

CUSTO DE CICLO DE VIDA DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS COM PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

LIFE-CYCLE COST OF INDUSTRIAL EQUIPMENT WITH DYNAMIC PROGRAMMING

Igor Gimenes Cesca¹

Data de entrega dos originais à redação em: 18/01/2016
e recebido para diagramação em: 06/05/2016

No segmento industrial, é comum a aquisição de um equipamento ser decidida somente com base no custo inicial. Entretanto, as principais causas na variação da vida econômica de equipamentos são o valor de revenda e os custos de manutenção. Logo, tal decisão deve ser feita por meio do custo do ciclo de vida do equipamento. Este artigo apresenta um estudo para se encontrar a vida econômica de um grupo de equipamentos industriais por meio de uma metodologia de programação dinâmica. Assim, é possível evitar gastos desnecessários com despesas de manutenção e também evitar uma desvalorização excessiva do equipamento. Além disso, os autores também observam que entre os fatores que determinam o momento ótimo de reposição de equipamentos, a intensidade do aumento dos custos de manutenção foi a variável mais influente na tomada de decisão.

Palavras-chave: Custo de Ciclo de Vida. Programação Dinâmica. Equipamento Industrial - Manutenção e Reparos.

In the industrial sector, the acquisition of equipment is usually decided only on the basis of initial acquisition costs. Nevertheless, the main causes of variation in the economic life of equipments are the resale value and maintenance costs. Therefore, such a decision must be made through the equipment life-cycle cost (LCC). This article presents a study to find the economic life of a group of industrial equipment through a dynamic programming methodology. Thus, it is possible to avoid unnecessary spending on maintenance costs and also avoid excessive depreciation of the equipment. In addition, the authors note that among the factors that determine the optimal timing of equipment replacement, the intensity of the increase in maintenance costs was the most influential variable in decision-making.

Keywords: Life-cycle Cost. Dynamic Programming. Industrial Equipment. Maintenance and Repairs.

1 INTRODUÇÃO

O problema de custo de ciclo de vida possui características técnicas e econômicas. De uma maneira geral, pode-se dizer que os equipamentos industriais (ativos físicos) se deterioram com o passar do tempo e, conseqüentemente, seu rendimento diminui, tanto que a frequência das manutenções aumentam e, por fim, seu valor de mercado do ativo diminui (PARK; SHAPE-BETTE, 1990). Na Figura 1 há um exemplo de gráfico dos custos de manutenção e do valor de mercado de um equipamento ao longo dos anos.

Pela Figura 1, no ano 0 (zero), os custos de manutenção são nulos, enquanto o valor do ativo (no ano zero ocorre o custo de aquisição) é de R\$50.000,00. Com o

passar dos anos, é possível ver que o valor de mercado do ativo passa a ser menor do que os custos de manutenção.

No segmento industrial, as máquinas e equipamentos apresentam custos de aquisição bastante elevados e de manutenções crescentes. O conhecimento dos de manutenções é importante, uma vez que, com o passar do tempo, estes podem aumentar e equivaler a várias vezes o valor do custo de aquisição do ativo (BROWN; YANUCK, 1985). Conseqüentemente, a aquisição de um equipamento não deve ser decidida por meio apenas de seu custo inicial, mas por meio de uma metodologia de custo de ciclo de vida, *life cycle cost* (LCC), em inglês, a qual leva em conta as despesas de manutenção e também a desvalorização do ativo físico (DHILLON, 2010). Portanto, o emprego de uma metodologia de custo de ciclo de vida pode contribuir significativamente para a tomada de decisão da aquisição de equipamentos.

Nessa linha de pensamento, antes de os ativos serem adquiridos, deve-se determinar o momento ótimo de troca destes. Isso ocorre quando o custo de ciclo de vida atinge seu valor mínimo. O conhecimento da vida econômica se torna importante porque orienta o tomador de decisão no sentido de substituir os ativos de modo que o custo de manutenção unitário seja minimizado no longo prazo. De acordo com MARQUES (2003), as conseqüências de

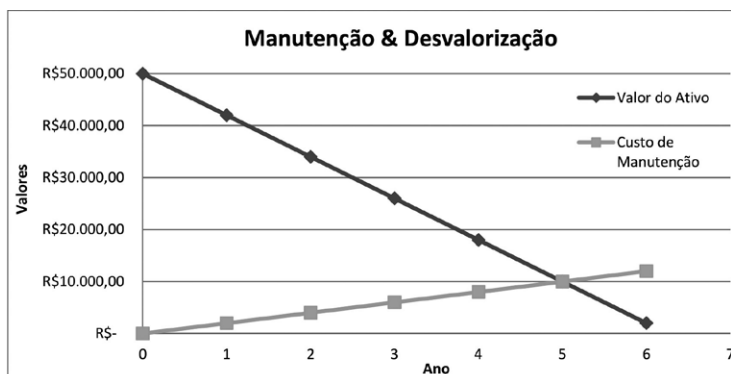


Figura 1 – Manutenção e desvalorização de ativos

¹ - Mestre em Ciências e Engenharia do Petróleo e Matemático pela Unicamp - Professor no Centro de Economia e Administração da PUC-Campinas e aluno de doutorado de Energia na USP - Endereço: Avenida General Valdomiro de Lima, 590, 504-B, São Paulo-SP. Telefone: 19 981782588. < igcesca@gmail.com >.

uma substituição tardia são altos gastos operacionais e de manutenção, além da perda do valor de revenda do ativo.

Na literatura, há trabalhos que quantificam os custos de manutenção e desvalorização de equipamentos a fim de se determinar o momento ótimo de reposição, ou seja, a vida econômica. Uma parte dos trabalhos encontrados dedica-se ao uso de indicadores de fluxo de caixa, como por exemplo, VPL (valor presente líquido), TIR (taxa interna de retorno) e *payback* (ALCHIAN, 1958), (LONGO; ZABONETI, 1989), (DHILLON, 2010), (CESCA; NOVAES, 2012). Enquanto outros trabalhos fazem da metodologia de programação dinâmica (BELLMAN, 1955), (WADDEL, 1983), (ANDERS et al., 2001), (HARTMAN, 2004), (ABENSUR, 2010), (CESCA, 2012).

O uso de indicadores de fluxo de caixa é de mais fácil compreensão, logo mais utilizado. De tal forma que os principais livros textos de engenharia econômica e administração financeira de graduação dedicam um capítulo ao assunto – como, por exemplo, em De Oliveira (1982), Park & Sharpe-Bette (1990), Ross et al. (2002), Hillier & Lieberman (2006) –, enquanto que a metodologia de programação dinâmica, por ser considerado um assunto muito difícil é excluída. Assim, esta metodologia só é trabalhada em livros específicos de matemática aplicada para pós-graduação, como por exemplo, em Baumeister & Leitão (2008). Nesse sentido, os autores deste trabalho propõem um estudo de caso de substituição de equipamentos por meio da metodologia de programação dinâmica, a fim de mostrar que tal metodologia não é tão complicada e pode ser tão acessível quanto aos indicadores de fluxo de caixa.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: primeiro esta introdução. Depois, uma descrição da metodologia de programação dinâmica aplicada ao problema de custo de ciclo de vida de equipamentos. Em seguida é feito um estudo de caso para exemplificar o procedimento. Na sequência, é feita uma análise de sensibilidade das variáveis para melhor análise dos resultados. Por último são estabelecidos os resultados e conclusões do artigo.

2 METODOLOGIA

2.1 Fluxo de Caixa de Custos de Manutenção e Aquisição

O processo para incorporar o LCC na tomada de decisão consiste em algumas etapas. Primeiramente, escolhem-se os ativos físicos que se deseja determinar a vida econômica. Em seguida, levantam-se os custos de manutenção, operação, aquisição e revenda do equipamento. Dessa maneira, organizam-se todos esses valores em um fluxo de caixa.

Em seguida, é necessário que todos os valores de entrada e saída de caixa ao longo dos anos da vida do ativo sejam contabilizados no valor do dinheiro; isto é, que as taxas de juros e inflação sejam levadas em consideração. Dessa forma, todos os custos são descontados a taxa de juros referente ao período. A justificativa em levar em conta essas taxas está em mostrar a comparação entre ações futuras e presentes. Logo, é desejável comparar as consequências entre tomar uma decisão hoje e uma decisão amanhã.

2.2 Método de Programação Dinâmica para Estimativa de Vida Econômica

Para os problemas de reposição de equipamentos, o processo de decisão ocorre ano a ano. Isto é, ao final de

cada ano é decidido se o equipamento vigente deve ser repostado ou se continua em operação por mais um período. Logo, ocorre um processo que se chama de decisão do tipo multiestágio ao longo do tempo.

Uma maneira de resolver esses tipos de problema é usando técnicas de programação dinâmica (BELLMAN, 1955). Segundo Baumeister & Leitão (2008), em otimização, o conceito de *programa* surgiu da economia e está relacionado ao desenvolvimento de planejamentos ótimos de produção. Assim, a “programação dinâmica é uma técnica matemática útil para criar uma sequência de decisões inter-relacionadas. Ela fornece um procedimento sistemático para determinar a combinação de decisões ótimas” (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Os problemas de programação dinâmica são divididos em *estágios* e *estados*. No problema de vida econômica e reposição de ativos, cada estágio representa um ano diferente, sendo que em cada ano deve se tomar a decisão de substituir ou não o ativo. Já os estados representam a idade do equipamento para o estágio atual. Nos estágios são tomadas as decisões de otimização, tal que a decisão feita em cada estágio determina o estado no estágio seguinte.

Todos os problemas com resolução através de programação dinâmica são resolvidos recursivamente. Assim, começa no estágio N até o estágio 1. Na Figura 2 encontra-se um diagrama que ilustra a abordagem de árvore de decisão que mostra todo o processo.

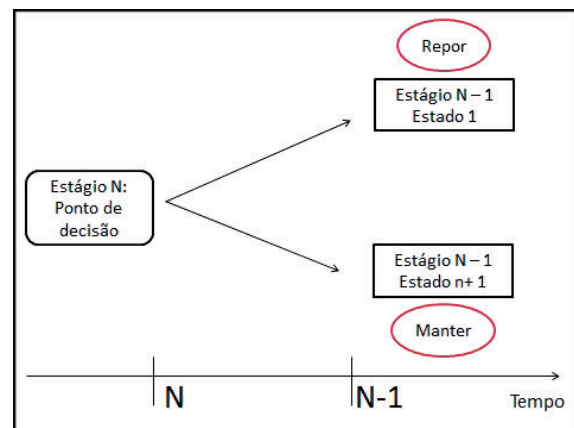


Figura 2 – Diagrama de árvore de decisão do processo de decisão

Na Figura 2 é preciso ficar atento à linha do tempo, a qual parte do maior para o menor, ou seja, o tempo regressa. Logo, toma-se a decisão no estágio N : Repor ou manter o equipamento? Em ambas as decisões, o novo estágio será o $N - 1$, ou seja, será feita uma nova decisão para o ano anterior, uma vez que a solução é recursiva. Em relação aos estados, caso o equipamento seja repostado o novo estado será igual a 1 , uma vez que haverá um novo equipamento e este estará no seu primeiro ano de vida. Caso não haja reposição, ou seja, o equipamento vigente foi mantido, o novo estado é $n + 1$, isto é, o equipamento vigente ficou um ano mais velho.

Para modelagem de programação dinâmica, a função objetivo será $f_N(n)$, que equivale ao custo futuro de um equipamento, cuja idade é n , para os próximos N anos. De acordo com os equipamentos utilizados será tomado como premissa que os equipamentos possuem

rendimento constante enquanto estão disponíveis. Entretanto, haverá despesas com manutenções periódicas preventivas e com manutenções corretivas. Assim, o equipamento vigente será modelado por meio das funções $C(n)$ (custo de manutenção no ano n), e $R(n)$ (valor de revenda do ativo) e por último, a variável A , que representa o valor de aquisição do ativo.

A equação (1) mostra a modelagem

$$f_N(n) = \min\{A - R(n) + C(1) + f_{N+1}(1); C(n + 1) + f_{N+1}(n + 1)\} \quad (1)$$

A equação (1) mostra como calcular $f_N(n)$ quando se conhece $f_{N+1}(n)$. Sendo que o primeiro termo de (1) corresponde à compra de um novo equipamento, enquanto o segundo termo representa a manutenção do equipamento durante o mesmo estágio.

A decisão econômica ótima é tomada comparando-se os valores da relação de recorrência referentes a manter ou substituir o equipamento para o ano seguinte do processo, isto é, o equipamento é mantido quando o custo de retenção é menor que o custo de substituição; caso contrário, o equipamento deve ser substituído.

3 APLICAÇÃO NA PREVISÃO DE CUSTO DE MANUTENÇÃO E VIDA ECONÔMICA DE UM MOTOR

Para ilustrar a modelagem de vida econômica de ativos empregando-se programação dinâmica, toma-se como exemplo o caso de substituição de um motor utilizado no sistema de geração de energia cujo valor de aquisição é R\$ 75.000,00, com as despesas de manutenção e valores de revenda, já em fluxo de caixa descontados, conforme descreve a Tabela 1. De acordo com Ross et al., (2002), "a demonstração em fluxo de caixa ajuda a explicar a variação dos saldos de caixas e aplicações financeiras".

Vale mencionar que este é um exemplo meramente ilustrativo. Os valores adotados na Tabela 1 são hipotéticos. Além disso, se supõe que o equipamento deve ter uma vida útil de seis anos. Assim, o ponto de partida para o cálculo é $N=6$. Logo, a equação (1) relaciona $f_6(n)$ com $f_7(n)$. Então, $f_7(n)$ é a condição de contorno, ou seja, é o valor que o equipamento é vendido ao final da sua vida útil. Logo, $f_7(n) = -R(n)$, adotando a equação (1) para modelar os dados e substituindo os valores, tem-se que o modelo de substituição de ativos é da seguinte forma:

$$f_N(n) = \min\{75000 - R(n) + 2000 + f_{N+1}(1); C(n + 1) + f_{N+1}(n + 1)\}.$$

Para a equação $f_6(n)$:

$$f_6(n) = \min\{75000 - R(n) + 2000 - R(1); C(n + 1) - R(n + 1)\}$$

Para $n = 1$:

$$f_6(1) = \min\{75000 - R(1) + 2000 - R(1); C(2) - R(2)\}$$

$$f_6(1) = \min\{75000 - 52000 + 2000 - 52000; 3500 - 44000\}$$

$$f_6(1) = \min\{-27000, -40500\}$$

$$f_6(1) = -40500 \text{ (manter)}$$

E assim, de maneira análoga para os outros estágios e estados. A Tabela 2 exibe os valores da função encontrados para os outros estágios e estados.

Na Tabela 2 é possível ver os cálculos das funções para cada estágio (coluna N), estado (coluna n), na coluna *Manter*, o valor do segundo termo da equação (1) e a coluna *Trocar* o valor do primeiro termo da equação (1). Consequentemente, a coluna *Mínimo* é o resultado da função definida.

Dessa maneira, para encontrar a vida econômica do equipamento devem-se analisar as decisões ótimas a partir dos estágios e estados iniciais. Conforme é possível ver nas equações abaixo:

$$f_1(1) \Rightarrow \text{manter}$$

$$f_2(2) \Rightarrow \text{manter}$$

$$f_3(3) \Rightarrow \text{manter}$$

$$f_4(4) \Rightarrow \text{trocar}$$

$$f_5(1) \Rightarrow \text{manter}$$

$$f_6(2) \Rightarrow \text{manter}$$

Assim, a decisão ótima é de trocar o equipamento quando este atinge o quarto estágio e estado. Isso implica que o motor possui uma vida econômica útil de quatro anos.

Tabela 1 – Informações de custo de manutenção e valor de revenda de mercado para equipamentos

Ano	Custos de Manutenção/Ano	Valor de Revenda no Mercado
1	R\$ 2.000,00	R\$ 52.000,00
2	R\$ 3.500,00	R\$ 44.000,00
3	R\$ 5.000,00	R\$ 36.000,00
4	R\$ 6.500,00	R\$ 28.000,00
5	R\$ 8.000,00	R\$ 20.000,00
6	R\$ 9.500,00	R\$ 12.000,00
7	R\$ 11.000,00	R\$ 4.000,00
8	R\$ 12.500,00	R\$ -

4 RESULTADOS

Do modelo aplicado é possível inferir que o equipamento possui uma vida econômica de quatro anos. Além disso, foi feita uma análise de sensibilidade para verificar o impacto da desvalorização do valor de revenda do equipamento e do aumento dos custos de manutenção entre si. Dessa forma, o objetivo foi medir o quanto cada variável (valor de revenda e custo de manutenção) impactou no ciclo de custo de vida dos ativos.

Tabela 2 – Resultados dos cálculos para outros estágios e estados

N	n	Manter	Trocar	Mínimo	Decisão
6	1	-R\$ 40.500,00	-R\$ 27.000,00	-R\$ 40.500,00	Manter
6	2	-R\$ 31.000,00	-R\$ 19.000,00	-R\$ 31.000,00	Manter
6	3	-R\$ 21.500,00	-R\$ 11.000,00	-R\$ 21.500,00	Manter
6	4	-R\$ 12.000,00	-R\$ 3.000,00	-R\$ 12.000,00	Manter
6	5	-R\$ 2.500,00	R\$ 5.000,00	-R\$ 2.500,00	Manter
6	6	R\$ 7.000,00	R\$ 13.000,00	R\$ 7.000,00	Manter
6	7	R\$ 12.500,00	R\$ 21.000,00	R\$ 12.500,00	Manter
5	1	-R\$ 27.500,00	-R\$ 15.500,00	-R\$ 27.500,00	Manter
5	2	-R\$ 16.500,00	-R\$ 7.500,00	-R\$ 16.500,00	Manter
5	3	-R\$ 5.500,00	R\$ 500,00	-R\$ 5.500,00	Manter
5	4	R\$ 5.500,00	R\$ 8.500,00	R\$ 5.500,00	Manter
5	5	R\$ 16.500,00	R\$ 16.500,00	R\$ 16.500,00	Trocar
5	6	R\$ 23.500,00	R\$ 24.500,00	R\$ 23.500,00	Manter
4	1	-R\$ 13.000,00	-R\$ 2.500,00	-R\$ 13.000,00	Manter
4	2	-R\$ 500,00	R\$ 5.500,00	-R\$ 500,00	Manter
4	3	R\$ 12.000,00	R\$ 13.500,00	R\$ 12.000,00	Manter
4	4	R\$ 24.500,00	R\$ 21.500,00	R\$ 21.500,00	Trocar
4	5	R\$ 33.000,00	R\$ 29.500,00	R\$ 29.500,00	Trocar
3	1	R\$ 3.000,00	R\$ 12.000,00	R\$ 3.000,00	Manter
3	2	R\$ 17.000,00	R\$ 20.000,00	R\$ 17.000,00	Manter
3	3	R\$ 28.000,00	R\$ 28.000,00	R\$ 28.000,00	Indiferente
3	4	R\$ 37.500,00	R\$ 36.000,00	R\$ 36.000,00	Trocar
2	1	R\$ 20.500,00	R\$ 28.000,00	R\$ 20.500,00	Manter
2	2	R\$ 33.000,00	R\$ 36.000,00	R\$ 33.000,00	Manter
2	3	R\$ 42.500,00	R\$ 44.000,00	R\$ 42.500,00	Manter
1	1	R\$ 36.500,00	R\$ 45.500,00	R\$ 36.500,00	Manter
1	2	R\$ 47.500,00	R\$ 53.500,00	R\$ 47.500,00	Manter

Foram usados três casos combinados entre si, sendo eles *normal*, *intenso* e *ameno*. Os valores do caso normal são os mesmos do exemplo, o caso intenso representa uma desvalorização e um aumento na manutenção em taxas maiores, enquanto que o caso ameno em taxas menores. A Tabela 3 descreve os resultados encontrados.

A Tabela 3 apresenta os testes de análise de sensibilidade. Na quarta coluna, tempo de vida econômica, há o valor encontrado para cada análise. Assim é possível verificar as variações que ocorrem no tempo de vida econômica do equipamento. Foi possível verificar que:

Tabela 3 – Análise de sensibilidade

Teste	Desvalorização da revenda	Aumento da manutenção	Tempo de vida econômica útil (anos)
(1)	Normal	Normal	4
(2)	Intensa	Normal	4
(3)	Amena	Normal	4
(4)	Normal	Intenso	3
(5)	Normal	Ameno	Maior que 6
(6)	Intensa	Intenso	3
(7)	Intensa	Ameno	Maior que 6
(8)	Amena	Intenso	3
(9)	Amena	Ameno	5

- A redução no valor de revenda amena não gerou modificações relevantes para o modelo de substituição. Apenas no caso de aumento de manutenção ameno. Neste caso, em comparação com o caso de desvalorização amena, a vida econômica do ativo foi reduzida em 1 ano;
- O aumento da manutenção intensa implica em uma menor vida econômica;
- O aumento de manutenção ameno implica em uma maior vida econômica.

5 CONCLUSÕES

No segmento industrial, é comum a aquisição de um equipamento ser decidida somente com base no custo inicial. Entretanto, as despesas com custos de manutenção podem ultrapassar os gastos com a aquisição. As principais causas na variação da vida econômica de equipamentos são o valor de revenda e os custos de manutenção. Neste trabalho, os autores apresentaram a metodologia de programação dinâmica para quantificação do custo de ciclo de vida de equipamentos, a fim de se determinar a vida econômica, isto é, o momento ótimo de reposição.

Em relação às variáveis que afetam a vida econômica – valor de revenda e custos de manutenção – foi possível concluir que quanto mais intensa a desvalorização do equipamento, maior será a vida econômica útil, enquanto que quanto mais intensos forem os aumentos dos custos de manutenção, menor será a vida econômica. Além disso, por meio de uma análise de sensibilidade, foi possível perceber que os custos de manutenção influenciam mais a vida econômica e o momento de reposição do ativo do que a desvalorização do valor de revenda.

REFERÊNCIAS

- ABENSUR, E. O.: Um Modelo Alternativo de Otimização para a Política de Reposição de Equipamentos. *Revista Sinergia*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 140-150, jul./dez. 2010.
- ALCHIAN, Armen. **Economic replacement policy. An abbreviated version of r-224.** RAND CORP SANTA MONICA CALIF, 1958.
- ANDERS, G. J.; ENDRENYI, John; YUNG, C. Risk-based planner for asset management [of electric utilities]. *Computer Applications in Power, IEEE*, v. 14, n. 4, p. 20-26, 2001.

BAUMEISTER, Johann; LEITÃO, Antonio: **Introdução à Teoria de Controle e Programação Dinâmica.** IMPA, Rio de Janeiro, 2008.

BELLMAN, R.: Equipment Replacement Policy. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 3, Nº. 3 (Sep., 1955), pp. 133-136.

BROWN, Robert J. & YANUCK, Rudolph R.: **Introduction to Life Cycle Costing.** The Fairmont Press, Inc. e Prentice-Hall, Inc. EUA, 1985.

CESCA, I. G.: **Previsão de custo de ciclo de vida e gestão econômica de ativos físicos de indústrias do setor energético.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2012.

CESCA, Igor Gimenes; NOVAES, Douglas Duarte. Physical assets replacement: an analytical approach. *arXiv preprint arXiv:1210.3678*, 2012.

DE OLIVEIRA, José Alberto Nascimento. **Engenharia econômica: uma abordagem às decisões de investimento.** McGraw-Hill, 1982.

DHILLON, B. S.: **Life Cycle Costing for Engineers.** CRC Press, 2010.

HARTMAN, Joseph C. Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand. *European Journal of Operational Research*, v. 159, n. 1, p. 145-165, 2004.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J.: **Introdução à Pesquisa Operacional.** Traduzido de *Introduction to operations research*. 8ª Edição, 2006.

LONGO, M.; ZANOBETTI, D. Criteria for asset replacement studies. *Engineering Costs and Production Economics*, v. 17, n. 1, p. 271-275, 1989.

MARQUES, Gláucio M.: **Transformação e Substituição de Equipamentos Utilizando Equações Diferenciais e Programação Dinâmica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2003.

PARK, Chan S.; SHARP-BETTE, Gunter P.: **Advanced Engineering Economics.** John Wiley & Sons, Inc., 1990.

ROSS, Stephen; WESTERFIELD, Randolph W.; JAFFE, Jeffrey F.: **Administração Financeira.** Traduzido de *Corporate finance*, 2ª Ed. Editora Atlas, 2002.

WADDELL, R.: A Model for Equipment Replacement Decisions and Policies. *Interfaces*, Vol. 13, No. 4 (Aug., 1983), pp. 1-7.