT3 não possui qualquer folga. Um pequeno alongamento de qualquer das operações B, F, C ou H compromete imediatamente o objectivo de 180 unidades/turno, pelo que uma alternativa mais realista consistiria em retirar a operação H do PT3 e integrá-la no PT4. A eficiência da linha manter-se-ia constante.



Para resolver problemas mais complexos, envolvendo até 20 operações e 6 precedências, recomenda-se a utilização de programas em computador.

Sensibilidade da Eficiência a Variações do Tempo de Ciclo

De notar que existe uma relação geral entre eficiência e tempo de ciclo conforme se pode observar na próxima Figura.



Quando a necessidade de produção cresce, o tempo de ciclo tem de diminuir (na Figura desloca-se para a esquerda) e a eficiência da linha de produção aumenta.

Quando o tempo de ciclo atinge um certo ponto, verifica-se uma descontinuidade e a quantidade de PT´s tem de ser incrementada de uma unidade. Em consequência a eficiência da linha diminui.

Se continuarmos a diminuir o tempo de ciclo a eficiência crescerá até que se atinja nova descontinuidade.

Exercício 1 (Monks, Joseph G. "*Theory and Problems of Operations Management*", McGraw-Hill, Inc. 1985)

A montagem de um produto requer as operações que se mostram no Quadro seguinte.

Operações	**Duração** (minutos)	**Precedências**
A	0,62	-
B	0,39	A
C	0,27	B
D	0,14	C
E	0,56	C
F	0,35	D, E
G	0,28	F

São precisas 600 unidades/dia e a linha de produção a formar pode operar 7 horas/dia. Nestas condições:

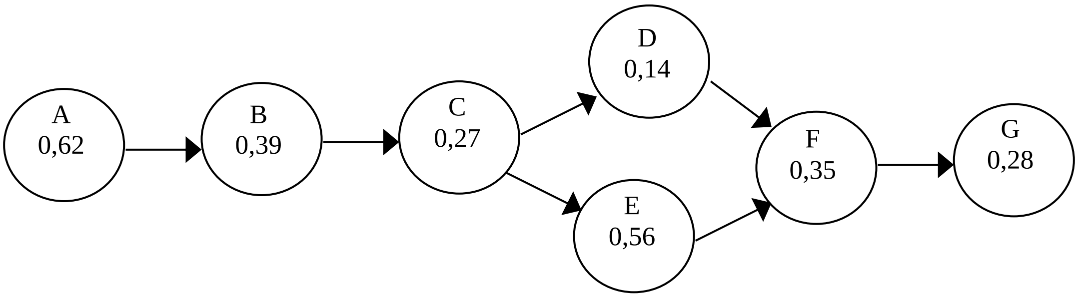
a) Qual o Tempo de Ciclo?
b) Qual o número mínimo de PT´s e de Operadores?

c) Qual a eficiência do balanceamento assim conseguido?
d) Suponha que o tempo necessário para realizar a operação "E" tem de ser, ainda durante algum tempo (processo manual a passar para semi-automático) de 0,9 minutos. Que medida tomaria para cumprir aquele objectivo de produção e para quanto passaria a eficiência do balanceamento?

Supondo que só existem 3 Operadores:

e) Qual o Tempo de Ciclo possível conseguir nestas condições?
f) Como agrupar as operações de forma a obter a capacidade máxima?
g) Qual a produção possível conseguir num dia de 7 horas de trabalho?

Resolução



a) T_c = 7 x 60 / 600 = 0,7 minutos

b) $$N = \frac{\sum T_i}{\text{TAKT}} = \frac{(0{,}62 + 0{,}39 + \ldots + 0{,}28)}{0{,}7} = 3+$$

Estação	Operação	Duração	Folga	Operação disponível
-	-	-	-	A
1	A	0,62	0,08	B
2	B	0,39	0,31	C
	C	0,27	0,04	D, E
3	E	0,56	0,14	D
	D	0,14	0,00	F
4	F	0,35	0,35	G
	G	0,28	0,07	-

c) Eficiência: $$\varepsilon = \frac{\sum T_i}{N.\text{TAKT}} = \frac{2{,}61}{(4)(0{,}7)}.100 = 93{,}2\%$$

d) Como o tempo da operação E é superior ao T_c, temos de reforçar esta operação com mais 1 Operador. Logo, a eficiência cai para:

Eficiência: $$\varepsilon = \frac{\sum T_i}{N.\text{TAKT}} = \frac{2{,}61 - 0{,}56 + 0{,}9}{(5)(0{,}7)}.100 = 84{,}3\%$$

e) T_c = 2,61/3 = 0,87 minutos/peça

f)

Alternativas	Estação 1	Estação 2	Estação 3	T_c
1	A	B + C	D + E + F + G	
2	A	B + C + D	E + F + G	
3	A + B	C + E	D + F + G	

Ou seja:

Alternativas	Estação 1	Estação 2	Estação 3	T_c
1	0,62	0,39 + 0,27 = 0,66	0,14 + 0,56 + 0,35 + 0,28 = 1,33	1,33
2	0,62	0,39 + 0,27 + 0,14 = 0,80	0,56 + 0,35 + 0,28 = 1,19	1,19
3	0,62 + 0,39 = 1,01	0,27 + 0,56 = 0,83	0,14 + 0,35 + 0,28 = 0,77	1,01

Logo, o melhor agrupamento é o da alternativa 3, pois resulta no menor T_c possível.

g) 7 horas/dia x 60 minutos/hora / 1,01 minutos/unidade = 416 unidades/dia

Exercício 2

A montagem de um produto requer as operações que se mostram no quadro seguinte.

Operações	**Duração** (minutos)	**Precedentes**
A	4	-
B	3	A
C	5	B
D	2	-
E	4	C
F	6	E
G	2	-
H	3	D, G
I	5	H
J	2	-
K	3	J
L	4	K

a) São precisas 48 unidades/dia e a linha a formar pode operar 8 horas/dia. Nestas condições:
   a. Qual o tempo de ciclo necessário?
   b. Qual o número necessário de PT´s e de Operadores?
   c. Qual o tempo perdido em cada ciclo?
   d. Qual a eficiência do balanceamento assim conseguido?

b) Suponha que a operação F passa a demorar 12 minutos. Nestas condições:
   a. Qual o tempo de ciclo necessário?
   b. Qual o número necessário de PT´s e de Operadores?
   c. Qual o tempo perdido em cada ciclo?
   d. Qual a eficiência do balanceamento assim conseguido?

c) Só é possível constituir 3 PT´s. Qual a produção diária possível?

d) Suponha que a linha é transformada numa célula. Como agruparia as operações de forma a minimizar o número necessário de Operadores?

Resolução

a)

a. $T_c = 8 \times 60 / 48 = 10$ min
b. $N_{min} = 43 / 10 = 4{,}3$ ou 5 PT e 5 Operadores
c. Balanceamento:

PT	Operadores	Operações	Durações	Folgas	Operações disponíveis
					A, D, G, J
1	1	A	4	6	D, G, J, B
		B	3	3	D, G, J, C
		D	2	1	G, J, C
2	1	C	5	5	G, J, E
		E	4	1	G, J, F
3	1	F	6	4	G, J
		G	2	2	J, H
		J	2	0	H, K
4	1	H	3	7	K, I
		I	5	2	K
5	1	K	3	7	L
		L	4	3	-
				7	

1 Operador com as operações A, B, D e 1 minutos de folga
1 Operador com as operações C, E e 1 minutos de folga
1 Operador com as operações F, G, J e 0 minutos de folga
1 Operador com as operações H, I e 2 minutos de folga
1 Operador com as operações K, L e 3 minutos de folga
Total de folgas: 7 minutos

d. $\varepsilon = 43 / (5 \times 10) \times 100 = 86\%$

b)

a. $T_c = 8 \times 60 / 48 = 10$ min
b. $N_{min} = 49 / 10 = 4{,}9$ ou 5 PT e 5 Operadores
c. Balanceamento:

PT	Operadores	Operações	Durações	Folgas	Operações disponíveis
					A, D, G, J
1	1	A	4	6	D, G, J, B
		B	3	3	D, G, J, C
		D	2	1	G, J, C
2	1	C	5	5	G, J, E
		E	4	1	G, J, F
3	2	F	12	8	G, J
		G	2	6	J, H
		H	3	3	J, I
		J	2	1	K, I
4	1	I	5	5	K
		K	3	2	L
5	1	L	4	6	-
				7	

1 Operador com as operações A, B, D e 1 minuto de folga

1 Operador com as operações C, E e 1 minuto de folga
2 Operadores com as operações F, G, H, J e 1 minuto de folga
1 Operador com as operações I, K e 2 minutos de folga
1 Operador com a operação L e 6 minutos de folga
Total de folgas: 11 minutos

d. $\varepsilon = 49 / (6 \times 10) \times 100 \cong 82\%$

c) $T_c = 43 / 3 = 14{,}33$ minutos

O melhor arranjo de operações para produzir o máximo possível é:
A + B + D + G + J: 13 minutos
C + E + H + K: 11 minutos
F + I + L: 15 minutos
Estrangulamento: Max(13, 11, 15) = 15 minutos

Poderíamos chegar à mesma conclusão, calculando T_c = 43 minutos/3 PT = 14,33 ≅ 15 minutos. Logo a produção possível é 60/15 = 4 unidades/hora ou 4 x 8 = 32 unidades/dia

d) 1 Operador com a operação A e 6 minutos de folga
1 Operador com as operações B, C, D e 0 minutos de folga
1 Operador com as operações E, F e 0 minutos de folga
1 Operador com as operações G, H, I e 0 minutos de folga
1 Operador com as operações J, K, L e 1 minuto de folga
$\varepsilon = 43 / (5 \times 10) \times 100 = 86\%$

Balanceamento de uma Célula de Trabalho

Uma Célula de Trabalho consiste num conjunto de PT´s cuja posição não é fixa – os Operadores (polivalentes) podem mover-se entre estes e realizar operações em qualquer deles. A disposição física dos vários PT´s de uma célula é sempre em forma de U. Como resultado, a sequência das sucessivas operações não interessa para efeitos do seu balanceamento. O Exercício seguinte permite ilustrar este caso particular.

Exercício 3

Um certo produto pode ser montado numa Célula de Trabalho a qual integra as 7 operações descritas no Quadro seguinte.

Operações	**Duração** (minutos)
1	10
2	8
3	5
4	7
5	16
6	12
7	10

Presentemente, existem duas Operadoras com qualificação A e três Operadoras com qualificação B em cada turno. Só as Operadoras com qualificação A podem realizar as operações 6 e 7.

a) Quantas unidades podem, no máximo, ser produzidas por hora?
b) Se se pretender que a célula opere à sua capacidade plena, como balanceá-la?
c) Sendo necessário um PCT = 12 minutos e existindo ainda a disponibilidade de duas Operadoras – uma com qualificação A e outra com qualificação B –, como balancear a célula?

Resolução

a) Identifica-se a operação mais longa (estrangulamento): a 5 que dura 16 minutos. Agrupam-se as operações possíveis de forma a nunca ultrapassar aquela duração. Após algumas tentativas, conseguem-se duas alternativas (representadas esquematicamente a seguir).

10	**Oper. B.1**
8	**Oper. B.2**
5	**Oper. A.1**
7	**Oper. B.2**
16	**Oper. B.3**
12	**Oper. A.2**
10	**Oper. A.1**

10	**Oper. B.1**
8	**Oper. B.2**
5	**Oper. B.1**
7	**Oper. B.2**
16	**Oper. B.3**
12	**Oper. A.1**
10	**Oper. A.2**

A operação mais longa determina a capacidade do sistema. Sendo a duração daquela operação 16 minutos, a capacidade média de produção será 60/16 = 3,75 unidades/hora.

b) Depois de várias tentativas, reforça-se a operação 5 com mais uma Operadora com qualificação B, passando esta operação a demorar 8 minutos apenas. A operação estrangulamento passou a ser a 6 com 12 minutos. Agrupam-se as operações possíveis de forma a nunca ultrapassar esta duração. Após algumas tentativas, consegue-se o seguinte agrupamento esquemático:

10	**Oper.B.1**
8	**Oper.B.2**
5	**Oper.A.1**
7	**Oper.A.1**
8 + 8	**Oper.B.3 + Oper.B.4**
12	**Oper.A.2**
10	**Oper.A.3**

A operação mais longa determina a capacidade do sistema. Sendo agora a duração desta operação de 12 minutos, a capacidade média de produção passa para 60/12 = 5 unidades/hora.

Rui Assis
rassis@rassis.com
www.rassis.com
Março/2017