“Custos Degressivos resultantes da Experiência”

Rui Assis
rassis@netcabo.pt

Engenheiro Mecânico IST

Junho/2001

Resumo

Descreve-se a aplicabilidade das chamadas curvas de aprendizagem ou de experiência nas organizações em geral e em contexto fabril em particular. Descreve-se também o método de cálculo dos tempos degressivos de operação. O tempo acumulado de fabricação de um lote de n produtos interessa, por um lado, a quem tem de programar a sua fabricação e, por outro, a quem tem de conhecer o seu custo previsional. Um exemplo de aplicação permite determinar o pay-back de um projecto de lançamento de um novo produto cujo preço de mercado evoluirá previsionalmente de forma conhecida (ou cuja evolução é fixada contratualmente). Este exemplo pode ser resolvido por uma aplicação em EXCEL que acompanha este artigo.

1. Introdução

As curvas de experiência (ou de aprendizagem) têm grande aplicação em ambientes de produção repetitiva de produtos complexos nos quais muitas operações apresentam uma forte componente de trabalho manual.

O facto dos tempos unitários e, logo, os custos de transformação decrescerem com a acumulação da experiência, ou seja, com a dimensão do lote de fabricação, coloca a necessidade de se calcular o tempo médio unitário de forma a servir dois objectivos:

1. Planear a operação (de transformação ou de montagem), multiplicando o tempo médio unitário (horas/unidade) pela dimensão do lote (unidades) a fabricar;
2. Prever o custo da operação, multiplicando o tempo médio unitário (horas/unidade) pelo custo da unidade de *output* ($/hora) e pela dimensão do lote (unidades) a fabricar.

As curvas de experiência são também utilizadas na análise de problemas de natureza estratégica, tais como fixação de preços e de selecção de investimentos.

Em ABC/ABM interessa conhecer a expressão básica do tempo médio unitário, pelo que desenvolvo seguidamente as particularidades desta situação e as fórmulas aplicáveis tomando como referência a construção de aviões.

2. Causas

Na construção de aviões e de mísseis, área onde a tecnologia evolui rapidamente, os prazos assumem particular importância. Assim, os primeiros aparelhos de uma série são aguardados com grande expectativa e a sua produção inicia-se muitas vezes sem aguardar pelas ferramentas necessárias.

Algumas ferramentas elementares e equipamento de utilização geral bastam nesta fase. Além disso, logo que uma ferramenta fica pronta torna-se necessária uma demonstração, o que atrasa o momento da sua utilização normal. À medida que as ferramentas vão ficando prontas os tempos de operação vão diminuindo progressivamente.

Uma segunda causa importante de diminuição dos tempos de operação, agindo de forma contínua, prende-se com a adaptação dos operadores às operações que lhes são confiadas e que se vão repetir ao longo de toda a série. Esta degressão estende-se por um número de aviões tanto maior quanto maior for a proporção de trabalho manual nas operações a realizar. No extremo oposto, as operações realizadas em máquinas apresentam uma degressão nula. Verifica-se também que a degressividade na fabricação de componentes é menor do que na montagem final, visto estas últimas operações incorporarem muito maior número de operações manuais.

A terceira causa da degressividade dos tempos de operações resulta da organização mais eficiente à medida que a produção avança. Em particular, resulta de uma melhor disposição e balanceamento dos postos de trabalho, de uma definição mais precisa e mais detalhada das operações e de uma alimentação de peças dos postos de trabalho a montante e dos armazéns mais regular.

3. Fórmula de *WRIGHT*

Ao estudar o custo médio de um avião em séries diferentes caracterizadas pelo número total de aviões construídos, *Wright* [5] notou que o custo médio da mão de obra se reduzia de 80% sempre que a dimensão da série duplicava. Como se trata do recurso mão-de-obra cuja unidade de *output* é geralmente a hora de fabricação, podemos escrever:

$$t_{2n} = A.t_n$$

em que t_n representa o tempo da série de dimensão N, t_{2n} o tempo da série de dimensão dupla 2n e A a taxa (ou ritmo) a que progride a experiência (ou relação entre t_{2n} e t_n)

O tempo da série, depois de se terem verificado α duplicações, ou seja da série de dimensão $n = 2^{\alpha}$ é dado por:

$$t = t_1.A^{\alpha}$$

Substituindo α na última expressão pelo seu valor retirado da penúltima, obtemos:

$$t = t_1.A^{\log.n/\log.2}$$

Ou, sob outra forma mais conveniente e tendo em conta que $n^{\log.A} = A^{\log.n}$:

$$t = t_1.n^{\log.A/\log.2}$$

É sob esta forma que a fórmula de *Wright* é mais conhecida.

Podemos ver na Figura seguinte a representação gráfica da fórmula de *Wright* para três diferentes alternativas de taxas de experiência: 90, 80 e 70%

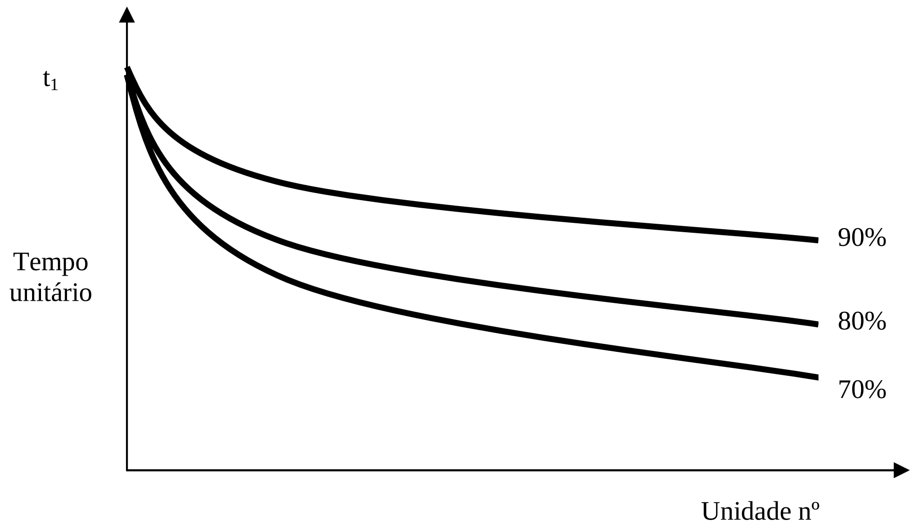

Figura 1 – Lugar geométrico dos pontos correspondentes às curvas de experiência de 70, 80 e 90%

A fórmula de *Wright* permite:

- determinar o tempo de operação do elemento de ordem n na série;
- determinar o tempo médio acumulado de operação do elemento de ordem n na série;
- comparar tempos médios de séries diferentes.

Exemplo 1

Chase [2] fornecem um exemplo que permite ilustrar a evolução previsional dos tempos de uma produção para a qual a Engenharia especificou t_1 = 100 horas e A = 0,8. Os resultados encontram-se representados no quadro e na Figura seguinte.

Elemento n da série	**Tempo unitário t_n** (horas)	**Tempo acumulado $\sum t_n$** (horas)	**Tempo médio unitário acumulado $\sum t_n/n$** (horas)
1	100,000	100,000	100,000
2	80,000	180,000	90,000
4	64,000	314,210	78,553
8	51,200	534,591	66,824
16	40,960	892,014	55,751
32	32,768	1.467,862	45,871

Quadro 1 – Tempo necessário para realizar uma operação com uma curva de aprendizagem de 80% para algumas das unidades da série

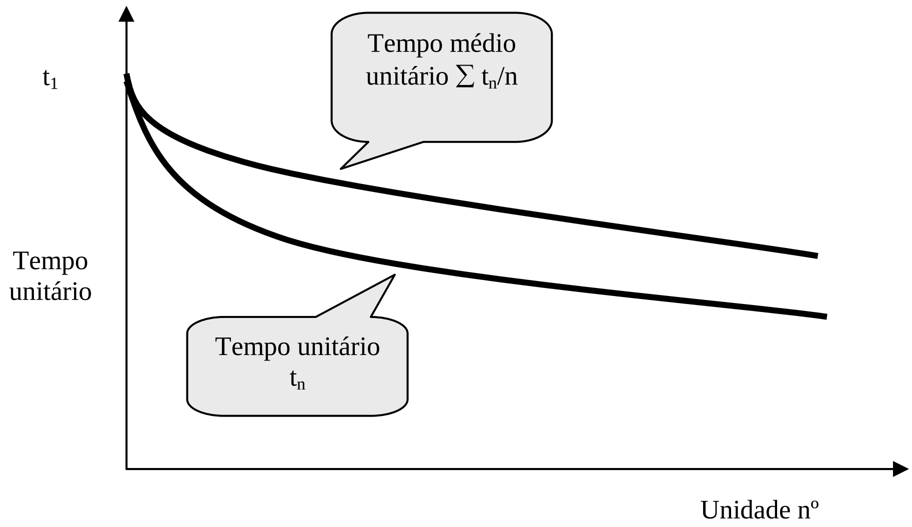

Figura 2 – Curva de 80% de aprendizagem com a evolução do tempo unitário e do tempo médio unitário

Para efeito do cálculo do custo *standard* de operação, é importante desenvolver uma expressão genérica do tempo médio unitário, o que farei mais adiante já que o método usado na coluna (4) do quadro acima não é de forma nenhuma expedito.

4. Existência de um limite mínimo

O tempo unitário de produção (ou tempo marginal) não pode reduzir-se indefinidamente pois existem limites práticos à sua progressão impostos por factores tecnológicos, organizacionais e humanos.

Nestas circunstâncias, a expressão de *Wright* pode ser adaptada, assumindo a seguinte forma:

$$t = t_m + (t_1 - t_m).n^{\log.A/\log.2}$$

em que t_m representa o tempo mínimo possível alcançar (embora teoricamente só o seja quando $n = \infty$). Neste caso, a taxa de experiência representa o factor do qual se reduz o ganho máximo possível do tempo unitário de produção ($t_1 - t_m$) sempre que a produção duplica.

Calculemos agora a expressão geral que pode fornecer o tempo médio unitário $\bar{t}$ de fabricação de um lote de L unidades, o qual multiplicado pelo custo da hora (unidade de *output*) fornece o custo *standard* da fabricação daquela série.

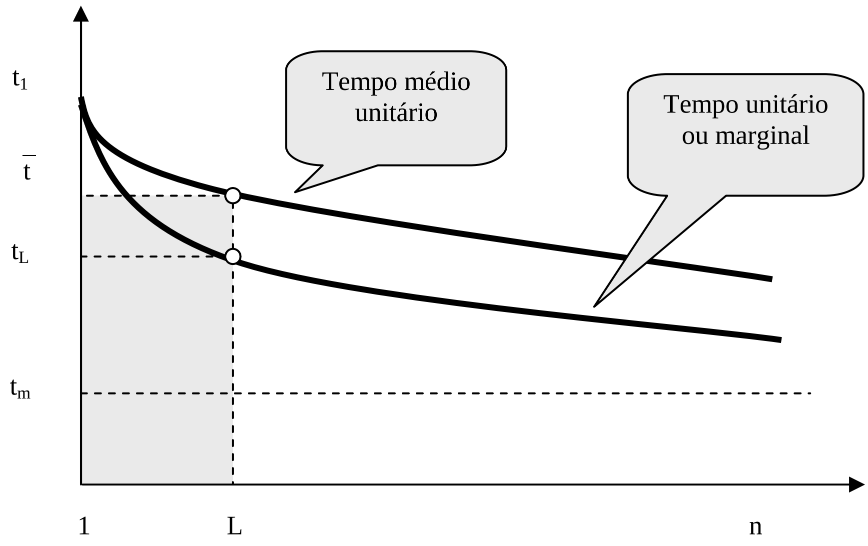

Figura 3 – Curva de aprendizagem com o tempo unitário tendendo para um valor limite mínimo

Se considerarmos a função de *Wright* como uma função contínua, podemos integrá-la entre 1 e L, obtendo:

$$\bar{t} = 1/(n-1).\left[\int t_m.dn + \int (t_1 - t_m).n^{\alpha}.dn \right]$$
$$\bar{t} = 1/(L-1).\left\{ t_m.(L-1) + (t_1 - t_m).\left[(L^{\alpha+1} / (\alpha+1) - 1 / (\alpha+1)\right]\right\}$$

$$\bar{t} = t_m + (t_1 - t_m).(L^{\alpha+1}-1)/\left[(L-1).(\alpha+1)\right]$$

E o tempo total de fabricação T de n unidades será simplesmente:

$$T = \bar{t}.L$$

Estas expressões fornecem resultados bastantes consistentes com o tratamento analítico discreto dos tempos unitários. Com efeito, se calcularmos o tempo total de fabricação de L unidades - somando todos os tempos unitários - ou se calcularmos a média acumulada dos tempos unitários de fabricação de L unidades, encontramos valores ligeiramente superiores àqueles fornecidos pelas expressões deduzidas atrás. Esta diferença deve-se ao facto de a curva dos tempos unitários apresentar uma forma côncava, de onde resulta que a integração entre quaisquer dois pontos fornece uma área sempre superior à média aritmética das ordenadas desses dois pontos. Esta diferença é muito pequena raramente ultrapassando 3% mesmo em combinações mais desfavoráveis dos vários parâmetros. Na literatura consultada a integração é realizada entre 0 e L, conduzindo a desvios bastante superiores.

Vejamos um exemplo de aplicação.

Exemplo 2

Suponhamos que se vai lançar em fabricação um lote de 20 unidades de um certo produto para o qual a Engenharia estima 50 horas como tempo da 1ª unidade, 30 horas como tempo mínimo possível atingir e 80% como taxa de experiência. Qual o tempo médio unitário das 20 unidades? E qual o tempo necessário para a sua fabricação?

Valor do coeficiente de degressividade:

$$\alpha = (\log.0{,}8)/(\log.2) = -0{,}3219$$

Tempo médio unitário:

$$\bar{t} = 30 + (50 - 30) \times (20^{-0{,}3219+1} - 1)/\left[(20 - 1) \times (-0{,}3219 + 1)\right] = 40{,}28 \text{ horas}$$

Tempo total:

$$T = 40{,}28 \times 20 = 805{,}66 \text{ horas}$$

No quadro seguinte podemos observar a história previsional das primeiras 25 unidades. A coluna (2) fornece os tempos unitários. A coluna (3) fornece a média acumulada dos tempos unitários. A coluna (4) fornece o tempo médio unitário calculado pela expressão acima. A coluna (5) fornece o somatório de todos os tempos unitários. E, finalmente, a coluna (6) fornece o tempo total calculado pela expressão acima.

Comparando a coluna (3) com a coluna (4) e a coluna (5) com a coluna (6), notamos que as primeiras são sempre ligeiramente superiores às segundas. No caso do lote de 20 unidades, o erro introduzido pela fórmula no cálculo do tempo total é de:

$$\varepsilon = (805{,}67 - 809{,}70) / 809{,}70 \times 100 = -0{,}498\%$$

L (1)	**t** (2)	**tméd*** (3)	**tméd(f)** (4)	**T*** (5)	**T(f)** (6)
1	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
2	46,00	48,00	47,70	96,00	95,39
3	44,04	46,68	46,32	140,04	138,95
4	42,80	45,71	45,34	182,84	181,35
5	41,91	44,95	44,59	224,75	222,93
6	41,23	44,33	43,98	265,99	263,89
7	40,69	43,81	43,48	306,68	304,34
8	40,24	43,36	43,05	346,92	344,36
9	39,86	42,98	42,67	386,78	384,03
10	39,53	42,63	42,34	426,31	423,39
11	39,24	42,32	42,04	465,55	462,48
12	38,99	42,04	41,78	504,54	501,33
13	38,76	41,79	41,53	543,29	539,95

14	38,55	41,56	41,31	581,85	578,39
15	38,36	41,35	41,11	620,21	616,64
16	38,19	41,15	40,92	658,40	654,73
17	38,03	40,97	40,74	696,44	692,66
18	37,89	40,80	40,58	734,32	730,46
19	37,75	40,64	40,43	772,07	768,12
20	37,62	40,48	40,28	809,70	805,67
21	37,51	40,34	40,15	847,20	843,09
22	37,39	40,21	40,02	884,60	880,41
23	37,29	40,08	39,90	921,89	917,63
24	37,19	39,96	39,78	959,08	954,76
25	37,10	39,85	39,67	996,17	991,79

Quadro 2 – Tempos unitários, médios e totais para várias alternativas de dimensão do lote L

6. Estratégia de fixação de preços

Uma empresa que conheça bem as suas curvas de experiência pode usar a seguinte estratégia:

No caso do lançamento de um novo produto, fixa o seu preço suficientemente baixo, de forma a pré-estabelecer uma certa quota de mercado e mantém depois esta quota, reduzindo progressivamente o preço do produto, fazendo reflectir a redução do custo conseguida pela experiência, conforme ilustrado na Figura seguinte;

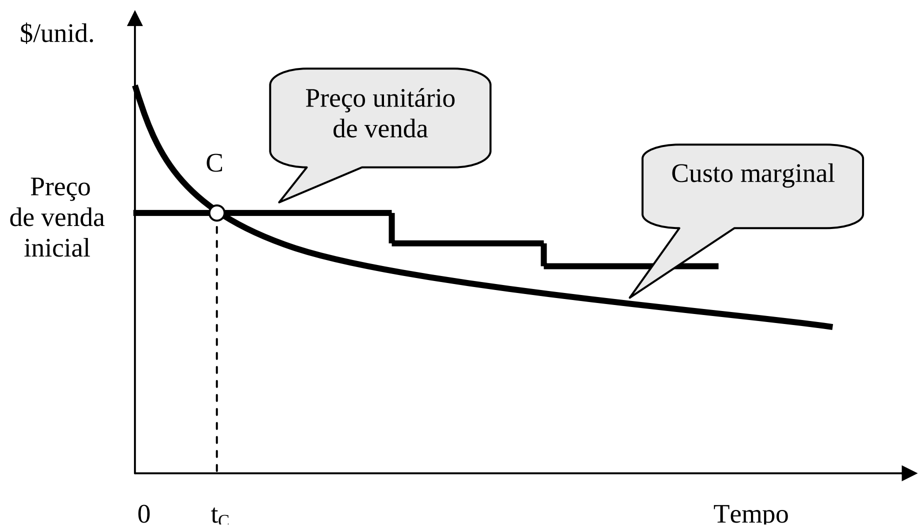

Figura 4 - A empresa fixa, na fase de lançamento, um preço de venda inferior ao seu custo. Ganhando experiência, consegue reduzir o custo até igualar o preço no momento t_C e recuperar a partir daí

No caso de penetração no mercado existente, avalia a curva descendente dos preços no mercado e compara com a sua curva de experiência possível, conforme ilustrado na Figura seguinte.

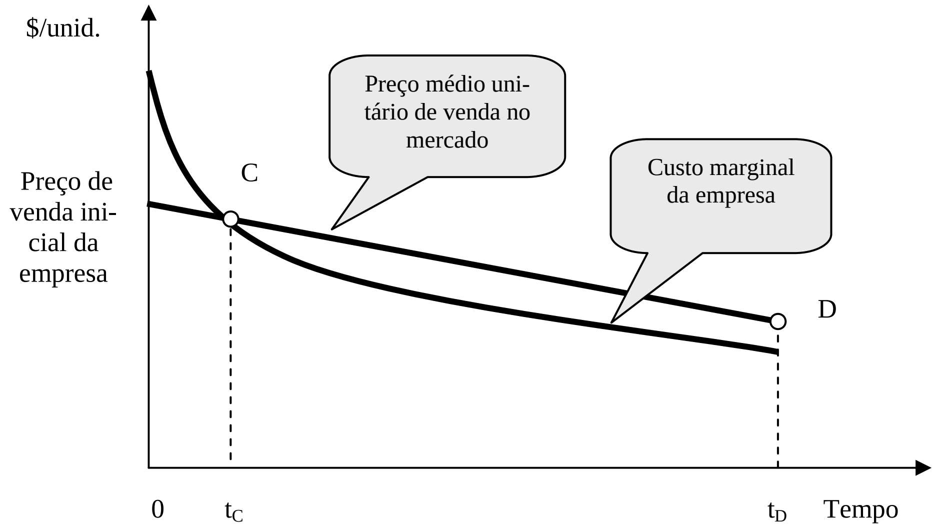

Figura 5 - A empresa avalia se o intervalo de tempo necessário para atingir o ponto C é ou não demasiadamente longo, de forma a garantir o reembolso das despesas de lançamento, antes de o produto ser descontinuado (ponto D)

Em contratos que envolvam tipicamente produtos com longos ciclos de fabricação, pequenas quantidades e custos elevados, a escolha da curva de experiência é determinante para o sucesso do negócio. É frequente, nestes casos, fixar em contrato a evolução previsional dos preços que devem reflectir os ganhos possíveis da experiência.

Na indústria aeronáutica é prática corrente a fixação do tempo unitário da centésima unidade (o t_{100}) como base para cálculo dos patamares de custo e de preço. Neste caso, as fórmulas anteriores, com ou sem esquecimento, continuam válidas, havendo apenas que ajustar o t_1 em conformidade com o valor do t_{100}. Assim e de acordo com a Figura 6, teremos:

$$t_1 = t_m + (t_{100} - t_m) / 100^{\alpha}$$

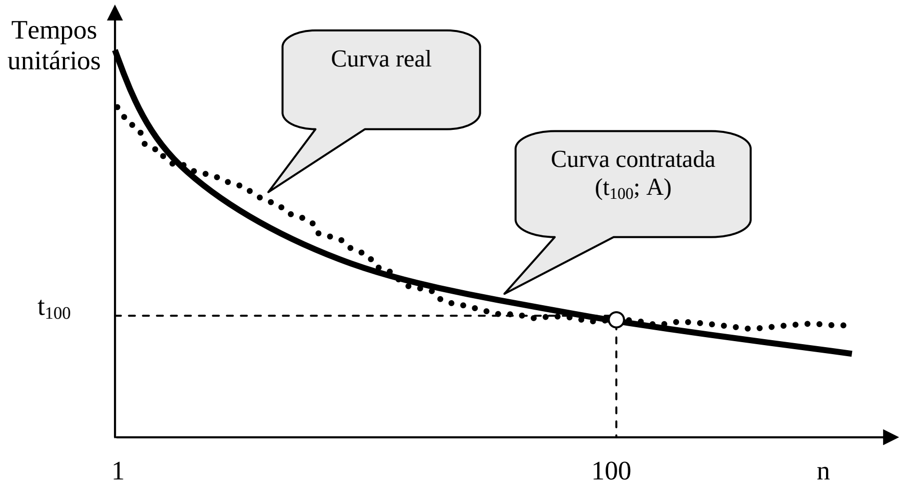

Figura 6 – Curva de experiência teórica prevista e curva de experiência real

Exemplo 3

Uma empresa fabricante de máquinas de embalagem prepara-se para lançar um novo produto no mercado. A empresa pretende fixar um preço de venda suficientemente baixo, de forma a pré-estabelecer uma certa quota de mercado e manter depois esta quota, reduzindo progressivamente o preço de venda das máquinas, fazendo reflectir a redução do custo conseguida pela experiência.

As instalações onde as actividades se vão desenrolar laboram no regime de 1.850 horas/ano com uma disponibilidade média de 87%. O custo total das actividades fabris previstas é de 63.000 u.m./ano.

O custo dos materiais por máquina está estimado em 2.200 u.m.. O investimento em ferramentas dedicadas e em actividades de desenvolvimento foi apurado em 5.000 u.m.. A Engenharia estima um tempo de produção para a primeira unidade de 50 horas, um tempo unitário mínimo possível atingir de 30 horas e uma taxa de experiência de 80%.

A política de preços de venda foi fixada da seguinte maneira (a preços de hoje):

As primeiras 20 unidades: 4.000 u.m./unidade;
As 15 unidades seguintes: 3.800 u.m./unidade;
Daqui em diante: 3.700 u.m./unidade.

Condiderando uma taxa mínima de atractividade de 19%, em vigor na empresa para este tipo de projectos de investimento,

a) Quantas unidades deverão ser produzidas para que o custo unitário se reduza abaixo do preço de venda e, aproximadamente, quando se verificará esse momento?
b) Quantas unidades deverão ser produzidas para que o custo unitário médio se reduza abaixo do preço de venda e, aproximadamente, quando se verificará esse momento?

c) Qual o *pay-back* deste projecto, isto é, qual o nº de unidades necessárias vender para que as receitas acumuladas sejam suficientes para compensar o investimento mais os custos entretanto acumulados? E, aproximadamente, quando se verificará esse momento?

As respostas são as seguintes:

a) Uma vez construído no EXCEL um Quadro com a evolução previsional dos tempos unitários e dos custos, poder-se-á ver que a inversão do custo unitário mais elevado que o preço de venda se verifica na 3ª unidade (quer a preços actualizados ou não). O momento em que se verificará essa inversão será, aproximadamente, 140 horas úteis de fabricação ou 140/0,87 ≅ 160 horas de funcionamento das instalações.
b) No mesmo Quadro poder-se-á ver que a inversão do custo médio unitário mais elevado que o preço de venda se verifica na 5ª unidade (a preços não actualizados). O momento em que se verificará essa inversão será, aproximadamente, 225 horas úteis de fabricação ou 225/0,87 ≅ 260 horas de funcionamento das instalações.
c) No mesmo Quadro poder-se-á ver que o *pay-back* verifica-se na 35ª unidade (a preços actualizados), ou seja, quando o *cash-flow* acumulado se torna postivo. Esta condição verificar-se-á, aproximadamente, após 1.363 horas úteis de fabricação ou 1.363/0,87 = 1.567 horas ou, ainda, 0,8468 anos (≅ 10 meses) de funcionamento das instalações.

Bibliografia referenciada ou relacionada

[1] ALDER, George L. & Ravinder Nanda, *Learning Curves – Theory and Application*, Industrial Engineering & Management Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, 1982
[2] CHASE, Richard B. & Nicholas J. Aquilano, F. Robert Jacobs, *Production and Operations Management – Manufacturing and Services*, Irwin/Mc Graw-Hill, Boston, 1998
[3] GUIBERT, *Fabrication des Avions et Missiles*, Dunod, 1960
[4] SMITH, Jason, *Learning Curve for Cost Control*, Industrial Engineering & Management Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, 1989
[5] WRIGHT, T.P., *Factors Affecting the Cost of Airplanes*, Journal of Aeronautical Sciences, vol.3, nº 4, Fev.1936

Rui Assis
rassis@netcabo.pt