

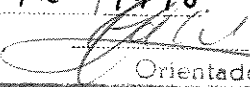
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

Zeev Katz

Dissertação de Mestrado

ESTUDO DE METODOLOGIAS ECONÔMICAS E
MULTIPARAMÉTRICAS APLICADAS À DECISÃO DE
SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS MÉDICOS

Orientador: Prof. Dr. Saide Jorge Calil

Este exemplar corresponde a redação final da tese	
defendida por	ZEEV KATZ
e aprovada pela Comissão	
Julgada em	22 / 12 / 1998
	
Orientador	

Campinas – SP

1998

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

Zeev Katz

ESTUDO DE METODOLOGIAS ECONÔMICAS E
MULTIPARAMÉTRICAS APLICADAS À DECISÃO DE
SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS MÉDICOS

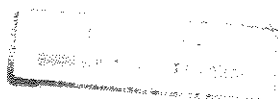
Orientador: Prof. Dr. Saide Jorge Calil

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade
Estadual de Campinas, como
Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Elétrica

Campinas – SP

1998

9903973



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	K159e
V.	Ex.
TOMBO BC/	36445
PROC.	229199
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	03/02/99
N.º CPD	

CM-00120596-B

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

K159e Katz, Zeev
Estudo de metodologias econômicas e
multiparamétricas aplicadas à decisão de substituição de
equipamentos médicos. / Zeev Katz.--Campinas, SP:
[s.n.], 1998.

Orientador: Saide Jorge Calil
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Engenharia biomédica. 2. Medicina – Aparelhos e
instrumentos. 3. Manutenção. 4. Substituição
(Tecnologia). 5. Processo decisório. I. Calil, Saide
Jorge. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Dissertação defendida e aprovada, em 22 de dezembro de 1998, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Saide Jorge Calil – Orientador – DEB/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Geraldo Di Giovanni – IE/UNICAMP

Prof. Dr. Paulo Morelatto França – DENSIS/FEEC/UNICAMP

Dedico este trabalho a meus pais, Geni e Getulio.

Sem eles, este trabalho nunca existiria.

Não há nada mais prático do que uma boa teoria.

Kurt Lewin

(1890-1947)

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Saide Jorge Calil pela orientação, confiança e estímulo imprescindíveis à execução deste trabalho.

Aos professores do DEB que acompanharam esta trajetória, em especial ao Prof. Dr. José Bassani, ao Prof. Dr. Sérgio Muhlen e ao Prof. Dr. Eduardo Tavares.

Aos outros professores que muito me apoiaram, Prof. Dr. José Ferreira de Carvalho, Prof. Antonio Marcio Buainain, Prof. Dr. Eduardo Soares, Prof. Dr. Paulo Morelato França, Prof^a. Dra. Gabriela Stangenhau e Prof. Dr. Frederico Jaime Katz.

Não posso deixar de agradecer a Eloisa, minha madrinha ao longo da realização deste trabalho, além de todos os funcionários do CEB que tanto ajudaram e tornaram-se amigos, em especial a Valdinéia, Érica, Adilson, Paulo, Nirlei, Márcio e Junior, além da ajuda inestimável de Luís Paulo. Também aos funcionários da UNICAMP, principalmente aos funcionários da BAE e da CPG, em especial a Noêmia e Mazé.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos colegas e amigos: José Alberto, Ernesto, Guilherme, Pedro Mikhail, Egon, Geice, Uilson, Sandro, Eliane, Katherine, Claudia, Marden, Joaquim, Alencar, Rodrigo, Graciano, Rubens, Claudinéia e tantos outros, com quem tive a felicidade de conviver. Um agradecimento especial a Alexandre Hermini por seu permanente coleguismo e inestimável ajuda junto ao CAISM.

A Helena e David, que além de meus irmãos são grandes amigos com quem sempre contei, cuja compreensão e bom humor me deram tanto estímulo.

A minha tia Carmen e minha querida avó Liselotte por seu apoio e carinho.

In memoriam às lembranças iluminadas de minha avó Maria e de minha tia Marcela.

Finalmente quero agradecer a minha querida Cintia por todo seu amor, carinho, apoio, ajuda e compreensão ao longo destes anos.

Sumário

<i>Sumário</i>	vii
<i>Lista de Figuras</i>	ix
<i>Lista de Tabelas</i>	x
<i>Lista de Abreviaturas e Siglas</i>	xi
<i>Lista de Equações</i>	xii
<i>RESUMO</i>	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
<i>Capítulo 1 Introdução</i>	1
1.1 Definição de Termos	1
1.2 Justificativa do Trabalho	4
1.3 Histórico através de Revisão Bibliográfica	5
1.4 Delimitação do Trabalho	7
1.5 Objetivo do Trabalho	8
1.6 Metodologia	8
1.7 Organização do Trabalho	10
<i>Capítulo 2 Fatores que Influenciam na Decisão de Substituição de Equipamentos Médicos</i>	11
2.1 Processos que Geram a Necessidade de Substituição	12
2.1.1 Deterioração	12
2.1.2 Evolução Tecnológica	13
2.1.3 Ambiente de Operação	15
2.2 Indicadores Primários	16
2.2.1 Taxa de Produção e Produtividade	16
2.2.2 Confiabilidade	17
2.2.3 Disponibilidade	17
2.2.4 Segurança	19
2.3 Dados de Custos e Receitas	19
2.4 Fatores Adicionais	21
2.4.1 Ergonomia	22
2.4.2 Condição de Manutenção	23
2.4.3 Calibração	24
2.4.4 Conectividade	24
2.4.5 Padronização	24
2.4.6 Marketing	25
2.4.7 Oportunidades	25
2.4.8 Desvantagens Relacionadas ao Processo de Substituição	26
2.5 Comentários	27

Capítulo 3 Método Multiparamétrico	28
3.1 Resumo do Artigo: FENNIGKOH (1992)	29
3.1.1 Metodologia	30
3.1.2 Obtenção do Escore	32
3.1.3 Estudo de Caso	33
3.1.4 Resultados e Conclusão	35
3.2 Comentários	35
Capítulo 4 Métodos Econômicos	38
4.1 Histórico e Revisão Bibliográfica.....	39
4.2 Resumo do Artigo: CHRISTER & SCARF (1994).....	47
4.2.1 Metodologia	48
4.2.2 Estudo de Caso.....	54
4.2.3 Resultados e Conclusões	58
4.3 Comentários	63
Capítulo 5 Estudo de Adaptações ao Método de Christer e Scarf (1994).....	65
5.1 Propostas de Adaptações à Metodologia	65
5.1.1 Encontrar a Opção de Menor Custo por Computador (Não Graficamente)	65
5.1.2 Permitir a Substituição Imediata do Equipamento Atual	68
5.1.3 Avaliar o Efeito um Horizonte Composto de Vários Ciclos de Substituição	70
5.1.4 Cálculo do Custo Anual Distribuído x Cálculo do Custo Médio Anual Dividido.....	72
5.1.5 Modelar a Evolução Tecnológica por um Fator Multiplicativo	74
5.1.6 Calcular a Perda por Atraso na Substituição pela Diferença entre o Custo Médio com Atraso e o Custo Médio Ótimo	76
5.1.7 Contabilizar a Aquisição do Equipamento Atual em um Período de Depreciação x Contabilizar a Aquisição do Equipamento Atual em Parcela Única	77
5.2 Propostas de Adaptações na Forma na Análise de Dados	79
5.2.1 Supor o Custo da Manutenção Preventiva (MP) Nulo	79
5.2.2 Considerar um Fator de Penalidade para a Idade do Equipamento	80
5.3 Comentário.....	82
Capítulo 6 Aplicação	84
6.1 Parâmetros	85
6.1.1 Fator de Desconto	85
6.1.2 Custo de Aquisição.....	85
6.1.3 Custo de Manutenção	86
6.1.4 Tabela de Falhas.....	86
6.1.5 Comportamento Esperado de Falhas	88
6.1.6 Valor de Revenda	89
6.1.7 Penalidades	89
6.1.8 Garantia	89
6.2 Resultados	91
6.3 Comentários e sugestões	93
Capítulo 7 Discussão e Encerramento.....	96
Referências Bibliográficas	99

Lista de Figuras

Figura 1 - Curva do número médio de Falhas Acumuladas por ventilador da amostra por ano	56
Figura 2 - Custo Total Descontado contra a Duração dos Ciclos para uma Máquina de Idade Atual Igual a 6 anos	60
Figura 3 - Custo Total Descontado contra a Duração dos Ciclos para uma Máquina de Idade Atual Igual a 8 anos	60
Figura 4 - Custo Total Descontado contra a Duração dos Ciclos para uma Máquina de Idade Atual Igual a 10 anos	60
Figura 5 - Valores do Custo Médio Anual para diversos K e L , sendo $N=6$, $p = 0$ e $L_{max} = 20$, usando escala logarítmica de falsa-cor.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Escala de Decisões Conforme o Valor de Prioridade de Substituição.....	33
Tabela 2 - Tipos de Equipamentos no Grupo de Teste.....	33
Tabela 3 - Medida dos atributos dos equipamentos de mais alto VPS.....	34
Tabela 4 - Número de Falhas para cada Ventilador da amostra por ano.....	55
Tabela 5 - Decisões de Substituição pela Idade Atual (penalidade $p = 0$).....	59
Tabela 6 - Sensibilidade da Decisão de Substituir ao Custo de Penalidade.....	61
Tabela 7 - Perda por Atrasar a Substituição (Máquina com Idade Atual de 6 anos).....	62
Tabela 8 - Perda por Atrasar a Substituição (Máquina com Idade Atual de 10 anos)....	62
Tabela 9 - Parte da Matriz de Custo Médio Anual para $N=6$	67
Tabela 10 - Mudança nos Resultados Permitindo $K=0$, $p=£370$,.....	69
Tabela 11- Resultados para horizontes de 1, 2 e 3 ciclos com $p = £ 370,00$	72
Tabela 12 - Resultado sendo o custo total distribuído e dividido, para $p = 0$	73
Tabela 13 - Variável de Decisão para vários níveis de evolução tecnológica.....	75
Tabela 14 - Custo médio para $N = 3$, $L^* = 10$, $p = £ 370$, com depreciação (D) de 7 anos e sem depreciação.....	78
Tabela 15 - Efeito de desprezar o custo de MP sobre os resultados.....	80
Tabela 16 - Valores da taxa anual de aumento (p_2) da penalidade por idade que forçam a substituição imediata dos equipamentos (£).....	82
Tabela 17 - Histórico de Falhas dos Ventiladores Neonatais Sechrist IV-100B.....	87
Tabela 18 - Histórico de Falhas dos Ventiladores Neonatais Intermed Inter-3.....	87
Tabela 19 - Valores Usados na Aplicação.....	90
Tabela 20 - Período de Permanência Ótimo para vários N sendo $p = 0$ (períodos em anos).....	91
Tabela 21 - Matriz de Custos Médios Anuais para $N = 7$ anos.....	92
Tabela 22 - Sensibilidade ao Valor de Penalidade por Falha dos Períodos Ótimos de Permanência de Ventiladores Neonatais com 7 anos de uso. (períodos em anos) ..	92

Lista de Abreviaturas e Siglas¹

CAISM – Centro de Atendimento Integral à Saúde da Mulher

CMA – Custo Médio Anual

CAD – Custo Anual Distribuído

CMU – Custo Médio por Unidade de Utilização

CPD – Custo Presente Descontado

EAS – Estabelecimento Assistencial de Saúde

MTBF – *Mean Time Between Failures* ou Tempo Médio Entre Falhas

MTTR – *Mean Time to Repair* ou Tempo Médio para Consertar

ROCOF – Rate of Occurrence of Failures ou Taxa de Ocorrência de Falhas

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UTIN – Unidade de Terapia Intensiva Neonatal

VPS – Valor de Prioridade de Substituição

¹ As siglas utilizadas estão de acordo com a literatura nacional e internacional. Por isso aparecem alguns nomes em inglês.

Lista de Equações

Equação 1 - Modelo de Cálculo do Valor de Prioridade de Substituição	32
Equação 2 - Custo de Manutenção por Período	40
Equação 3 - Custo Médio por Período – Clapham	40
Equação 4 - Vida Econômica (n^*) – Clapham.....	40
Equação 5 - Custo Médio Anual – Eilon <i>et al</i>	41
Equação 6 - Custo Médio Anual Mínimo – Eilon <i>et al</i>	41
Equação 7 - Fator de desconto – Eilon <i>et al</i>	42
Equação 8 - Valor Presente Descontado	42
Equação 9 - Valor Presente do Total de Custos Relacionados a um Equipamento de n anos – Eilon <i>et al</i>	43
Equação 10 - Valor Total Hoje de uma seqüência de substituições indo até o infinito – Eilon <i>et al</i>	43
Equação 11 - Fator de Desconto incluindo Inflação	45
Equação 12 - Cálculo do Custo Presente Descontado (CPD)	51
Equação 13 - Custo Médio Anual.....	52
Equação 14 - Custo Médio por Unidade de Utilização.....	53
Equação 15 - Perda Devida ao Atraso de uma Substituição por k anos	54
Equação 16 - Taxa de ocorrência de falhas dos ventiladores (ROCOF)	56
Equação 17 - Penalidade em função da ROCOF	56
Equação 18 - Valor de penalidade por falha.....	57
Equação 19- Custo Presente Descontado com Substituição Imediata	68
Equação 20 - Cálculo do custo presente descontado supondo c ciclos	71
Equação 21 - Custo Médio Anual adaptado para a existência de c ciclos.....	71
Equação 22 - Fator de Distribuição	73
Equação 23 - Custo Anual Distribuído.....	73
Equação 24 - Custo presente descontado com fator multiplicativo de evolução tecnológica	74
Equação 25 - Perda Anual por desviar o instante de substituição	76
Equação 26 - Custo presente descontado adaptado para considerar um período de depreciação D	78
Equação 27 - Penalidade anual incluindo um fator referente à idade do equipamento ...	81

KATZ, Z. Estudo de Metodologias de Econômicas e Multiparamétricas Aplicadas à Decisão de Substituição de Equipamentos Médicos. Campinas 1998. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, campus de Campinas, Universidade Estadual de Campinas.

RESUMO

A decisão de substituir equipamentos médicos é complexa e envolve grande quantidade de fatores; muitos subjetivos mas nem por isso deixam de ser reais. Embora conhecida a limitação dos métodos de decisão existentes, mostra-se válido o uso de tais métodos no apoio à tomada de decisão.

O conhecimento dos fatores pertencentes ao contexto estudado é parte integrante e indispensável na construção de qualquer método de tomada de decisão. Decisões são tomadas por pessoas, métodos de apoio a estas decisões existem para dar suporte à tomada de decisão. Esta dissertação é direcionada à resposta da seguinte questão: deve a substituição de um equipamento médico ocorrer imediatamente ou não? Os métodos de decisão de substituição abordados neste trabalho foram encontrados na literatura sobre o assunto desde 1940

Foi possível enquadrar os diversos métodos encontrados na literatura em duas classificações. Na primeira classificação a decisão está baseada nas medidas de valores financeiros, neste trabalho os métodos baseados nestas premissas foram chamados “Métodos Econômicos”. Um artigo publicado em 1994 por Christer e Scarf foi escolhido e cuidadosamente descrito para exemplificar esta metodologia.

Na segunda classificação, a decisão está baseada em parâmetros que descrevem algumas condições do equipamento (eficácia, qualidade de resultados, idade e outros). Neste trabalho, tais metodologias são chamadas “Métodos Multiparamétricos”. Um artigo publicado por Fennigkoh em 1992 foi escolhido e descrito para exemplificar esta metodologia.

Devido a razões descritas nesta dissertação, o método econômico foi escolhido para os procedimentos práticos deste trabalho. Portanto um estudo detalhado das suas premissas teóricas e práticas é apresentado, seguido por sugestão de adaptações que foram avaliadas sobre os dados do artigo original.

Em seguida, o método adaptado foi aplicado em um estudo de caso sobre ventiladores pulmonares. O significado do resultado obtido no estudo de caso pôde ser comparado ao significado do resultado apresentado por Christer e Scarf; os resultados se mostraram válidos e a questão se os equipamentos em estudo deveriam ser substituídos imediatamente ou não, pôde ser discutida e respondida.

O estudo do problema da decisão de substituição de equipamentos médicos é muito amplo e abre perspectivas para vários outros estudos. Tanto as adaptações propostas neste trabalho, como a aplicação prática apontam para a necessidade de mais estudos sobre temas correlatos ao deste trabalho.

Palavras-Chave: Engenharia Biomédica, Engenharia Clínica, Equipamentos, Equipamentos Médicos, Substituição, Desativação, Métodos de Decisão, Manutenção

KATZ, Z. A Study of Economical and Multiparametrical Methodologies Applied to Support the Medical Equipment Replacement Decision. Campinas, 1998. 102p. Dissertation (Master Degree on Electrical Engineering) – Electrical and Computing Engineering School, Campus at Campinas, Campinas State University.

ABSTRACT

Decisions for replacement of medical equipment are a complex issue due to a large sort of parameters that are involved. Though some of them are subjective, they still have to be considered.

Whatever the Decision Making Method, it cannot include every factor involved; nevertheless their use has shown to be a useful tool in supporting the decision-maker.

The decision methods discussed by this work focus the replacement of medical equipments to the following question: should the replacement be immediately or not? To solve this question all methods contained in the literature since 1940 were reviewed.

From the several methods founded in the literature, it was possible to confine them into two approaches. In the first approach the decision is based on the measure of financial values. In this work, the methods grounded on this premises were called “Economical Methods”. A work published by Christer and Scarf in 1994 was chosen and carefully described to exemplify this methodology.

In the second approach, the decision is based on parameters that describe some of the conditions of the equipment (efficacy, quality of results, age and so on). In this work, such methodologies are called “Multiparametrical Methodos”. A work published by Fennigkoh in 1992 was choosen and described to exemplify the methodology.

Due to some reasons, described in this dissertation, the economical method was chosen for the practical procedures of this dissertation. Therefore a detailed study of its practice and theoretical premises is presented, followed by suggestions of adaptations and their assessment,

An application of the economical method with some improvements suggested in this dissertation is then presented. The case study was made on mechanical ventilators and is compared to the results obtained by Christer and Scarf.

Decision making studies concerning medical equipment is a broad field and refers to many other research subjects. Further developments on this field and on related areas may lead to even more sophisticated decision and powerful decision making methods able to encompass the complexity of factors inherent to medical activity.

Keywords: Biomedical Engineering, Clinical Engineering, Equipment, Medical Equipment, Equipment replacement, Equipment retirement, Decision-making Methods, Maintenance.

Capítulo 1 Introdução

A decisão de substituir equipamentos médicos tem se mostrado uma questão controvertida na administração hospitalar. Engloba, por um lado, aspectos vitais de segurança e, por outro lado, aspectos administrativos, econômicos e técnicos. Envolve ainda problemas éticos ao questionar sobre o feixe de fatores que pesam na decisão: quais devem prevalecer, quais os mais significativos, quais critérios determinaram sua importância e como.

A questão portanto é multidisciplinar, o que tem dificultado tanto a análise quanto o tratamento do problema de decidir sobre a substituição de um equipamento médico. Além disso, torna mais complicada a criação de um método objetivo para subsidiar objetivamente a tomada desta decisão.

Usualmente a decisão é tomada na base do bom senso, da experiência prática ou por critérios subjetivos — sistemáticas que não são metodológicas, e que podem resultar em profundos danos tanto para a segurança dos pacientes quanto para a administração e economia hospitalar.

Nesta dissertação são discutidas metodologias existentes para apoiar a decisão de substituir equipamentos médicos, com questionamentos tais como: Quais os principais tipos de método existentes? Que tipo de método é mais eficiente para determinados objetivos? Que tipo de método considera aquilo que é mais importante para o investigador? Quão confiável é o método? Quantas variáveis, dentre as muitas envolvidas na questão, ele pode abarcar? Poderá o método ter ampla aplicação, ou está restrito ao local onde foi desenvolvido?

1.1 Definição de Termos

Alguns termos que serão amplamente utilizados neste trabalho são definidos a seguir:

Equipamentos médicos (equivalente a **Aparelhos** ou **Máquinas**): São aparelhos utilizados, direta ou indiretamente, no oferecimento de serviços de saúde. Estes equipamentos

participam em diversos procedimentos do tratamento dos pacientes nos hospitais (por exemplo: diagnóstico, terapia, monitorização de pacientes, automação de exames e apoio à vida), sendo essenciais para vários deles. Seu funcionamento adequado contribui portanto para o sucesso clínico e econômico dos serviços de saúde.

O equipamento médico pode ser visto como um equipamento industrial, uma vez que presta serviços, participa de uma cadeia produtiva e é um sistema complexo, composto de várias partes, que pode falhar e ser consertado.

Por outro lado, os equipamentos médicos atuam diretamente sobre seres humanos de saúde fragilizada. Isto indica que os equipamentos médicos precisam ser estudados de forma diferenciada, levando em consideração fatores humanos e sociais.

Equipamento Atual: O equipamento que exerce no presente uma determinada função produtiva em algum Estabelecimento Assistencial de Saúde (EAS).

Equipamento Substituto: O equipamento escolhido para exercer a função do equipamento atual caso se decida por sua substituição. O equipamento substituto é portanto o substituto natural de um equipamento atual, sendo eleito a partir da aplicação de técnicas para aquisição de equipamentos médicos (CAPUANO, 1997).

Além disso o equipamento substituto é similar ao equipamento atual, ou seja, não é necessariamente idêntico mas também não é uma tecnologia nova, completamente diferente, cuja utilização exigisse uma avaliação tecnológica nas bases de LUCE & BROWN (1995).

Frota de Equipamentos: Equipamentos que executam a mesma função em uma EAS e que podem ser usados indistintamente para a execução de uma certa função. Parte de uma frota pode ser de equipamentos de reserva, que garantem o oferecimento da função de equipamentos ativos da frota em caso de falha destes.

Manutenção: Refere-se ao complexo de ações que garante a realização normal e contínua da função de um equipamento. Qualquer medida neste sentido é válida como ato de manutenção, por exemplo: substituição, reforço de prevenção de defeitos também chamada de manutenção preventiva (MP), reforma/recuperação do equipamento, atualização de partes do equipamento ou aluguel de máquinas de reposição temporária.

Desativação: É desvincular o equipamento de suas funções, dando-lhe um destino (por exemplo: doação, sucateamento, venda, uso como máquina de reserva ou “canibalização” — uso de suas peças para conserto de outros equipamentos similares em melhor estado). O fim a ser dado pode ser definido por lei, por política interna ou decisão pessoal.

Substituição: É uma forma de manutenção; ocorre quando o equipamento atual é desativado e sua função deve continuar a ser oferecida, tornando-se necessária a aquisição de um substituto (reconhecido como seu substituto natural).

É pressuposta a inexistência de fatores que tornem a substituição urgente e imediata, tais como: salto na evolução tecnológica, que torna o equipamento obsoleto; deterioração irreversível; normas que obrigam a substituição imediata, devido por exemplo à insuficiência tecnológica do equipamento atual em comparação com o equipamento substituto ou descoberta de efeitos colaterais inadmissíveis. Estes fatores são discutidos, entre outros, no Capítulo 2.

Substituto Natural: Vide equipamento substituto.

Curso de ação: É uma ação efetiva que pode resolver um determinado problema; um mesmo curso de ação pode resultar em diversos cursos de acontecimentos.

Curso de acontecimentos: É uma sequência de eventos que pode ocorrer a partir de um curso de ação tomado, ou seja, a partir da execução da decisão de seguir um certo curso de ação.

Decisão: É a eleição de algum curso de ação, dentre cursos de ação possíveis. As pessoas envolvidas com a tomada da decisão escolherão aquele curso de ação que provavelmente conduzirá ao curso de acontecimentos que lhes mais pareça mais favorável, baseando-se em uma avaliação metodológica desses cursos de acontecimentos e dos cursos de ação geradores destes.

Metodologia: É a ferramenta que ajuda a sistematizar a tomada de decisão na medida em que analisa o problema, determina cursos de acontecimentos possíveis, avalia esses cursos de acontecimentos, indica os mais favoráveis e os relaciona a possíveis cursos de ação.

Tomada de Decisão: As pessoas envolvidas com a tomada da **decisão**, com base nas informações fornecidas pela aplicação da **metodologia** que aponta para a ocorrência de um certo **curso de acontecimentos**, escolherão o **curso de ação** a ser seguido, ou seja, **tomarão a decisão**.

1.2 Justificativa do Trabalho

Um equipamento pode ser substituído (ou simplesmente desativado) a qualquer momento a partir de sua entrada em operação. É óbvio que esse fato acontecerá necessariamente pois nenhum equipamento pode ser usado *ad infinitum*.

A escolha desse momento é uma decisão que deve considerar uma pluralidade de requisitos — econômicos, éticos, clínicos, normativos e sociais, por exemplo. Só é possível levar essa pluralidade em consideração através de uma metodologia que sistematize e pondere sobre a relação entre os requisitos e cursos de ação possíveis.

O desconhecimento de métodos para apoiar a decisão de substituição conduziu ao uso de sistemáticas subjetivas, de validade duvidosa, como por exemplo: um equipamento é substituído quando falha e seu conserto é caro demais. Entretanto o limite de gastos com o conserto de uma falha não está bem definido; pode corresponder a um percentual do custo de substituição, a um percentual do custo da máquina quando nova ou do seu valor residual (valor de revenda da máquina em funcionamento). Pode ainda variar ou ser constante.

Com o intuito de quantificar e objetivar os critérios de substituição de qualquer equipamento médico, algumas empresas adotaram limiares fixos e gerais para gastos com o conserto de uma falha, como por exemplo, o limiar de 30% do valor de uma unidade nova. Entretanto estas mesmas empresas não sabem explicar a razão desse valor.

Esta sistemática, apesar de sua fragilidade, subjetividade e indefinição, está em uso e é sugerida inclusive por instâncias governamentais no Brasil (MANUAL..., 1995).

Escolher os momentos corretos para fazer substituições de equipamentos médicos é uma forma de otimizar os recursos aplicados para que não haja desperdícios — especialmente

na realidade atual, em que as EAS sofrem cada vez mais limitações financeiras e precisam sobreviver em uma economia competitiva e globalizada.

Do ponto de vista do controle de qualidade, a decisão de substituição influi sobre aspectos qualitativos que são de especial importância no ambiente hospitalar. Neste ambiente os clientes são pessoas doentes, com a saúde fragilizada e a falta de qualidade produz tratamentos ineficazes, resultados adversos e possíveis óbitos — exatamente o oposto àquilo a que um hospital se destina.

Justifica-se portanto o estudo de metodologias que dêem suporte válido e fidedigno para a tomada de decisão de substituição dos equipamentos médicos; este estudo contribuirá para que estas decisões sejam tomadas de forma mais abrangente e consciente, o que deve trazer ganhos econômicos e melhoria na qualidade e segurança do atendimento prestado aos pacientes.

1.3 Histórico através de Revisão Bibliográfica

Nesta revisão, assim como em todo o trabalho, utiliza-se a literatura disponível sobre equipamentos em geral para complementar informações sobre equipamentos médicos. Estas informações permitem suprir deficiências na literatura específica, desde que se mantenha a atenção sobre as particularidades inerentes aos equipamentos médicos.

As primeiras preocupações com a importância da substituição de equipamentos foram registradas em 1940 (PREINREICH). Este artigo teoriza sobre a questão sem, entretanto, apresentar aplicações práticas.

Em 1957, CLAPHAM define a substituição de equipamentos através do cálculo da chamada “vida econômica”, conceito discutido no Capítulo 4 desta dissertação.

Em 1966, EILON et al. aplicam o cálculo de vida econômica de equipamentos de forma mais abrangente do que havia feito Clapham, pois consideraram mais parâmetros: a variabilidade entre as máquinas e o conceito de desconto de valores.

Entre os anos de 1967 e 1969, Hastings participou de uma série de trabalhos sobre o uso de limites de gastos para o reparo de uma falha de um equipamento na decisão de sua

substituição — ou seja, cria uma política de substituição (DRINKWATER & HASTINGS, 1967), (HASTINGS, 1968) e (HASTINGS, 1969). Este tema reaparece em diversos artigos nas décadas seguintes (FLOREZ & FELDMAN, 1989).

ELTON & GRUBER em 1976 discorrem sobre como levar em consideração o processo de evolução tecnológica nas metodologias de substituição.

CHRISTER & GOODBODY (1980) tentam considerar o fator inflação nos processos de decisão de substituição. Em 1988, CHRISTER propõe novas formulações que permitam considerar com mais eficácia o fator evolução tecnológica nas metodologias de substituição.

Em 1990, CLARK & FORSELL sugerem um método para o planejamento da substituição de equipamentos médicos através de uma abordagem sistêmica — uma avaliação de diversos parâmetros em separado e de sua correlação. Este tipo de método é um dos focos de atenção desta dissertação. Para efeito de referência, foi classificado neste trabalho sob o título de Métodos Multiparamétricos (Capítulo 3).

Em 1992, DICKERSON & JACKSON propõem um método de decisão de substituição de equipamentos médicos baseado em análise de valor. Este é um dos exemplos de outro tipo de métodos, classificados neste trabalho sob o título de Métodos Econômicos (Capítulo 4), e que constituem outro foco de atenção desta dissertação.

Neste mesmo ano, FENNIGKOH (1992) formaliza um outro exemplar do grupo dos métodos multiparamétricos, e afirma que tal método é uma alternativa válida para técnicas determinísticas convencionais baseadas na análise de valor, que é o elemento fundamental dos métodos que foram classificados como Métodos Econômicos, nesta dissertação.

Em 1994, CHRISTER & SCARF sistematizam o Método Econômico para decidir a substituição específica de equipamentos médicos. Os autores procuram criar um método que considere os aspectos humanos e emocionais ligados à operação de um equipamento médico, além de seu lado econômico.

Em 1995, HART & COOK apresentam uma nova versão do Método Multiparamétrico, que visa apoiar a decisão entre substituir e atualizar um equipamento. Este artigo ataca fortemente os métodos econômicos, acusando-os de serem pouco práticos, incapazes de se-

guir questões estratégicas de longo prazo e incapazes, também, de lidar com fatores “intangíveis”, como qualidade e flexibilidade.

Duas pesquisas recentes, respectivamente no Reino Unido (CHRISTER & WALLER, 1987b) e nos Estados Unidos (HSU, 1988), estudaram como as substituições eram decididas em diversas empresas. Ambos os trabalhos concluíram que são conhecidas várias formas de apoiar essas decisões² mas poucas são aplicadas e, quando o são, seus resultados têm pouca influência na prática.

De acordo com essas pesquisas, foi verificado que existe dentro das empresas a consciência da importância da decisão de substituição. Mas estas decisões usualmente não são apoiadas por métodos objetivos, pois o pessoal responsável por decidir tem pouco conhecimento da extensão e dos desmembramentos do problema, e se utiliza de métodos que não consideram os fatores que são realmente importantes.

1.4 Delimitação do Trabalho

A sugestão de substituir equipamentos médicos que estão em operação acontece na rotina hospitalar. A confirmação da necessidade de substituir precisa ser baseada em estudos especializados que apoiem ou não esta decisão

Este trabalho se reportará à questão: um determinado equipamento deve ser substituído agora ou não? Esta pergunta pode surgir em diversos instantes durante a vida útil de um equipamento, independentemente de outras medidas que tenham sido tomadas em relação à substituição, como planejamento ou políticas de substituição. Não será abordada neste trabalho a determinação do instante futuro no qual deve ser substituído um equipamento.

Ainda assim, as metodologias ou considerações apresentadas ao longo do desenvolvimento do trabalho podem ser úteis para pesquisas dirigidas a outras questões, como por exemplo, definição de uma política de substituição ou de um planejamento de substituições.

² Taxa de retorno descontada, valor presente total, limite de gastos com manutenção, fórmula própria e índice de lucratividade, por exemplo.

O sentido de substituição neste trabalho permanecerá restrito ao que foi definido na seção Definição de Termos: o equipamento atual pode ser substituído, mas está em condições de permanecer em operação por mais algum tempo se necessário, e o modelo do equipamento substituto é similar ao modelo do equipamento atual.

1.5 Objetivo do Trabalho

O objetivo primordial e gerador deste trabalho é apresentar e discutir como um método de apoio à decisão de substituição de equipamentos médicos (já aplicado em outra realidade) pode ser aplicado localmente, com a finalidade de apoiar a seguinte decisão: substituir imediatamente ou não um determinado equipamento.

Para satisfazer este objetivo torna-se necessário inicialmente estabelecer a extensão da questão da substituição através da análise de processos e fatores inerentes ao problema.

Em seguida, é necessário discutir e analisar metodologias que possibilitam o apoio às decisões de substituição e eleger dentre as metodologias analisadas aquela que melhor atende às condições desta dissertação; isto significa permitir aplicação local da forma mais semelhante possível a uma aplicação original descrita na literatura. Assim será possível comparar o significado dos resultados da aplicação original com o significado dos resultados da aplicação local e estudar sua validade.

É necessário, finalmente, adaptar, apresentar e discutir a aplicação prática local da metodologia escolhida.

1.6 Metodologia

A metodologia usada nesta dissertação é composta de duas etapas. Uma parte teórica baseada no exame da literatura existente sobre o assunto e uma parte prática baseada na implementação e aplicação de um método de decisão.

A parte teórica iniciada por uma revisão bibliográfica, resultou na identificação de fatores relevantes e pertinentes à questão da substituição, bem como na identificação de dois tipos de métodos de decisão existentes.

A literatura não forneceu subsídios para categorizar os fatores relevantes; esta tarefa foi realizada e exposta em todo um capítulo desta dissertação devido a sua importância na compreensão do problema (Capítulo 2).

A partir das informações contidas na literatura, foram identificados dois tipos de métodos com filosofias distintas para apoiar a decisão de substituição. Um artigo representativo foi escolhido para exemplificar e caracterizar cada tipo de método; tal escolha foi baseada nos seguintes critérios: deveria o artigo seguir a filosofia do tipo de método representado, ser recente, ser dirigido especificamente para equipamentos médicos, conter a descrição do método utilizado e descrever uma aplicação do método.

Escolhidos os artigos representativos de cada tipo de método, seguiu-se uma análise das descrições do conteúdo de cada um destes artigos, objetivando apresentar, ilustrar e exemplificar os métodos representados, e ainda, colher subsídios que fundamentassem a escolha de um deles para ser implementado e aplicado localmente.

Foi escolhido o Método Econômico para a aplicação local pois este permitiria a comparação entre os resultados da aplicação local e os resultados da aplicação apresentada no artigo, de acordo com os objetivos desta dissertação.

Para a parte prática foram inicialmente testadas algumas adaptações ao método econômico originalmente descrito no artigo; isto permitiu selecionar adaptações que ampliavam ou simplificavam a proposta original, com o intuito de incluí-las na aplicação local.

A parte prática segue com a aplicação local do Método Econômico, usando metodologia semelhante a do artigo original, acrescida das adaptações selecionadas. Para analisar e reunir os dados necessários à aplicação foram consultados bancos de dados sobre a manutenção dos equipamentos do local de estudo; informações sobre custos e características de operação foram obtidas no local de operação através dos profissionais competentes.

1.7 Organização do Trabalho

O desenvolvimento desta dissertação prossegue com o conteúdo dos capítulos descritos a seguir:

Capítulo 2 – Compila uma série de questões e fatores que influenciam a decisão de substituição. O conhecimento destes fatores é necessário para uma melhor compreensão do problema, serve de base para a avaliação de métodos que auxiliam a tomada da decisão de substituição de equipamentos médicos e também é necessário para a correta aplicação destes métodos.

Capítulo 3 – Trata dos Métodos Multiparamétricos em geral, utilizando em particular do artigo de FENNIGKOH (1992), devido a sua representatividade; visa explicar e exemplificar o funcionamento e os procedimentos desse tipo de método.

Capítulo 4 – Trata dos Métodos Econômicos em geral, utilizando em particular do artigo de CHRISTER & SCARF (1994), devido a sua representatividade; visa explicar e exemplificar o funcionamento e os procedimentos desse tipo de método.

Capítulo 5 – Apresenta adaptações ao método proposto por Christer e Scarf no capítulo anterior. Estas adaptações foram testadas para avaliar se apontavam para possíveis fraquezas e avanços do método.

Capítulo 6 – Este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma aplicação do Método Econômico no Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher (CAISM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) acompanhado da discussão quanto às razões que conduziram à escolha deste método para esta prática, em detrimento do Método Multiparamétrico.

Capítulo 7 – Uma discussão de encerramento conclui os resultados deste trabalho apontando, inclusive, para possíveis temas de pesquisas futuras.

Capítulo 2 Fatores que Influenciam na Decisão de Substituição de Equipamentos Médicos

A substituição como um ato de manutenção que visa garantir o equipamento médico operando da melhor forma em determinada função, está relacionada à pluralidade de fatores que envolve a operação e manutenção dos equipamentos médicos.

Como tratada neste trabalho, a substituição se justifica pelo conjunto das vantagens que pode proporcionar, que podem incluir por exemplo: redução na frequência de falhas, redução nos custos de manutenção, redução no consumo de insumos, redução de pessoal, redução no tempo parado para manutenção, aumento na produtividade, aumento na taxa de produção, efeito de *marketing* ou melhores resultados sob o aspecto clínico.

Essas vantagens se explicitam através da comparação entre a performance do equipamento atual e a que se espera de seu substituto. Portanto, esta comparação deve indicar as vantagens decorrentes da substituição, permitindo avaliar se compensam o ônus que a substituição representa.

O ônus que a substituição representa não se resume ao custo de aquisição do equipamento substituto subtraído o valor de revenda do equipamento atual. Uma série de inconvenientes e desvantagens podem acompanhar o processo de substituição (seção 2.4.8), merecendo também atenção. Assim, os fatores que influenciam decisões de substituição envolvem, entre outros, aspectos da prática clínica, da estratégia institucional, da missão institucional, do mercado e da concorrência, além de questões econômicas, técnicas, éticas, sociais e humanitárias.

Alguns destes fatores são subjetivos, sendo de difícil quantificação e, consequentemente, difícil inclusão em métodos que procurem objetivar a tomada de decisão de substituição. Isto reforça a necessidade de que esses fatores sejam conhecidos e compreendidos. Sua importância é de difícil inclusão nos métodos, mas deverá ser ponderada em relação aos resultados dos métodos no instante da tomada de decisão.

Uma grande quantidade de fatores que influenciam as decisões de substituir equipamentos médicos foi identificada, sendo básico o conhecimento destes fatores para a compreensão do problema de substituição; além disso, seu conhecimento é necessário para a avaliação, entendimento e consequente uso correto de métodos de apoio às decisões de substituição, constituindo assim parte essencial do desenvolvimento deste trabalho.

Os fatores enumerados neste capítulo foram reunidos através de uma coleta feita em diversos trabalhos diferentes, pois apareciam de forma dispersa nestes trabalhos. Não foi encontrada uma forma sistematizada de apresentá-los. A organização deste capítulo corresponde a uma proposta de sistematização dos fatores através da inclusão em categorias funcionais.

2.1 Processos que Geram a Necessidade de Substituição

Os dois processos que atuam em conjunto ou separadamente para levar um equipamento a ser substituído são deterioração (2.1.1) e evolução tecnológica (2.1.2).

A deterioração compara a performance do mesmo equipamento em diversas idades e a evolução tecnológica compara a performance entre equipamentos. Já em 1940, PREINREICH apontava que um processo deteriorativo das máquinas e a existência de evoluções tecnológicas eram fatores de extrema importância na análise do problema de substituição.

Os requisitos de cada ambiente de operação condicionam a forma como esses fatores serão considerados e como efetivamente influenciarão a substituição. Assim, um terceiro fator, o ambiente de operação (2.1.3), se destaca, na medida em que determina a importância que será dada tanto à deterioração quanto à evolução tecnológica.

2.1.1 Deterioração

O processo de deterioração é fruto do desgaste natural relacionado à utilização e à passagem do tempo, e faz com que partes dos sistemas falhem ou passem a não funcionar tão bem quanto deviam. Várias razões para esse processo são citadas por PATTON Jr. (1988).

O desempenho de equipamentos e de sistemas produtivos ou prestadores de serviço, de modo geral melhora ou piora com o passar do tempo (BAGAI & JAIN, 1994). No caso de

degradação ou de piora do desempenho, diz-se que esses equipamentos sofrem um processo de deterioração com a idade e o uso (FLOREZ & FELDMAN 1989).

A condição de um equipamento pode permanecer constante por um período muito longo (WOODMAN, 1967), em uma espécie de “regime estacionário”, ou pode até melhorar — por exemplo quando as peças usadas em reposição às que falham são de qualidade superior. Somente uma avaliação do processo de deterioração permite verificar se este realmente ocorre (ASCHER, 1992), pois o simples passar dos anos não dá certeza da ocorrência de deterioração, nem é causa determinante de substituição.

Pode-se ter uma idéia acerca do avanço da deterioração através da comparação entre características de desempenho da mesma máquina em idades diferentes. Uma avaliação da deterioração depende da possibilidade de avaliar indicadores relativos ao desempenho do equipamento, como por exemplo: taxa de produção, taxa de ocorrência de falhas, produtividade, tempo médio de parada, custo médio por falha e gasto médio com manutenção por período.

Entre algumas conseqüências da deterioração destacam-se o aumento na frequência de falhas (BAGAI & JAIN, 1994), o aumento no tempo de parada a cada falha (JAYABALAN & CHADHURI, 1992), o crescimento nos custos de produção e a queda dos níveis de qualidade (FLOREZ & FELDMAN, 1989).

Espera-se que o equipamento substituto tenha recursos, características e desempenho pelo menos iguais aos do equipamento atual quando novo. Assim, a deterioração de um equipamento é motivo para sua substituição a qual solucionará este problema (JELEN, 1965).

2.1.2 Evolução Tecnológica

Embora a definição clássica de evolução tecnológica seja muito ampla, esta será definida no contexto deste trabalho como as inovações presentes nos modelos de equipamentos oferecidos no mercado. Estes novos modelos podem proporcionar melhorias em recursos técnicos e clínicos em relação aos modelos mais antigos que se refletirão, por exemplo, em qualidade de serviço e de atendimento, padrões de segurança e custos.

A evolução tecnológica, segundo CHRISTER (1988) pode trazer melhoras em atributos como: custos operacionais, variabilidade dos serviços possíveis, maior apelo ao consumidor e fortalecimento da imagem de uma empresa de ponta.

A avaliação da evolução tecnológica é feita pela comparação de diversos indicadores relativos a equipamentos similares, pertencentes a diferentes gerações. Exemplos desses indicadores são: taxa de produção, produtividade, eficácia clínica, taxa de falhas, tempo médio de parada a cada falha, custo médio por conserto, custo médio de manutenção por período e custo médio por período ou por unidade produzida.

Avaliar a evolução tecnológica é mais difícil do que avaliar a deterioração: opostamente à deterioração, o equipamento novo não costuma estar disponível para possibilitar as comparações. Torna-se necessário, portanto, prever o que ocorrerá no futuro. Além disso, também é necessário prever o progresso que ocorrerá no futuro, o que é ainda outro complicador.

Alguns autores sugerem que o estudo do processo evolutivo de certo tipo de equipamento permite a obtenção de um índice de evolução tecnológica que pode ser usado para a previsão dos efeitos da evolução tecnológica (ELTON & GRUBER, 1976).

Entretanto, permanece ainda outra dificuldade na previsão de evoluções tecnológicas: é que estas não ocorrem continuamente no tempo; cada lançamento de um novo modelo implica em descontinuidade na escala evolutiva do tipo de equipamento.

Devido a esta descontinuidade característica à evolução tecnológica e à dificuldade de determinar com confiança um índice de evolução tecnológica, alguns autores (CHRISTER, 1988) propõem que se avalie a evolução tecnológica apenas através da comparação entre as características do equipamento atual e as características estimadas do equipamento substituto — seja objetiva ou subjetivamente.

Segundo Christer (1988) são esperadas de um equipamento substituto algumas melhorias tecnológicas de valor aparente. A substituição de um equipamento pode disponibilizar evoluções tecnológicas que agregarão vantagens suficientes para adiantar a tomada desta providência. Por outro lado, uma substituição às vezes é adiada, à espera do lançamento de uma nova evolução tecnológica.

2.1.3 Ambiente de Operação

Ambiente de operação neste trabalho se refere ao contexto físico no qual o equipamento está inserido. Isto inclui o serviço do qual participa, a EAS a qual pertence, e todo o meio sócio-econômico no qual esta EAS atua.

Conforme características do ambiente de operação — como por exemplo a missão específica do hospital, a concorrência externa, a legislação local, a formação do corpo clínico, o número de equipamentos iguais, a disponibilidade de recursos e a localização geográfica — a performance esperada dos equipamentos é diferente.

Diferentes expectativas de performance indicam diferenças na importância que é dada aos processos de evolução tecnológica e deterioração. Isto afetará a maneira como serão tratados os problemas de substituição. Por exemplo, um hospital que cultiva a imagem de instituição moderna dará muito mais importância a evoluções tecnológicas do que outro de poucos recursos.

Conforme HART & COOK (1995) métodos efetivos para apoiar decisões que envolvem substituição devem incluir a definição de objetivos e de indicadores particulares ao ambiente do problema, ou seja, ao ambiente de operação.

O ambiente de operação é dinâmico, portanto suas exigências e necessidades mudam com o passar do tempo. Desta forma, em uma condição hipotética, um equipamento absolutamente íntegro pode ter que ser substituído devido a, por exemplo, um aumento de demanda que não poderia suprir.

Uma vez discutidos os processos de deterioração, evolução tecnológica e ambiente de operação serão examinados os fatores concretos utilizados em sua avaliação; tais fatores foram reunidos neste trabalho em três grupos: Indicadores Primários, Dados de Custos e Receitas e Fatores Adicionais.

2.2 Indicadores Primários

Entende-se neste trabalho por indicadores primários aqueles fatores que podem gerar números para representar os processos de evolução tecnológica e deterioração, e cuja medida, portanto, permite avaliar estes processos de forma objetiva.

Dentre os indicadores primários foram destacados: **taxa de produção e produtividade (2.2.1)**, **confiabilidade (2.2.2)**, **disponibilidade (2.2.3)** e **segurança (2.2.4)**.

2.2.1 Taxa de Produção e Produtividade

Taxa de produção é o número médio de procedimentos (exames, cortes de tomografia, radiografias, etc.) realizados por um equipamento, dentro de um determinado período de tempo, chamado período de operação (hora, dia, mês, ano). Aqueles equipamentos cuja operação não pode ser dividida em procedimentos individualizados (como por exemplo, ventiladores pulmonares) apresentam dificuldade para a medição da taxa de produção.

Produtividade é a relação média entre o número de procedimentos corretos e o total de procedimentos realizados pelo equipamento em um período de operação.

Taxa de produção e produtividade são diretamente relacionadas ao faturamento que a máquina proporciona por período e, conseqüentemente, ao retorno financeiro que ela propicia. A taxa de produção e/ou a produtividade do aparelho podem cair com o correr do tempo, talvez por efeito de deterioração ou porque os usuários, por qualquer razão, evitam usá-lo, preferindo algum outro equipamento similar disponível (CHRISTER & SCARF, 1994).

O uso de tecnologia e materiais mais modernos permite que modelos mais novos produzam mais do que os antigos (CHRISTER, 1988). Isto provavelmente proporcionará um maior faturamento e poderá inclusive, satisfazer alguma demanda até então reprimida. Portanto, taxa de produção e produtividade influenciam diretamente na decisão de substituir pois a troca do equipamento pode implicar em recuperação e até em ganhos de produção e produtividade, compensando o investimento necessário para a substituição.

2.2.2 Confiabilidade

Confiabilidade é a probabilidade de um equipamento estar operando normalmente em um determinado momento (CROWDER et al, 1991). De forma complementar, confiabilidade é a probabilidade de ocorrer falha do equipamento em um instante determinado.

A medida de confiabilidade é função do tempo ou da idade do equipamento. Essa função pode ser: a probabilidade de ocorrência de falha em um instante determinado, a taxa de ocorrência de falhas (ASCHER, 1992) ou o tempo médio entre ocorrências de falhas (MTBF — *Mean Time Between Failures* — Tempo Médio entre Falhas) (ASCHER & FEINGOLD, 1994).

Em geral, o valor da função que mede confiabilidade não permanece constante ao longo da vida de um equipamento e sua queda indica deterioração. Por outro lado, modernizações e aperfeiçoamentos sobre projetos (evolução tecnológica) podem aumentar a confiabilidade dos novos modelos. A substituição do equipamento que executa determinada função por um novo, deverá proporcionar ganhos reais na confiabilidade da sua função.

Metodologias de substituição usando funções descritivas de confiabilidade são apresentadas por (EILON et al., 1966; LAKE & MUHLEMANN, 1979; CHRISTER & SCARF, 1994), entre outros; estas metodologias fazem análise de custos associando um custo a cada falha. Esses conceitos são amplamente discutidos no Capítulo 4 deste trabalho.

2.2.3 Disponibilidade

Disponibilidade é a expectativa de poder usar o equipamento quando se deseja (PATTON Jr., 1988), quer dizer, a probabilidade do equipamento não estar parado para conserto quando se esperava ser possível usá-lo. Assim, vale a fórmula de ASCHER & FEINGOLD (1984) que descreve a probabilidade do equipamento estar disponível:

$$disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Onde:

MTBF (*Mean Time Between Failures* – Tempo Médio entre Falhas): duração média

dos períodos em que o equipamento esteve disponível entre a ocorrência de duas falhas consecutivas.

MTTR (*Mean Time To Repair* – Tempo Médio para Consertar): duração média dos períodos em que o equipamento esteve indisponível entre a ocorrência de duas falhas consecutivas. É a média dos períodos a partir dos momentos nos quais um determinado equipamento falha até o momento de seu retorno ao funcionamento normal. Estes períodos incluem todos os procedimentos relacionados ao reparo de uma falha: chamada da manutenção, resposta da manutenção, transporte à oficina, horas-técnicas de conserto, espera por peças, testes e retorno do equipamento à operação normal.

Por esta fórmula, a disponibilidade é a razão entre o tempo médio em que o equipamento esteve disponível entre duas falhas consecutivas (MTBF) e o tempo médio total entre a ocorrência de duas falhas, que inclui o tempo disponível (MTBF) e o tempo indisponível (MTTR).

Enquanto um equipamento médico fica parado para conserto ocorre no hospital uma situação potencialmente perigosa (FENNIGKOH, 1992). Podem ocorrer também prejuízos causados pela paralisação de um serviço ou a interrupção de uma cadeia produtiva, além de um acúmulo de trabalho devido a atrasos (LAKE & MUHLEMAN, 1979).

Para reduzir o impacto da parada dos equipamentos pode-se usar equipamentos de reserva ou comprar serviços de terceiros com um custo adicional (JAYABALAN & CHADHURI, 1992).

Conforme mencionado acima, a substituição pode aumentar a confiabilidade, aumentando assim o MTBF. O aperfeiçoamento de projetos, a facilidade na obtenção de peças, maior apoio do fabricante ou contratos de manutenção com prestadores mais eficientes e vantagens normalmente resultantes de substituições, podem reduzir o tempo necessário para consertar os equipamentos (MTTR). Portanto, substituir um equipamento pode proporcionar um aumento significativo em sua disponibilidade.

2.2.4 Segurança

A falha de um equipamento médico pode causar danos ao paciente, a funcionários e a terceiros, tendo um risco associado. A segurança proporcionada pelo equipamento depende da probabilidade de ocorrer uma falha (confiabilidade) e dos danos prováveis associados a cada falha. A substituição do equipamento pode aumentar a confiabilidade, além disso os danos provocados pelas falhas podem ser reduzidos por modernizações e dispositivos existentes em modelos de equipamento mais modernos.

Segurança tem um segundo componente, que são os riscos inerentes à operação do equipamento, por exemplo: possibilidade de contaminação, possibilidade de choques, exposição à radiação ou possibilidade de não ser eficaz. Modernizações podem reduzir estes riscos. Assim, substituindo o equipamento há um aumento na segurança de operação.

Enquanto as normas pertinentes a um equipamento são cumpridas, entende-se que seu funcionamento é seguro e o hospital não é passível de processo por eventuais lesões a pacientes e operadores. Para ter níveis de segurança mais elevados, o hospital pode buscar normas ou padrões mais rígidos para seus equipamentos.

Normalmente os padrões e dispositivos necessários para garantir a segurança e a eficácia dos equipamentos estão definidos nestas normas. Algumas normas proíbem o uso de equipamentos que se mostram pouco seguros, o que força sua substituição imediata.

2.3 Dados de Custos e Receitas

A operação de um equipamento implica em uma série de custos e deve proporcionar receitas; os custos podem ser de vários tipos: propriedade, operação, manutenção, taxas, seguros, custos indiretos, etc.. Os dados sobre custos e receitas relativos a um equipamento fornecem informação quanto a sua performance. Abaixo estão relacionados os principais itens de custos e receitas que têm relação com decisões de substituição.

Custo de Aquisição: O valor do investimento necessário para a compra de um tipo de equipamento.

Valor de Revenda: É uma receita pois todo equipamento usado tem algum valor de mercado. Assim o investimento para a compra de uma unidade substituta é reduzido. O valor de mercado tende a cair com o envelhecimento das máquinas, o que pode indicar o adiantamento da substituição (DRINKWATER & HASTINGS, 1967).

Custo de Manutenção: São os gastos necessários para consertar as falhas do equipamento; incluem mão-de-obra técnica ou contrato de manutenção e peças de reposição. A deterioração resulta no crescimento destes gastos, pois o equipamento quebra mais e os consertos ficam mais caros. DRINKWATER & HASTINGS (1967) e LAMBE (1974), no entanto, apresentam dados indicando que o custo médio do conserto de uma falha não muda com o envelhecimento do aparelho. Assim, a perda de confiabilidade, que resulta no aumento da taxa de ocorrência de falhas, é o principal responsável pelo crescimento dos custos de manutenção por período (referentes a falhas) e como já foi dito, uma razão para substituir o equipamento.

Custo de Falha: É o gasto estimado para compensar as consequências imediatas da ocorrência de uma falha do equipamento custos decorrentes da perda de procedimentos causada pela falha e pagamento de indenizações. O custo de falha pode ser associado ao risco intrínseco da falha que, associado à confiabilidade, indica a segurança de operação do equipamento. Este custo aparece como uma penalidade em CHRISTER & SCARF (1994).

Custo de Parada: Custos associados à parada decorrente de uma falha — faturamento cessante, espaço físico e funcionários ociosos, pagamento de horas-extras, compra de serviços de terceiros e manutenção de unidades reserva. Esse custo é calculado como custo por hora parada. Quanto maior esse custo mais importante é a disponibilidade do equipamento.

Custo de Insumos: A operação de equipamentos médicos consome vários tipos de insumos, como energia elétrica, água, gases, químicos, descartáveis e até unidades de armazenamento de dados. O gasto com insumos pode crescer com o envelhecimento do equipamento. O mais frequente entretanto, são evoluções tecnológicas que reduzem a necessidade de insumos, proporcionando economias que favorecem a substituição.

Custo de Funcionários e Espaço Físico: Evoluções tecnológicas podem reduzir as necessidades de funcionários e espaço físico para a operação de modelos mais modernos de um equipamento (DAVIS, 1992), aumentando o interesse econômico da substituição.

Impostos, Taxas e Seguros: Os valores pagos relativos à propriedade de certos equipamentos, podem afetar decisões de substituição, (CHRISTER & WALLER, 1987a) e (EILON et al., 1966). Aparentemente a escolha do instante da substituição dentro do ano fiscal pode resultar em economias, evitando a incidência de algumas taxas e o duplo pagamento de outras. Por um outro lado, estes valores não parecem ser um fator significativo para decisões técnicas de substituição, como confirmam CHRISTER & WALLER (1987a).

Faturamento: Faturamento é uma receita, o fluxo de entrada de dinheiro relacionado a uma atividade. Não é fácil associar um valor de faturamento a um determinado equipamento, mas é relativamente fácil medir as perdas de faturamento relacionadas à sua deterioração.

A avaliação do comportamento do faturamento com o envelhecimento do aparelho pode ser feita separando dois componentes; o faturamento previsto na ausência de falhas e a perda de faturamento relacionada às falhas. A operação sem falhas do equipamento pressupõe um faturamento constante. A perda de faturamento relacionada a falhas já está incluída nos custos de parada do equipamento.

2.4 Fatores Adicionais

Conforme indicado anteriormente os fatores adicionais são aqueles que têm importância para a avaliação dos processos geradores da necessidade de substituir (evolução tecnológica, deterioração e o ambiente de operação) porém atuam de forma mais indireta.

Seus efeitos não transparecem nos indicadores primários ou nos dados de custos e receitas, por isso precisam ser conhecidos para que recebam avaliação específica. Fatores adicionais permitem ajustes sobre as medidas destes indicadores, uma vez que, por definição, consideram fatos que não puderam ser incluídos nas medidas iniciais.

Dentre os fatores chamados neste trabalho de fatores adicionais destacam-se: ergonomia (2.4.1), condição de manutenção (2.4.2), calibração (2.4.3) (características operacionais), conectividade (2.4.4), padronização (2.4.5), *marketing* (2.4.6), oportunidades comerciais (2.4.7) e desvantagens (2.4.8) (ônus da substituição).

Segue a discussão a respeito de cada fator, seus relacionamentos com outros fatores, sua participação no problema de substituição e como podem ser medidos.

2.4.1 Ergonomia

De acordo com a definição clássica, ergonomia é o estudo técnico das regras de adaptação entre o trabalhador e o equipamento de trabalho. A partir desta definição, a ergonomia será entendida nesta dissertação como o grau de eficiência com que ocorre a operação do equipamento.

Esta definição refere ergonomia ao grau de facilidade com que o equipamento é ajustado para executar suas funções rotineiras e ao nível de simplicidade com que os usuários obtêm, compreendem e utilizam os resultados fornecidos por este equipamento.

Quanto à influência sobre indicadores primários, é fácil constatar que a ergonomia tem relação com a taxa de produção, pois de um modo geral a facilidade de uso do aparelho permite procedimentos mais rápidos. Tem também relação com a produtividade, pois de um modo geral a facilidade de uso do aparelho permite menor desperdício de procedimentos.

A ergonomia tem ainda relação com a segurança, pois de um modo geral, maior facilidade de uso torna menos provável a ocorrência de erros de operação.

Algumas mudanças ergonômicas em modelos mais modernos, como os temômetros eletrônicos (FENNIGKOH, 1992), trazem tantas vantagens na qualidade do serviço prestado que estas vantagens se tornam quase obrigatórias. É uma espécie de mudança na prática clínica, que obriga a substituição do equipamento antigo.

O envelhecimento dos equipamentos pode ser acompanhado da degradação de algumas características ergonômicas, tais como: nitidez dos tubos de imagem e precisão de ajustes, o que caracteriza deterioração e sugere substituição.

A principal relação de ergonomia e substituição são as inovações que permitem aumentar a produtividade, melhorar as condições de trabalho e oferecer resultados mais seguros. Assim, melhorias na ergonomia dos aparelhos influenciarão nas substituições (FENNIGKOH, 1992).

2.4.2 Condição de Manutenção

Existem diversas formas de organizar a manutenção de um equipamento tais como contratos de serviço com o fabricante ou terceiros, serviços sob demanda e oficinas internas (DICKERSON & JACKSON, 1992). O importante é que o prestador do serviço de manutenção seja bem treinado e aparelhado, tenha a documentação e a experiência necessárias, tenha facilidade de locomoção e tempo para executar os serviços. Assim a manutenção será feita com a rapidez e a qualidade necessária. Isto é o que se entende por condição de manutenção nesta dissertação.

A manutenção é relacionada a vários indicadores de qualidade de equipamentos médicos, como confiabilidade, disponibilidade e segurança. Também é responsável por uma parte considerável na composição dos custos relativos a um equipamento (DICKERSON & JACKSON, 1992).

Alguns fabricantes costumam deixar de fornecer peças sobressalentes e de apoiar a manutenção de modelos mais antigos, tornando sua manutenção muito difícil (FENNIGKOH, 1992). Também ocorre ser insatisfatório o serviço de manutenção, com baixa qualidade e atrasos (CLARK & FORSELL, 1990). Serviços mal feitos podem ter que ser repetidos ou causar outros defeitos, reduzindo a confiabilidade.

Se a condição de manutenção não for boa, equipamentos em bom estado podem ter indicadores que os caracterizam como deteriorados. Este é um problema que pode ser resolvido com a substituição do aparelho.

Aperfeiçoamentos nos projetos dos equipamentos disponíveis no mercado permitem tornar a manutenção mais simples (MIRSHAWKA & OLMEDO, 1993). Assim, a substituição por um desses novos equipamentos proporcionará melhores condições de manutenção, o que deve se refletir em melhoria nos indicadores de desempenho.

Às vezes é impossível fazer o reparo de uma falha: não existem as peças de reposição nem é possível recuperar as danificadas; após o conserto o equipamento não vai retornar aos padrões exigidos ou o dano é tão extenso que o conserto se torna impossível. Esse evento, relacionado à condição de manutenção, obriga a desativação do aparelho, que tem de ser substituído em princípio.

2.4.3 Calibração

Calibração é o ajuste de alguns controles do equipamento para que seu funcionamento fique dentro de normas ou padrões definidos. Isso garante que o equipamento faz o que se espera dele, permitindo resultados e tratamentos corretos com o mínimo de erros e proporcionando segurança de operação e produtividade.

A necessidade de refazer continuamente a calibração, ou a não obtenção dos padrões estabelecidos após a calibração caracterizam a ocorrência de deterioração e eventualmente a transgressão de alguma norma. Esta deterioração é especialmente relacionada a quedas de segurança de operação e produtividade.

Conforme os riscos envolvidos e as normas que ditam o padrão de calibração, a desativação do aparelho pode até ser obrigatória, implicando em substituição caso sua função permaneça necessária.

2.4.4 Conectividade

Conectividade é a facilidade com que diversos aparelhos trocam dados e informações. Uma boa conectividade em um serviço permite ampliar sua automação, aumentando o desempenho do serviço, possível redução de pessoal e aumento na confiança dos resultados. Por isso, a decisão de substituir um equipamento será favorecida quando esta decisão implicar em maior conectividade entre as máquinas de um serviço.

2.4.5 Padronização

Padronizar refere-se à uniformização dos fornecedores, ou seja, ter mais equipamentos de um mesmo fabricante. A padronização trás benefícios (FENNIGKOH, 1992): permite manter um estoque de peças de reposição, cria um vínculo com o fabricante o qual terá mais interesse em atender bem e pode até oferecer oportunidades comerciais interessantes. Acarreta todavia, o problema da dependência do fabricante e até prejuízos caso este venha a ter dificuldades e não mantenha sua assistência.

Em todo caso a possibilidade de aumentar a padronização, de forma criteriosa, é um atrativo para a substituição.

2.4.6 Marketing

A imagem das instituições pode ser melhorada através de novos equipamentos (CLARK & FORSELL, 1990). Uma aparelhagem moderna impressiona os pacientes, tendo um bom efeito de *marketing*.

A possibilidade de usar a compra de um equipamento para a divulgação dos serviços e reforço da imagem de uma EAS deve ser considerada como uma forma através da qual parte de seu custo poderá ser compensado (devido à divulgação gratuita que o anúncio dessa aquisição acarreta na mídia, por exemplo).

A diferença entre o custo de uma campanha de divulgação do serviço tendo máquinas antigas e o custo da mesma campanha sendo as máquinas substituídas e portanto novas aponta para uma redução no ônus acarretado pela substituição. Este fenômeno tem especial importância para EAS privadas com fins lucrativos.

Por outro lado, EAS públicas desejam ampliar a relação de custo benefício de seus serviços. A divulgação da aquisição de um novo equipamento visa maximizar o uso deste equipamento, para que o custo da aquisição gere o máximo de benefícios possíveis. Esta divulgação resulta em ônus, adicional ao custo de aquisição do aparelho novo.

2.4.7 Oportunidades

Oportunidades são vantagens criadas pelo mercado para estimular a substituição de equipamentos. Estas vantagens alteram o resultado normal das decisões de substituição. Por exemplo, treinamento gratuito, contratos de manutenção a preço reduzido, redução no preço de aquisição, garantia estendida (além da garantia, que é oferecida para qualquer equipamento novo) e outras mais.

A compra de várias unidades de um mesmo equipamento pode ser estimulada através de oportunidades comerciais. Torna-se, então, mais econômico substituir toda uma “frota” de um determinado tipo de equipamento do que somente umas poucas unidades.

Existem formas alternativas de propriedade como o *leasing*, o comodato e as doações, que às vezes reduzem custos de propriedade ou superam limitações financeiras temporárias, facilitando ou viabilizando uma substituição.

2.4.8 Desvantagens Relacionadas ao Processo de Substituição

As desvantagens se referem a alguns custos periféricos acarretados pela execução da substituição. É importante ressaltar que processos de substituição de equipamentos podem ser acompanhados de problemas imprevistos e inconvenientes. Conhecer estes problemas permite tomar as precauções necessárias para minimizar seus efeitos.

O processo de substituição pode demandar bastante tempo, conforme a burocracia interna do hospital, as leis de compra que esteja sujeito (lei de licitações no Brasil, por exemplo), tempos de frete e alfândega, e outros atrasos eventuais. As substituições devem ser planejadas com a antecedência necessária para que não haja atrasos no início das operações da unidade substituta pois nesses casos, pode ser necessário operar um equipamento além do tempo adequado ou até ficar sem o equipamento e sem o substituto (LAKE & MUHLMAN, 1979).

É preciso levar em conta que para instalar o novo aparelho ocorre um período de transição no qual o equipamento antigo é retirado e o serviço fica indisponível, a menos que seja possível deixar ambas unidades operando simultaneamente, o que exige planejamento, espaço físico e pessoal.

Os operadores precisarão frequentar cursos de treinamento para a operação de uma máquina nova; este será um período em que não trabalharão, somando a isto o custo desses cursos normalmente pagos pelo hospital. É também provável uma fase de adaptação em que poderão ocorrer falhas humanas.

As máquinas também podem apresentar taxa de falhas elevada no início de sua operação, fato conhecido como “mortalidade infantil” (MIRSHAWKA & OLMEDO, 1993). A ga-

rantia existe para proteger o comprador desses efeitos mas não cobre os inconvenientes das paradas.

Finalmente, há o fenômeno que se pode informalmente chamar de máquinas “ruins” e “boas”, fruto de diferenças individuais durante a fabricação (EILON et al., 1966). Ao comprar uma máquina nova, sempre há o risco de se adquirir uma máquina “ruim” em substituição a uma antiga que era “boa”.

2.5 Comentários

Os fatores estudados neste capítulo são de extrema importância para a questão da substituição de equipamentos médicos, pois retratam eventos da prática cotidiana em um hospital. É impossível dissociar a empresa-hospital do seu lado humano e emocional, que é sempre muito subjetivo, e onde saúde e vida de pessoas estão em jogo.

Não é suficiente conhecer, saber ou aplicar métodos de decisão de substituição; é preciso conhecer os fatores que influenciam na decisão final. É necessário conhecer os alcances e limites de cada método na hora de escolher qual método será aplicado — e o conhecimento destes fatores é essencial para dar fundamento e embasar esta escolha.

Já que os métodos não conseguem abranger todos os fatores, é essencial que o tomador de decisão os conheça e saiba como estes fatores (alguns inclusive subjetivos) podem influenciar a decisão de substituição, apesar de não poderem ser expressos nas equações.

Portanto, o conhecimento destes componentes do processo de decisão se constituem em preciosa ferramenta para otimizar o apoio que um método pode fornecer ao responsável pela decisão, na hora de tomá-la.

Capítulo 3 Método Multiparamétrico

Em um ambiente onde predominavam os estudos sobre substituição de equipamentos médicos baseados em categorias ligadas a valor, começa a surgir, no início da década de 90, um método alternativo aplicado para a orientação destas decisões, baseado em uma filosofia bem diferente daquela que fundamenta os métodos econômicos (Capítulo 4). Este conjunto de métodos e os que seguem esta mesma abordagem estão classificados neste trabalho como seguidores do Método Multiparamétrico.

De modo genérico os métodos multiparamétricos pretendem indicar decisões a partir da combinação da medida de variáveis, as mais diversas, que pareçam de alguma forma relevantes à questão (parâmetros). Baseando-se em experiência anterior e em informação de bancos de dados, pretendem identificar a decisão mais apropriada, correlacionando resultados obtidos pelas medidas de parâmetros relativos a um problema particular, com resultados conhecidos acerca dos parâmetros do mesmo problema.

A bibliografia a respeito deste método é escassa, incluindo um artigo de CLARK & FORSELL (1990) cujas idéias são na verdade precursoras das idéias de FENNIGKOH (1992).

Em 1995, HART & COOK tratam da decisão entre substituir ou atualizar³ um equipamento. Seu método envolve escores para atributos: a decisão que ganha no escore de mais atributos será a indicada. Os procedimentos deste método permitem classificá-lo como multiparamétrico. Entretanto ele não foi escolhido para exemplificar este método, neste trabalho, por não se dirigir especificamente a equipamentos médicos e, além disso, por tratar de uma decisão (substituir/atualizar) diferente da decisão proposta nesta dissertação (substituir/não substituir).

³ Substituir refere-se a desativação do equipamento atual e à aquisição de um equipamento substituto. Atualizar refere-se à troca de algumas partes do equipamento atual por partes mais modernas (“*Upgrade*”).

O artigo de FENNIGKOH (1992) foi escolhido para ilustração dos Métodos Multiparamétricos por ser recente e parecer o mais sofisticado exemplar deste tipo de método, específico para a substituição de equipamentos médicos. Foi escolhido, ainda, por conter a descrição completa do método proposto e uma aplicação.

Neste artigo se evidenciam a filosofia, as características interessantes e os possíveis problemas decorrentes da aplicação de método multiparamétricos na decisão de substituição de equipamentos médicos.

O método proposto por Fennigkoh será descrito a seguir e analisado em função da viabilidade de sua aplicação local: será avaliada a necessidade de adaptações na metodologia originalmente proposta e a possibilidade de comparar os resultados desta aplicação local com os resultados da aplicação de Fennigkoh.

3.1 Resumo do Artigo: FENNIGKOH (1992)

A pesquisa realizou-se no hospital St. Luke Medical Center (Milwaukee, WI - EUA), onde o autor era diretor do Departamento de Engenharia Clínica na época do desenvolvimento do trabalho. Este hospital tem um serviço de engenharia clínica estabelecido, contando com informações do inventário de equipamentos, registro de ocorrência de falhas e o número de horas técnicas consumidas em cada conserto.

A metodologia propõe o uso de um resultado numérico para priorizar e recomendar a substituição de equipamentos médicos. Este resultado numérico é obtido a partir de atributos que o autor considerou importantes para o problema de substituição e corresponde à soma ponderada dos valores dos atributos. Uma escala diz qual decisão tomar, conforme o valor do resultado.

O valor de cada atributo é definido como *sim* ou *não* (1 ou 0); isso deve, ao mesmo tempo, minimizar a sensibilidade do método a questões subjetivas e reduzir o volume de dados necessário para sua implementação. Alega o autor que essa forma binária de avaliação é uma alternativa válida para as técnicas determinísticas convencionais classificadas nesta dissertação como métodos econômicos, especialmente quando a “informação perfeita” não está disponí-

vel. O método proposto, desta forma, se preocupa com uma característica da realidade comum: escassez de dados e informações.

O autor afirma que este modelo depende das características individuais do hospital onde será usado (ambiente de operação) uma vez que a forma como são feitas aquisições, suas prioridades e a disponibilidade de informações determinam quais fatores devem e podem ser incluídos no modelo. Por isso, um modelo adequado para uma instituição pode não ser satisfatório para outra. Entretanto devido às similaridades existentes entre as instituições hospitalares, seu método poderá ser aproveitado — integralmente ou apenas na filosofia — em outras instituições similares.

Salienta o autor que um método deve ser simples para ser usado, e a grande vantagem do método como está proposto é sua simplicidade tanto na sua aplicação como para a obtenção dos resultados. Daí decorre que o método pode ser facilmente compreendido e aceito pelos usuário e a administração superior e sua implementação será realizada sem dificuldades para os usuários.

3.1.1 Metodologia

Para a elaboração da metodologia o autor escolheu quatro temas principais relacionados à substituição de equipamentos médicos. Cada um dos temas principais é medido por um grupo próprio de atributos, totalizando dez atributos. A cada tema principal foi associado um peso escolhido arbitrariamente.

A seguir são enunciados os temas principais com suas ponderações e os atributos com suas formas de medida, que permitirão calcular os escores de cada equipamento.

1º Tema: Manutenção (MAN): tem seus atributos ponderados em 40%, devido a seu “impacto histórico, funcional e emocional”.

1º Atributo: Idade (ID): a partir de sete anos recebe 1 (um) ponto, abaixo recebe 0 (zero). Esta idade foi escolhida por corresponder à vida econômica prevista pelos órgãos reguladores americanos para a maioria dos equipamentos médicos.

2º Atributo: Custo de Manutenção (CM): devido à inexistência de bancos de dados detalhados, o equipamento cuja manutenção ultrapassou 15% de seu valor de compra nos últimos 3 anos recebeu 1 (um) ponto; se não ultrapassou, recebeu 0 (zero). Esse valor foi escolhido a partir do fato do valor médio de manutenção de um equipamento estar entre 1% e 5% do seu valor de compra, no hospital em estudo.

3º Atributo: Tempo de Parada (TP): devido à inexistência de dados sobre a duração da parada para cada falha ocorrida, recebeu 1 (um) ponto neste item somente aquele equipamento que quebrou um número de vezes acima da média de sua classe, adicionada de um desvio padrão; os demais receberam 0 (zero).

4º Atributo: Fim do Apoio do Fabricante (FA): Este atributo vale 1 (um) ponto a partir do instante em que o fabricante informa que não dará mais apoio técnico ao equipamento, antes valia 0 (zero). Nos Estados Unidos, este fato ocorre em torno de 5 anos após o equipamento sair de linha.

2º Tema = 5º Atributo: Função do equipamento (FUN): tem seu valor ponderado em 20%. Este é o único tema principal que é medido diretamente, sem subdivisão de atributos. O equipamento deve ser enquadrado em uma das 4 classes abaixo.

O valor deste tema principal será a pontuação correspondente a sua função. A pontuação das classes se baseia na idéia de que quanto mais crítica a função do equipamento, maior sua prioridade para ser substituído.

Apoio à vida	4 pontos
Terapia	3 pontos
Diagnóstico	2 pontos
Análise/apoio	1 ponto

3º Tema: Custo Benefício (CBN): tem seus atributos ponderados em 20% .

6º Atributo: Aumento no Faturamento (AF): recebe 1 (um) ponto caso o substituto vá proporcionar maior faturamento de alguma forma.

7º Atributo: Redução de Custos (RC): recebe 1 (um) ponto caso o substituto proporcione redução nos custos ligados a operação e manutenção do aparelho.

4º Tema: Eficácia clínica e Preferência (EFC): tem seus atributos ponderados em 20%.

8º Atributo: Melhora no Tratamento (MT): Este atributo vale 1 (um) ponto caso o equipamento substituto forneça melhoras na qualidade do tratamento. Caso isto não ocorra vale 0 (zero).

9º Atributo: Preferência do Usuário (PU): havendo preferência ou desejo do usuário de que ocorra a substituição, este atributo valerá: 2 (dois) pontos caso a preferência seja grande; 1 (um) ponto sendo ela média; ou 0 (zero), caso não ocorra.

10º Atributo: Aumento na Padronização (AP): Este atributo vale 1 (um) ponto caso a substituição provoque aumento na padronização do parque de equipamentos do hospital. Caso isto não ocorra vale 0 (zero).

Para avaliar os atributos 6, 7, 8 e 10 é necessário que o analista conheça ou pressuponha qual equipamento substituirá o equipamento que está sendo estudado.

3.1.2 Obtenção do Escore

O Valor de Prioridade para Substituição (VPS) ou resultado final, ou escore é obtido a partir dos valores dos atributos e ponderações definidos.

A Equação 1 apresenta o modelo de cálculo do VPS.

$$\begin{aligned} \text{VPS} = & 40\%(\text{idade} + \text{custo} + \text{parada} + \text{apoio fab.} = \text{MAN}) + \\ & 20\%(\text{função equip.} = \text{FUN}) + \\ & 20\%(\text{faturamento} + \text{redução de custos} = \text{CBN}) + \\ & 20\%(\text{melhora tratamento} + \text{preferência} + \text{padronização} = \text{EFC}) \end{aligned}$$

$$\text{VPS} = 0,4 \cdot \text{MAN} + 0,2 \cdot \text{FUN} + 0,2 \cdot \text{CBN} + 0,2 \cdot \text{EFC} \quad \text{Equação 1 - Modelo de Cálculo do Valor de Prioridade de Substituição}$$

Onde os pesos correspondentes aos temas principais estão representados por decimais. Esses pesos estão de acordo com as participações percentuais definidas em 3.1.1, para cada tema principal

Caso todos os atributos da Equação 1 tenham o valor mínimo, o VPS será de 0,2.
Caso todos os atributos da Equação 1 tenham o valor máximo, o VPS será de 3,6.

Assim, $0,2 \leq VPS \leq 3,6$.

A escala de decisão conforme o VPS está definida na Tabela 1, cujos valores foram obtidos a partir de dados experimentais e de resultados que serão apresentados adiante.:

Tabela 1 - Escala de Decisões Conforme o Valor de Prioridade de Substituição

VPS < 1,0	Manter a operação normal
$1,0 \leq VPS \leq 1,2$	Atenção; reavaliar no final o ano
$1,4 \leq VPS \leq 1,6$	Substituir durante o próximo ano
$VPS \geq 1,8$	Urgente; substituir durante o ano corrente

Os valores da Tabela 1 são específicos à aplicação de Fennigkoh.

3.1.3 Estudo de Caso

Foram escolhidos para teste, cinco tipos de equipamentos — com funções de apoio à vida, terapia ou diagnóstico — totalizando 146 unidades (3,5% do total de equipamentos constantes do inventário do St. Luke Medical Center).

Tabela 2 - Tipos de Equipamentos no Grupo de Teste

Aparelho	Quantidade
Balão Intra-aórtico	9
Desfibrilador Cardíaco	83
Eletrocardiógrafo	32
Incubadora Infantil	6
Esteira de Exercício	16

A análise dos registros do inventário e do histórico de falhas (entre 1987 e 1989) determinou os valores dos atributos para cada equipamento.

Os atributos de todos os equipamentos do grupo não estão disponíveis. Fennigkoh fornece as seguintes características sobre os dados:

Idade: 10 equipamentos (6,8%) tinham mais de 7 anos.

Custo de Manutenção: a manutenção de 6 equipamentos (4,1%) custou mais que 15% de seu valor.

Tempo de Parada: 18 equipamentos (12%) tiveram falhas acima da média mais um desvio padrão de sua classe.

Fim do apoio do fabricante: Alguns equipamentos do grupo não contavam mais com suporte o fabricante para sua manutenção, mas não foi especificado quantos se enquadravam nessa situação.

Aumento na Padronização: A substituição de alguns equipamentos do grupo podia aumentar a padronização. Não foi informada a quantidade exata.

Custo Benefício, Melhora no Tratamento, Preferência do Usuário: Nenhum dos equipamentos do grupo recebeu pontuação nestes atributos.

Em seguida, foram calculados os VPSs individuais. A Tabela 3 reproduz os valores dos atributos para os equipamentos, cujos VPS foram mais altos.

Tabela 3 - Medida dos atributos dos equipamentos de mais alto VPS

VPS	Dispositivo	Nº Ctl.	Custo								Melhora	
			Idade	Custo	Parada	Apoio	Função	Benef.	Tratmt.	Prefer.	Padron.	
2.0	Esteira	3689	1	1	1	0	3	0	0	0	1	
1.8	Desfibrilador	3076	0	1	0	1	4	0	0	0	1	
1.8	Encubadora	6674	0	1	1	0	4	0	0	0	1	
1.6	Desfibrilador	3158	0	1	1	0	4	0	0	0	0	
1.6	Desfibrilador	3160	0	1	1	0	4	0	0	0	0	
1.4	Desfibrilador	2695	0	0	0	1	4	0	0	0	1	
1.4	Desfibrilador	3072	0	0	0	1	4	0	0	0	1	
1.4	Desfibrilador	2959	0	0	0	1	4	0	0	0	1	
1.4	Desfibrilador	2724	0	0	0	1	4	0	0	0	1	
1.4	Desfibrilador	3074	0	0	0	1	4	0	0	0	1	
1.2	Desfibrilador	3251	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3782	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	6050	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3159	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Balão Intraaortico	7008	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3254	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Esteira	3691	1	0	0	0	3	0	0	0	1	
1.2	Desfibrilador	3775	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3704	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3147	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3156	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.2	Desfibrilador	3776	0	0	1	0	4	0	0	0	0	
1.0	Eletrocardiografo	277	1	0	0	0	2	0	0	0	1	
1.0	Eletrocardiografo	1310	1	0	0	0	2	0	0	0	1	
1.0	Eletrocardiografo	2585	1	0	0	0	2	0	0	0	1	

3.1.4 Resultados e Conclusão

O Valor de Prioridade de Substituição (VPS) foi calculado para todos os equipamentos da amostra de FENNIGKOH (1992). O VPS médio foi de 0,8, e 82,2% dos 146 equipamentos tinham o VPS menor ou igual a esse valor. Assim foi definido que somente quando $VPS \geq 1,0$ o equipamento receberia atenção especial quanto à sua substituição.

O restante da escala de decisão (Tabela 1) foi definido subjetivamente, a partir da natureza e da gravidade das falhas do equipamento e dos requerimentos de sua função.

Usando a escala da Tabela 1 sobre os dados da Tabela 3, verifica-se que todos os equipamentos desta última tabela recebem alguma ação quanto a substituição. Dois equipamentos devem ser substituídos no ano corrente, oito devem entrar no orçamento do ano seguinte e 15 devem ficar de sobreaviso.

Essas ações correspondem ao que seria decidido usando critérios meramente subjetivos. Assim a princípio, o método fornece uma base para auxílio na decisão de substituir que somente um profissional experiente poderia fornecer.

Fennigkoh afirma que o resultado de seu método não é definitivo. Esse método, como vários outros, serve para ordenar o raciocínio e ajudar o responsável pela decisão a pensar ou repensar o que está fazendo. O método é uma ferramenta para estimular o raciocínio e não para induzir à ação cega.

3.2 Comentários

O método multiparamétrico pode abranger praticamente qualquer parâmetro considerado importante para a questão de substituição. Isto inclui parâmetros subjetivos que são avaliados de forma qualitativa, como por exemplo a possibilidade de melhora no tratamento e a preferência do usuário pela substituição. Esta característica deve permitir a esse tipo de método um alcance que torna atraente a sua aplicação.

Os métodos multiparamétricos apresentam outra vantagem, que é usar unidades de medida inerentes a cada fator. Isto significa que o modelo recebe o valor de cada atributo na

unidade de medida própria a este atributo. Esta vantagem implica, entretanto em um problema; o método recebe como entrada valores em diversas unidades de medida e tem de fornecer um resultado unificado que tenha significado prático.

Por exemplo, o método de Fennigkoh criou unidades de medidas próprias para cada atributo e estipulou pesos para unificá-los no valor de prioridade de substituição (VPS). Este VPS só tem significado após estabelecida uma escala que relaciona seus valores a decisões. Permanece a dificuldade de definir as escalas de decisão e os valores dos pesos para atender às particularidades de cada local onde o método for aplicado.

A escolha dos pesos é determinada pela combinação de um banco de informações sobre os equipamentos e a experiência dos profissionais que lidam com estes equipamentos. Isto permite dizer que, em linhas gerais, o método multiparamétrico pode ser visto como uma forma de correlacionar prática e experiência a dados reais.

O objetivo deste trabalho é aplicar à realidade local um método de apoio à decisão de substituição de equipamentos médicos da forma mais semelhante possível à proposta original. Isto permitiria comparar a aplicação apresentada no artigo original à aplicação local com o fim de validá-la.

Este método, criado particularmente para o ambiente de operação do St. Luke Medical Center, não foi escolhido para ser usado no estudo de caso desta dissertação porque os resultados obtidos na aplicação de Fennigkoh e os resultados obtidos em uma eventual aplicação local não poderiam ser comparados entre si.

Isto porque a aplicação local deste método implica em adaptá-lo à realidade local e para adaptar o método de Fennigkoh seria necessário rever o conjunto de atributos escolhidos para St. Luke, redefinir as formas de medida e reajustar as ponderações. Após todas essas adaptações não haveria mais quase nenhuma relação entre o método original e o método adaptado. Assim a comparação entre os resultados locais obtidos e os resultados obtidos no St. Luke seria de difícil interpretação.

Uma tentativa eventual de aplicação do método de Fennigkoh mesmo que usando seus atributos e unidades de medida, esbarraria na dificuldade de estabelecer ponderações que indi-

cassem as decisões corretas para o ambiente de operação local. As ponderações para St. Luke foram estabelecidas a partir da enorme experiência do autor naquele hospital. Ajustar as ponderações para outro local exigiria bancos de dados e apoio de especialistas em cada equipamento em um processo dinâmico de ajuste (até a convergência dos pesos para valores definidos), o que ultrapassaria as limitações do porte desta dissertação.

Ainda, o método proposto por Fennigkoh não satisfaz algumas condições desejáveis no método a ser aplicado localmente.

Seria interessante que o método de decisão adotado indicasse também consequências de tomar decisões diferentes daquela recomendada pelo método, e isto não é possível através do método de Fennigkoh.

Seria interessante também que o método de decisão adotado informasse sobre a probabilidade de fazer indicações incorretas: falsos positivos e falsos negativos. O falso positivo ocorre quando um equipamento é escolhido para substituição e deveria continuar operando e o falso negativo ocorre quando um equipamento que precisava ser substituído não foi indicado. O método de Fennigkoh não indica a probabilidade de haver falsos positivos ou falsos negativos em seus resultados.

Além disso, nenhum dos atributos definidos considera o ônus da substituição. Este aspecto parece de grande importância para decidir se um equipamento deve ser substituído imediatamente, ou não.

Assim, apesar de conter vantagens, este método não foi escolhido para a aplicação prática desta dissertação.

Capítulo 4 Métodos Econômicos

Este capítulo aborda métodos que apoiam a decisão de substituição indicando qual curso de ação deve conduzir a melhores resultados econômicos. Tais métodos, chamados Métodos Econômicos, usam um modelo econômico para comparar custos ou lucro previstos para o futuro, conforme o curso de ação que tenha sido seguido.

Assim estes métodos respondem à pergunta: será mais interessante economicamente substituir um equipamento médico, que está suprindo uma função produtiva em uma EAS, de imediato ou no futuro? A resposta a esta pergunta vai apoiar a decisão de substituir um equipamento imediatamente ou não, que é a questão em torno da qual se desenvolve esta dissertação.

De acordo com a delimitação desta dissertação, ocorre o seguinte: existe hoje um equipamento que realiza uma determinada função, com alguns anos de uso, talvez apresentando deterioração; este equipamento será substituído em algum instante por um novo. O equipamento substituto executa a mesma função que o equipamento atual e pode não ser igual a este, tratando-se de um similar disponível no mercado que pode conter evoluções tecnológicas. Portanto, embora os dois equipamentos executem a mesma função, suas características de desempenho e de custos poderão ser diferentes. O método procurará indicar se é economicamente mais interessante substituir o equipamento agora ou posteriormente.

Este equipamento substituto também será posteriormente substituído e assim por diante. Desta forma, existe uma cadeia de substituições que começou em algum instante (possivelmente desconhecido) no passado, quando foi comprado o primeiro aparelho; e deve se prolongar até a função deixar de ser necessária. Em geral não se sabe o momento em que isto acontecerá, portanto considera-se indefinido esse instante futuro.

Este trabalho pressupõe que a decisão quanto ao instante no qual será substituído o equipamento atual afeta toda a cadeia de substituições que ocorrerá no futuro. Pressupõe também que os efeitos desta decisão sobre eventos futuros serão tanto menos significativos quanto mais distantes estes eventos estejam no futuro.

Os modelos usados pelos métodos econômicos relacionam a função do equipamento ao fluxo de entradas e saídas de dinheiro ao longo do tempo — Fluxo de Caixa. As decisões de substituição determinam mudanças no fluxo de caixa, resultantes da aquisição e operação de novos equipamentos. Então haverá um fluxo de caixa diferente para cada decisão possível, e isto permitirá comparar as decisões através das previsões de fluxo de caixa.

Vale observar que a comparação entre valores financeiros exige que eles se refiram a períodos de tempo iguais isto é, um custo anual não pode ser comparado com um custo mensal. Decorre que custos previstos para ocorrerem em dois períodos de tempo distintos não podem ser comparados entre si.

O modelo de fluxo de caixa deve se estender por um período que seja considerado conveniente. Esse período é chamado de horizonte, ou seja, horizonte é o instante no futuro até o qual será previsto o fluxo de caixa. O horizonte pode ser finito e, neste caso, corresponder a um prazo fixo ou a um número determinado de ciclos de substituições. Pode também ser infinito, quando o número de ciclos for indeterminado ou não existir um prazo fixo.

Existem, desde pelo menos o ano de 1940 (PREINREICH), trabalhos na literatura que tratam da criação de metodologias que procuram determinar o momento de substituir equipamentos pela otimização de funções de custos, lucro ou valor. Estas metodologias serviram de base para o desenvolvimento dos métodos econômicos.

Segue uma revisão da literatura específica sobre métodos econômicos. A sequência acompanha um progresso histórico ao longo do qual os modelos, métodos e suas aplicações foram se tornando cada vez mais elaborados.

4.1 Histórico e Revisão Bibliográfica

Em 1957, CLAPHAM definiu “vida econômica” como o período de tempo economicamente ótimo durante o qual um equipamento deve ser usado antes de ser desativado ou substituído, e propõe uma forma de calcular a vida econômica média dos equipamentos em uma frota. A duração calculada da vida econômica pode servir como referência para decidir se um equipamento deve ser ou não substituído.

Clapham supõe que os custos relacionados a um equipamento correspondem ao custo de sua aquisição e aos custos de sua manutenção por período. Se todos os custos relacionados ao equipamento até uma certa idade forem somados e divididos pelo valor desta idade, obtém-se o custo médio por período para esta idade. A idade que tiver menor custo médio por período corresponderá à vida econômica do equipamento.

Após analisar vários grupos de locomotivas, o autor determinou que, em média, os custos de manutenção por período ($f(t)$) crescem linearmente com a idade dessas máquinas — ou seja é uma função no formato:

$$f(t) = S + s \cdot n$$

Equação 2 - Custo de Manutenção por Período

onde:

S – Custo de manutenção de uma máquina no primeiro ano de operação.

s – Acréscimo ao custo de manutenção por período anual.

n – Idade do equipamento em anos.

Considerando constante o custo de aquisição (C), o custo médio por período anual [$T(n)$] em função da idade (n) foi equacionado:

$$T(n) = \frac{C}{n} + \frac{1}{n} \cdot \int_0^n s \cdot t \cdot dt$$

Equação 3 - Custo Médio por Período – Clapham

Para determinar a vida econômica (n^*), valor de n que minimiza $T(n)$, deriva-se a equação acima em relação a n , iguala-se a zero e para os valores relevantes, obtém-se:

$$n^* = \sqrt{\frac{2C}{s}}$$

Equação 4 - Vida Econômica (n^*) – Clapham

Em 1966, EILON et al. fazem duas perguntas referentes aos estudos sobre vida econômica:

- 1) Será válido usar uma única função média para descrever os custos de manutenção de toda uma frota?

2) Não deveriam os custos serem considerados de formas diferentes quando acontecem em instantes diferentes no tempo? (ou: um custo em um futuro mais remoto deve ter o mesmo peso que um custo em futuro próximo?).

Para responder a primeira pergunta, os autores elaboram uma função de custo médio anual $[T(n)]$ semelhante à equação 3, porém considerando o valor de revenda do equipamento em função da idade $[R(n)]$ que Clapham havia desprezado:

$$T(n) = \frac{C - R(n)}{n} + \frac{1}{n} \int_0^n f(t) dt \quad \text{Equação 5 - Custo Médio Anual – Eilon et al}$$

Onde: C – Custo de aquisição de uma empilhadeira nova

n – Idade da empilhadeira em anos

$R(n)$ – Valor de revenda de uma empilhadeira usada por n anos

$f(t)$ – custo anual de manutenção de uma empilhadeira de idade t

O valor de n que minimiza a Equação 5 é determinado pela derivação desta equação igualada a zero, o que corresponde a satisfazer a equação:

$$T(n) = f(n) - [R(n)] \quad \text{Equação 6 - Custo Médio Anual Mínimo – Eilon et al.}$$

O exame de uma frota de empilhadeiras indicou que o custo médio de manutenção por período anual $[f(t)]$ aumenta linearmente com a idade — uma conclusão coerente com Clapham. Essa informação possibilitou calcular a vida econômica para a média dos custos de manutenção da amostra de empilhadeiras em 7 anos.

Os autores então calcularam a vida econômica das empilhadeira da amostra usando dados individuais de cada uma. Concluíram que a vida econômica individual poderia variar de 5 a 12 anos. Calcularam o custo correspondente a usar cada empilhadeira pela vida econômica média de 7 anos e compararam este valor ao custo correspondente à vida econômica individual de cada exemplar da amostra. A diferença entre o custo com vida econômica média e o custo com vida econômica individual não ultrapassou 4%, no pior caso.

Concluíram os autores que o esforço necessário para fazer estudos individuais para cada máquina provavelmente não vale a pena. Isto valida a abordagem através de dados médios, respondendo à primeira pergunta de Eilon et al.

A segunda questão proposta por Eilon *et al.* levará em conta o valor presente de custos futuros. É necessário esclarecer quanto aos conceitos de Valor Presente e Fator de Desconto que serão apresentados a seguir.

É possível investir hoje um valor (VP) a uma taxa de juros mínima garantida (i) e este chegará a um valor (A) em algum instante futuro. Portanto, um desembolso que ocorrerá em um instante futuro pode ser suprido, tendo-se hoje uma quantia menor.

Da fórmula de juros compostos: $A = (1+i)^n \cdot VP$

Onde: A – valor do desembolso que ocorrerá em um instante futuro

i – taxa de juros mínima garantida

n – número de períodos até o instante futuro do desembolso.

VP – Valor no presente

Decorre $VP = \left(\frac{1}{1+i} \right)^n \cdot A$

Chamando $\frac{1}{1+i}$ de fator de desconto (r),

decorre: $r = \frac{1}{1+i}$

Equação 7 - Fator de desconto – Eilon *et al*

Portanto conclui-se que o fator que multiplica um valor A para fornecer o valor presente (VP) é r^n , do que resulta:

$VP = A \cdot r^n$

Equação 8 - Valor Presente Descontado

O valor presente descontado é o valor que deve ser aplicado hoje visando atingir um valor futuro conhecido.

Retomando a segunda questão de Eilon *et al.* quanto à necessidade de considerar o valor presente de custos futuros, sendo $[P(n)]$ o valor presente do total de custos relacionados a um equipamento de n anos, decorre:

$$P(n) = C - R(n) \cdot r^n + \int_0^n f(t) \cdot r^t dt$$

Equação 9 - Valor Presente do Total de Custos Relacionados a um Equipamento de n anos – Eilon *et al.*

Onde: C – Custo de aquisição de uma empilhadeira nova

n – Idade da empilhadeira em anos

$R(n)$ – Valor de revenda de uma empilhadeira usada por n anos

$f(t)$ – custo anual de manutenção de uma empilhadeira de idade t

r – Fator de Desconto

Segundo os autores esta equação 9 só é aplicável quando o equipamento for desativado e sua função for encerrada, ou seja, não será substituído.

A equação terá que ser adaptada à suposição de que será necessário adquirir um substituto sempre que um dos equipamentos for desativado, o que implica que a sequência de substituições se dará em um prazo indefinido, isto é ocorrerão infinitas substituições.

Consequentemente, para fazer o cálculo da vida econômica de uma amostra de empilhadeiras será necessário calcular o valor total hoje [$V(n)$] de uma sequência hipotética indo até o infinito, de substituições de empilhadeiras que serão substituídas com mesma idade n :

$$V(n) = P(n) \cdot (1 + r^n + r^{2n} + \dots) = \frac{P(n)}{1 - r^n}$$

Equação 10 - Valor Total Hoje de uma sequência de substituições indo até o infinito – Eilon *et al.*

Onde: $P(n)$ – Valor presente do total de custos relacionados a um equipamento de n anos

n – Idade com que são substituídos os equipamentos

r – Fator de desconto

O valor de n que minimiza $V(n)$ corresponderá à duração da vida econômica para o equipamento.

Os autores calculam a vida econômica média para a amostra de empilhadeiras minimizando a Equação 10. Em seguida comparam este resultado com o valor da vida econômica obtido anteriormente, isto é, sem descontos.

Respondendo a sua segunda pergunta, os autores concluem que as diferenças entre os resultados obtidos através das duas formas de cálculo existem, embora não sejam muito significativas.

Tanto Clapham como Eilon *et al.* desconsideraram qualquer forma de evolução tecnológica. Eles consideram que o custo de manutenção por período linearmente crescente com a idade é um índice evidente de deterioração.

Em 1976, ELTON & GRUBER incluem a evolução tecnológica em suas pesquisas. Supõem que a evolução tecnológica produz um acréscimo anual de valor constante a sobre o lucro proporcionado pelo tipo de equipamento. Assim, o equipamento substituto de um equipamento atual de N anos deve proporcionar um acréscimo de lucro de valor $N.a$ sobre o lucro que o equipamento atual proporciona.

Fazendo uma previsão de lucro para o futuro, os autores demonstram que é possível calcular uma única duração de vida econômica para várias gerações de equipamentos apesar da evolução tecnológica.

Esta forma de considerar a evolução tecnológica é um tanto discutível, pois este processo não é, na realidade, regular e contínuo como foi modelado neste artigo.

Em 1980, a taxa de inflação foi incluída na formulação de modelos econômicos de decisão de substituição; em seu artigo, CHRISTER & GOODBODY (1980) analisam a substituição de empilhadeiras em um período de inflação elevada. A inflação pode ser equacionada reformulando o cálculo do fator de desconto (r) a partir da Equação 7.

Na equação de Eilon *et al.* $r = \frac{1}{1+i}$ (Equação 7), i é a taxa de juros mínima garantida.

A taxa de juros mínima garantida, que Eilon *et al.* denominaram i , é identificada pela letra j por Christer e Goodbody. Para estes autores a letra i identifica a taxa de inflação.

Usando a nomenclatura de Christer e Goodbody, o fator de desconto que inclui a inflação foi definido:

$$r = \frac{i+1}{j+1}$$

Equação 11 - Fator de Desconto incluindo Inflação

onde: j – taxa de inflação.

i – taxa mínima de juros garantida.

Nesta equação, se $j > i$ então $r > 1$.

Em seguida os autores buscaram modelos econômicos que utilizariam essa nova forma de cálculo do fator de desconto.

Verificaram que modelos de custos sem descontos como apareceram em CLAPHAM (1957) e EILON et al. (1966), não consideram a inflação por definição, não sendo portanto adequados.

O modelo de custos descontados de Eilon *et al.* $V(n) = \frac{P(n)}{1-r^n}$ (Equação 10) inclui um fator de desconto r . No entanto, caso $r \geq 1$, $V(n)$ será indeterminado ou negativo. Portanto este modelo também não é adequado.

Propõem então os autores que se faça uma análise de horizonte finito: a análise de horizonte finito prevê os custos dentro de um horizonte definido. No caso este horizonte se estende até o instante da substituição do substituto do equipamento atual, ou seja, horizonte de 1 ciclo.

Os custos de operação, manutenção e substituição que ocorram dentro do horizonte definido serão estimados e transformados em valor presente usando o fator de desconto calculado pela Equação 11 conforme os instantes em que ocorrerão as substituições do equipamento atual e de seu substituto.

O custo presente descontado é calculado somando o valor presente de todos os custos previstos dentro do horizonte definido. E a partir deste custo presente descontado se calcula o custo médio anual, que indicará economicamente o melhor momento para a substituição. Estes procedimentos estão mais detalhados na próxima seção desta dissertação (4.2).

CHRISTER (1988) propõe que o mesmo modelo usado por Christer e Goodbody pode tornar mais fácil a inclusão da evolução tecnológica nas decisões de substituição, uma vez que permite comparação objetiva entre os custos do equipamento atual e os custos do seu substituto. Isto pode ser mais confiável do que tentar estimar um índice de evolução tecnológica, ou de algum acréscimo anual referente a esta. Este artigo trata da substituição de carros de serviço em uma frota.

Para complementar sua metodologia, Christer sugere que as vantagens tecnológicas do equipamento substituto que não podem ser transformadas em valor financeiro podem ser avaliadas comparando custos adicionais (decorrentes do atraso ou adiantamento da substituição) com vantagens tecnológicas que ficarão disponíveis. Assim será possível incluir avaliações qualitativas para apoiar a decisão de adiar ou adiantar uma substituição em relação ao prazo inicialmente definido na metodologia.

Em 1992, DICKERSON & JACKSON propõem um método para decidir a substituição de equipamentos médicos seguindo os princípios do método econômico, ou seja, fazer uma previsão de custos e faturamento e, através de sua comparação, decidir quando deve ser feita a substituição.

O método apresentado neste artigo não foi adotado para exemplo nesta dissertação, porque alguns de seus procedimentos pareceram inválidos, como por exemplo somar os custos acumulados de manutenção ao longo da vida do equipamento com os custos anuais de insumos, pessoal e espaço físico.

CHRISTER & SCARF anunciam em 1994 uma metodologia voltada especificamente para equipamentos médicos. Essa metodologia procura considerar evolução tecnológica, deterioração e inflação, continuando a linha dos trabalhos de 1980 e 1988. Tenta ainda incluir aspecto subjetivos, extremamente importantes em se tratando de equipamentos médicos, como por exemplo, o bem estar dos pacientes, por exemplo.

Esta metodologia também concorda com o formato geral de metodologias de substituição apresentado por FRASER & POSEY (1989), pois trata o problema definindo um modelo

de custos futuros em função dos instantes de substituição e depois procede com análises para determinar os melhores instantes para tomar a decisão.

O trabalho de Christer e Scarf é específico para a aplicação de métodos econômicos na substituição de equipamentos médicos. É um trabalho recente e um de seus autores, Christer, trabalha nessa área desde 1980. Este artigo contém a descrição detalhada da metodologia que sugere, e um exemplo de sua aplicação. Seus resultados são passíveis de comparação com resultados de uma aplicação em outro local.

Isto justificou a escolha do artigo CHRISTER & SCARF (1994) para ilustrar e exemplificar o funcionamento dos métodos econômicos, bem como a maneira pela qual estes são aplicados na prática; estes temas serão amplamente debatidos neste capítulo.

O artigo de Christer e Scarf servirá também de fundamento teórico para a parte prática desta dissertação, constituída pela aplicação desta metodologia através da análise de dados colhidos no CAISM/UNICAMP (Capítulo 6).

4.2 Resumo do Artigo: CHRISTER & SCARF (1994)

O objetivo do Método Econômico proposto por Christer e Scarf é definir em quantos anos, ou seja em que prazo, deve ser substituído um equipamento atualmente em uso de idade igual a N anos.

A resposta obtida pela aplicação do método econômico dará subsídios para responder a seguinte pergunta, referente aos objetivos originais deste trabalho: deve um equipamento atual que tem N anos de uso, ser ou não substituído imediatamente?

Quando o método econômico indicar que deve ocorrer substituição em algum prazo futuro, a leitura será: o equipamento não precisa ser substituído imediatamente.

Quando o método econômico indicar que deve ocorrer substituição sem esperar prazo algum, a leitura será: o equipamento requer substituição imediata.

4.2.1 Metodologia

O trabalho de Christer e Scarf propõe um modelo que calcula um custo em função do instante em que ocorre a substituição. Este custo é chamado Custo Presente Descontado, e será discutido adiante.

Este modelo é baseado na previsão de custos futuros para criar um método de decisão de substituição que permita determinar a decisão menos custosa e calcular o custo adicional oriundo de não executar esta decisão de menor custo.

Procura ainda este modelo incluir fatores subjetivos, importantíssimos em se tratando de equipamentos médicos, condicionando-os a valores econômicos. Isto é feito com a introdução de um custo virtual chamado penalidade, que será explicado adiante.

Além dos custos relativos ao equipamento atual, o modelo econômico também inclui os custos relativos ao equipamento substituto. Isto decorre da necessidade de considerar a continuidade da função do equipamento. A substituição de um equipamento é vista como parte de uma cadeia (ou sequência), na qual a vida útil de cada unidade é um ciclo.

O modelo de custo de Christer e Scarf calcula a quantia que hoje será suficiente para prover todos os custos de operação, manutenção, penalidades e substituição do equipamento atual, bem como os de seu substituto, até a substituição do substituto (incluindo o valor da substituição deste). Esta quantia corresponde ao Custo Presente Descontado (CPD) mencionado acima.

O custo presente descontado é dito “descontado”, pois é composto pelo somatório de vários custos que ocorrerão em diversos momentos. Uma quantia a ser gasta em um instante futuro equivale a uma quantia menor a ser investida hoje, conforme a Equação 8. Portanto o cômputo do custo presente descontado é feito por um fator de desconto (Equação 11).

O horizonte estendido até a substituição do equipamento substituto é chamado “horizonte de um ciclo”. Afirmam os autores que o horizonte de um ciclo é suficiente para incluir a continuidade da função do equipamento e a evolução tecnológica, sem incorrer no risco de fazer previsões pouco confiáveis sobre um futuro mais remoto sobre o qual a decisão pouco influencia.

Os pares de instantes futuros nos quais poderão ocorrer as substituições do equipamento atual e de seu substituto são denominados cursos de acontecimentos.

O envelhecimento de aparelhos está mais relacionado com a utilização que sofreu do que com o tempo cronológico. Um equipamento que é usado intensamente envelhecerá em menos tempo do que outro idêntico operando com carga leve. Desta forma o comportamento dos custos de operação e manutenção dos aparelhos estarão mais relacionados a uma unidade de utilização do aparelho, do que a uma unidade de medida de tempo cronológico.

As unidades de utilização variam de equipamento para equipamento; por exemplo, unidade de uso de tomógrafos são cortes, de máquinas de hemodiálise são horas de uso, de desfibriladores são horas em disponibilidade, de exame por ultra-som são número de procedimentos e assim por diante.

O método econômico parte do modelo que calcula o custo presente descontado para todos os cursos de acontecimentos possíveis. Um sistema de comparação entre os custos previstos para os cursos de acontecimentos permite definir qual curso de acontecimentos será economicamente mais favorável.

O modelo econômico de Christer e Scarf está expresso na equação que permite calcular o custo presente descontado (CPD - Equação 12) para cada curso de acontecimentos possível. Nesta equação os cursos de acontecimentos considerados são: quando será substituído o equipamento atual e quando será substituído seu substituto (a duração da vida deste último não é conhecida a priori).

Segue a simbologia usada para equacionar o modelo formulado por Christer e Scarf:

N – Idade em anos do equipamento atual; é o tempo contado desde o instante de recebimento e entrada em operação do equipamento até o instante presente.

K – Período adicional possível de permanência com o equipamento atual a partir do instante presente, em anos.

L – Período possível de permanência com o equipamento substituto, em anos. É o tempo contado desde o instante de recebimento e entrada em operação do equi-

pamento substituto até o instante em que o equipamento substituto será substituído.

N , K e L são considerados sempre inteiros, em correspondência ao período contábil usual de 1 ano.

$K + L$ – Horizonte de um ciclo: Tempo contado desde o instante presente até a substituição do equipamento substituto do equipamento atual.

O modelo considera os seguintes itens de custo:

$c_x(i)$ – Custo esperado de operação do equipamento x em seu i -ésimo ano.

$m_x(i)$ – Custo esperado de manutenção para o equipamento x em seu i -ésimo ano

$C_x(i)$ – Custo total esperado de operação e manutenção para o i -ésimo ano do equipamento x ($C_x(i) = m_x(i) + c_x(i)$).

$p_x(i)$ – Medida de penalidade para o equipamento x em seu i -ésimo ano. A penalidade é uma espécie de custo virtual referente a problemas como desconforto para paciente e operadores, publicidade negativa, indenizações e custos adicionais, que em geral estão relacionados a defeitos, mal funcionamento ou falhas do equipamento. Uma forma prática de estimar o valor de penalidades foi apresentada por Christer e Scarf em sua aplicação prática apresentada neste capítulo na seção 4.2.2..

$S_x(i)$ – Valor de sucata ou revenda do equipamento x com i anos;

R_x – Custo de compra do substituto do equipamento x . A substituição de um equipamento corresponde ao custo referente ao valor pago pela unidade nova subtraída a entrada de dinheiro correspondente ao valor de revenda do equipamento usado [$R_n - S_x(i)$].

r – Fator de Desconto de acordo com a equação 11

Estes itens de custo se referem a um equipamento x que pode ser:

' o ' – equipamento velho (*old*).

' n ' – equipamento novo (*new*).

As funções acima podem ser discretas, pois os valores de i são sempre inteiros.

O modelo equaciona o Custo Presente Descontado representado por $C(N; K, L)$, da seguinte forma:

$$C(N; K, L) = \underbrace{\sum_{i=1}^K (C_o(N+i) + p_o(N+i)) \cdot r^{i-1/2}}_{\text{primeiro_termo}} + \underbrace{r^K \cdot (R_n - S_o(N+K))}_{\text{segundo_termo}} + \underbrace{r^K \cdot \sum_{i=1}^L (C_n(i) + p_n(i)) \cdot r^{i-1/2}}_{\text{terceiro_termo}} + \underbrace{r^{K+L} \cdot (R_n - S_n(L))}_{\text{quarto_termo}}$$

**Equação 12 -
Cálculo do Custo
Presente Descontado
(CPD)**

Na Equação 12, o primeiro termo corresponde ao somatório dos custos descontados de operação, manutenção e penalidade para mais K anos de operação do equipamento atual. O fator de desconto r é usado para descontar estes custos (Equação 11) sendo elevado a $i-1/2$ para corresponder à uma aproximação referente aos custos, detalhada como segue:

Somente o valor total dos custos em um ano é conhecido; não se sabe exatamente a distribuição destes custos ao longo de cada ano; torna-se necessária a suposição de que todos os custos ocorrerão em um mesmo instante, escolhido pelos autores como o meio do ano. Isto corresponde matematicamente a elevar o fator de desconto r a $i-1/2$.

O terceiro termo da Equação 12 corresponde ao somatório dos custos descontados de operação, manutenção e penalidade para os L anos de operação do equipamento atual. O fator r é usado para descontar estes custos (Equação 11), sendo, também, elevado a $i-1/2$ para corresponder à aproximação decorrente da suposição de que todos esses custos ocorrem ao meio do ano.

O segundo e o quarto termos correspondem ao valor de substituição do equipamento antigo e do novo, respectivamente, subtraído o valor de revenda. Ambos termos são descontados para o instante em que ocorrerão.

O modelo econômico, definido na Equação 12 acima, calcula o Custo Presente Descontado (CPD) para cada curso de acontecimentos possível. Cada curso de acontecimentos possível corresponde a um par (K, L) . K e L são inteiros e representam, respectivamente, K o

prazo adicional de permanência com o equipamento atual e L o prazo de permanência com o equipamento substituto.

Busca-se aquele par K^* e L^* que representa o menor custo dentro do horizonte definido. Estes são os prazos de permanência com o equipamento atual e seu substituto que indicam uma otimização de custos. O valor de L^* não indica uma decisão, mas complementa a decisão do prazo adicional de permanência com o equipamento atual, o que corresponde a K^* .

O custo presente descontado (Equação 12) se refere a um período de $K+L$ anos. Logo diferentes pares K e L podem se referir a períodos de duração distinta. Assim, não é válido comparar diretamente os custos presentes descontados dos diversos pares (K, L) possíveis na busca do par (K^*, L^*) que representa o menor custo. Para os custo poderem ser comparados devem estar referidos a um mesmo período de tempo ou a uma mesma unidade de utilização.

Caso a utilização seja uniforme (número constante de procedimentos por período), o Custo Médio Anual (CMA) é igual à divisão do Custo Presente Descontado (total de custos no período $K+L$) pela duração do período de $K+L$ anos. Custos médios anuais podem ser comparados entre si, pois referem-se ao mesmo período de um ano.

A opção que tiver menor custo anual será a preferida e corresponderá aos valores ótimos K^* e L^* . Desta forma, o valor que for determinado para K^* indica quanto tempo se deve permanecer com o equipamento atual até substituí-lo. O par (K^*, L^*) é igual ao par (K, L) que minimiza a função de custo médio anual de acordo com a Equação 13 abaixo:

$$CMA = \frac{C(N; K, L)}{K + L}$$

Equação 13 - Custo Médio Anual

Quando a utilização não é constante ao longo da vida dos equipamentos, é mais sensato minimizar o custo médio por unidade de utilização destes equipamentos. Assim, sendo a função $u_x(i)$ que descreve o número de unidades de utilização de um equipamento x à idade i , a função a ser minimizada para definir os prazos de permanência com o equipamento atual e o substituto será a função de custo médio por unidade de utilização (CMU):

$$CMU = \frac{C(N; K, L)}{\sum_{i=1}^K u_o(N+i) + \sum_{i=1}^L u_n(i)} \quad \text{Equação 14 - Custo Médio por Unidade de Utilização}$$

O numerador da Equação 14 é o custo presente descontado (CPD), representado por $C(N; K, L)$, calculado para um equipamento de N anos, usado por mais K anos e seu substituto por L anos.

O denominador da Equação 14 contém o somatório das unidades de utilização do equipamento atual por mais K anos e o somatório das unidades de utilização do equipamento substituto ao longo de L anos. Portanto, este denominador corresponde ao total de unidades de utilização do equipamento atual e de seu substituto ao longo do horizonte de $K+L$ anos.

Para minimizar a Equação 13 ou a Equação 14 os autores propõem os métodos descritos a seguir.

Para encontrar o valor mínimo da Equação 13: os valores de $C(N; K, L)$ são desenhados, em um gráfico cartesiano, em função de $K+L$ (denominador da Equação 13), o valor do CMA corresponde à tangente da reta que liga a origem ao ponto $[C(N; K, L), K+L]$. Logo o ponto que minimiza o custo médio anual é aquele correspondente à tangente de menor ângulo em relação ao eixo dos x . (Esta forma gráfica de minimização é ilustrada através das figuras 2, 3 e 4 da seção de Resultados e Conclusões Obtidas neste capítulo).

Para o caso de utilização variável (Equação 14), pode ser usado um procedimento semelhante em que os valores de $C(N; K, L)$ são desenhados, em um gráfico cartesiano, em função de $\sum_{i=1}^K u_o(N+i) + \sum_{i=1}^L u_n(i)$ (denominador da Equação 14), o valor do CMU corresponde à tangente da reta que liga a origem ao ponto $\left[C(N; K, L), \sum_{i=1}^K u_o(N+i) + \sum_{i=1}^L u_n(i) \right]$. Logo o ponto que minimiza o custo médio por utilização é aquele correspondente à tangente de menor ângulo em relação ao eixo dos x .

Nem sempre é possível seguir a recomendação do método de fazer a substituição em um determinado prazo. Caso seja necessário atrasar a substituição, é indicado calcular a perda

financeira devida a este atraso. Para determinar esta perda (AT) por atrasar a substituição do período ótimo (K^*), sendo k o número de anos de atraso:

$$AT = C(N; K^* + k, L^*) - C(N; K^*, L^*) - \frac{k \cdot C(N; K^*, L^*)}{K^* + L^*} \quad \text{Equação 15 - Perda Devida ao Atraso de uma Substituição por } k \text{ anos}$$

O primeiro termo corresponde ao custo presente descontado havendo atraso, ou seja ao período de $K^* + k + L^*$. O segundo termo corresponde ao custo presente descontado para o período ideal de $K^* + L^*$ anos e o terceiro termo é o custo médio anual mínimo (Equação 13) para os k anos de atraso.

Já foi mencionado nesta seção que o modelo econômico engloba diversos custos indiretos e subjetivos sob a categoria de penalidade. É muito difícil determinar o valor exato desses custos. Os efeitos das penalidades sobre os resultados do método podem ser avaliados por uma análise de sensibilidade: são arbitrados diversos valores para as penalidades e calculados o efeito de cada um destes valores sobre os resultados do método. Dessa forma é possível ver o valor da penalidade associado a cada curso de ação possível, e o tomador de decisão poderá ponderar se faz sentido o valor de penalidade arbitrado. A aplicação apresentada a seguir inclui também um exemplo do funcionamento das penalidades na prática, o que permitirá melhor compreensão deste conceito.

4.2.2 Estudo de Caso

A metodologia foi testada sobre dados de ventiladores pulmonares usados em salas cirúrgicas do Liverpool Royal Hospital (Reino Unido). Os dados da pesquisa foram fornecidos por seus departamentos de contabilidade e bioengenharia.

Foram escolhidos por sua uniformidade 6 ventiladores da marca Servovent, todos contando 12 anos. Esses ventiladores não eram candidatos à substituição imediata, nem deveria um eventual substituto ser diferente da unidade atual, pois essa classe de ventilador não está em evolução tecnológica acelerada.

Os ventiladores recebiam manutenção preventiva (MP), ao custo de £180,00 anuais para cada unidade. O custo de cada falha era de £165,00 incluindo mão-de-obra técnica, pe-

ças, perda de faturamento e mão-de-obra extra dos operadores. O custo de aquisição de um ventilador novo era de £2.700,00. O valor de revenda foi considerado nulo.

De acordo com os registros do Centro Cirúrgico do hospital, cada unidade foi usada uniformemente e igualmente ao longo dos anos.

Para descrever as funções de custos e penalidades era necessário prever o número de falhas em cada ano de operação, pois os gastos de conserto e a contabilização de penalidades só ocorriam quando ocorria uma falha do equipamento.

O comportamento de falhas é usualmente descrito por uma função estatística paramétrica. Mas os autores preferiram descrever o comportamento de falhas através de uma função que descreve a média de falhas a cada período, chamada de Taxa de Ocorrência de Falhas (*Rate of Occurrence of Failures* — ROCOF).

A ROCOF corresponde à derivada no tempo do número acumulado de falhas, e pode ser transformada em função a partir de um ajuste de curva sobre dados experimentais. A figura 1 mostra o número médio de falhas acumuladas por ventilador da amostra ao fim de cada ano de operação e foi criada a partir da tabela 4.

Tabela 4 - Número de Falhas para cada Ventilador da amostra por ano

Número de Falhas Ocorridas a Cada Ano de Operação												
Item/no. inventário	Ano											
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
Servovent R1061	1	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0
Servovent R1103	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0
Servovent R1099	-	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0
Servovent R1063	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
Servovent R1062	0	0	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0
Servovent R1060	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1

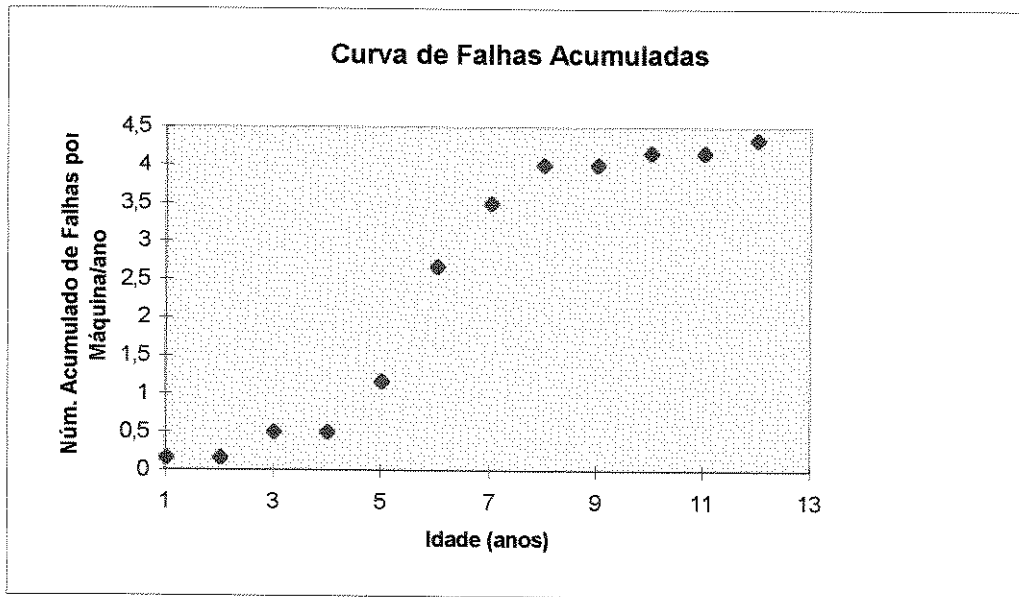


Figura 1 - Curva do número médio de Falhas Acumuladas por ventilador da amostra por ano

A figura 1 retrata a ocorrência de uma redução na frequência de falhas após o 7º ou 8º anos de operação. Como a coleta de dados não foi acompanhada, é difícil explicar esse fenômeno: pode ter ocorrido ajuste dos equipamentos, mudança na característica da manutenção ou no rigor dos registros.

Por cautela foram considerados apenas os 8 primeiros anos de vida dos equipamentos.

Chamando a ROCOF de $\mu(t)$, onde t é a idade do aparelho em anos, o ajuste de curva forneceu:

$$\mu(t) = \exp(-2,234 + 0,304 \cdot t)$$

Equação 16 - Taxa de ocorrência de falhas dos ventiladores (ROCOF)

O autores pressupunham que os custos de penalidade estavam relacionados à ocorrência de falha, ou seja que o custo anual de penalidade $[p_s(t)]$ correspondia a um valor p que será multiplicado pelo número de falhas descrito pelo ROCOF $[\mu(t)]$.

$$p_s(t) = p \cdot \mu(t)$$

Equação 17 - Penalidade em função da ROCOF

Onde: p – Valor da penalidade por falha

$p_x(t)$ – Valor de penalidade para o equipamento x em seu t -ésimo ano de vida.

Na aplicação do método diversos valores devem ser atribuídos ao valor da penalidade por falha p . Estas diversas atribuições de valor possibilitarão avaliar a sensibilidade do resultado do método ao efeito das penalidades.

Os autores estimaram um valor de penalidade por falha para servir de referencia, chamado $p_{estimada}$. A estimativa foi feita da seguinte forma:

Algumas falhas menores não tinham conseqüências além dos custos de conserto. Outras falhas graves implicavam na cobrança de penalidade por terem prejudicado cirurgias e ameaçado o bem estar de pessoas.

Como não era possível prever quais falhas seriam graves, foi cobrado um valor individual ($p_{estimada}$) para cada falha. Esse valor corresponderia ao valor arbitrado para a falha grave (G) multiplicado pela probabilidade de ocorrer uma falha grave ($prob_{fg}$).

$$p_{estimada} = G \cdot prob_{fg}$$

Equação 18 - Valor de penalidade por falha

Os autores, então, arbitraram o valor de G em £10.000,00 para cada falha grave que ocorresse ($G = £ 10.000,00 / \text{falha grave}$).

Na tabela 4 observa-se que houve um total de 27 falhas registradas. De acordo com o pessoal do hospital apenas uma teve conseqüências graves. Então a probabilidade de falha grave foi estimada: $prob_{fg} = \frac{1}{27}$

Substituindo estes valores na Equação 18 decorre:

$$p_{estimada} = 10000 \cdot \frac{1}{27} \quad \therefore \quad p_{estimada} = £ 370,00$$

Através dos dados e análises apresentadas foram definidas as funções necessárias para calcular o custo presente descontado (CPD – Equação 12) neste estudo de caso, cujos resultados seguem abaixo:

$$C_o(t) = C_n(t) = \pounds [180,00 + 165,00 \cdot \mu(t)]$$

$$R_o = R_n = \pounds 2.700,00$$

$$S_o(t) = S_n(t) = \pounds 0$$

$$p_o(t) = p_n(t) = p_{estimada} \cdot \mu(t) = \pounds [370,00 \cdot \mu(t)]$$

Concluindo esta seção segue um sumário da metodologia utilizada pelos autores que obedeceu aos seguintes procedimentos:

- 1) Encontrar diversos CPD (Equação 12) para diversos pares K e L possíveis.
- 2) Plotar os CPD em função de K+L. A tangente do ângulo formado pela reta que liga a origem a cada ponto plotado com o eixo das abcissas equivale ao Custo Médio Anual (CMA – Equação 13).
- 3) Determinar graficamente o ponto de menor tangente, ou seja, de menor ângulo, que corresponde ao ponto de menor CMA. Identificado este ponto são determinados os valores de K^* e L^* , ou seja o par (K, L) que minimiza o CMA.
- 4) Apresentar os resultados obtidos:
 - a) O equipamento atual deve ser substituído em K^* anos.
 - b) Atrasar essa substituição implicará em perda devida a este atraso, calculada pela Equação 15.

4.2.3 Resultados e Conclusões

A Tabela 5 abaixo contém os resultados da aplicação do método para a amostra de ventiladores Servovent. Para a construção desta tabela os autores supuseram os ventiladores com diversas idades iniciais (N) e calcularam o prazo adicional ótimo de permanência com o equipamento atual (K^*), o prazo de permanência ótimo com o equipamento substituto (L^*) e o custo médio anual no horizonte ótimo K^*+L^* para cada idade N . O valor de penalidade por falha foi colocado como nulo na elaboração desta tabela ($p = 0$).

Tabela 5 - Decisões de Substituição pela Idade Atual (penalidade $p = 0$)

Idade Atual (N)	K^*	L^*	$\frac{C(N;K^*,L^*)}{K^*+L^*}(\text{£})$
4	8	12	473
6	6	12	528
8	4	13	586
10	2	13	641
12	1	13	678

Da Tabela 5 acima pode-se concluir que à medida que o equipamento envelhece sua substituição deve ocorrer em menos tempo (pois o período ótimo de permanência com o equipamento atual K^* diminuiu com o aumento de N). Observa-se também que o prazo ótimo de permanência com o equipamento substituto L^* calculado permanece uniforme com a variação da idade atual N . Ainda, que o custo médio é crescente (pois a idade inicial N é mais avançada e os custos, no horizonte $K^* + L^*$, mais elevados).

Para ilustrar a forma de minimização gráfica do custo médio anual sugerida no artigo são apresentadas as figuras 2, 3 e 4 abaixo.

Os gráficos destas figuras foram construídos a partir dos dados dos ventiladores Servovent, supondo o valor de penalidade por falha estimado em $p = \text{£ } 370,00$. Cada gráfico é individual para uma idade atual (N) do equipamento. Para cada par (K, L) possível (onde $1 \leq K \leq 5$ e $1 \leq L \leq 13$) é calculado o custo presente descontado (CPD - Equação 12) que é colocado no gráfico em função de $K + L$, tomando o cuidado de identificar o valor de K em cada ponto.

A tangente do ângulo entre a reta que liga a origem dos gráficos a cada ponto $[C(N;K,L), K+L]$ e o eixo das abcissas vale: $\frac{C(N;K,L)}{K+L}$, o custo médio anual (Equação 13). Assim, para identificar o par (K^*, L^*) que minimiza o custo médio anual, basta identificar no gráfico aquele ponto, entre todos os calculados, cuja reta que o liga à origem tem o menor ângulo em relação ao eixo das abcissas. Este ponto corresponde a $[C(N;K^*,L^*), K^*+L^*]$, estando o K^* identificado pela convenção de representação do ponto são calculados imediatamente os valores de L^* e de $C(N;K^*,L^*)$.

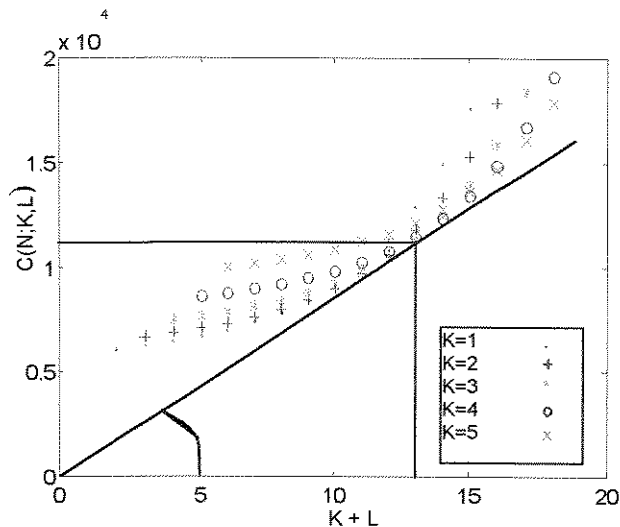


Figura 2 - Custo Total Descontado contra a Duração dos Ciclos para uma Máquina de Idade Atual Igual a 6 anos

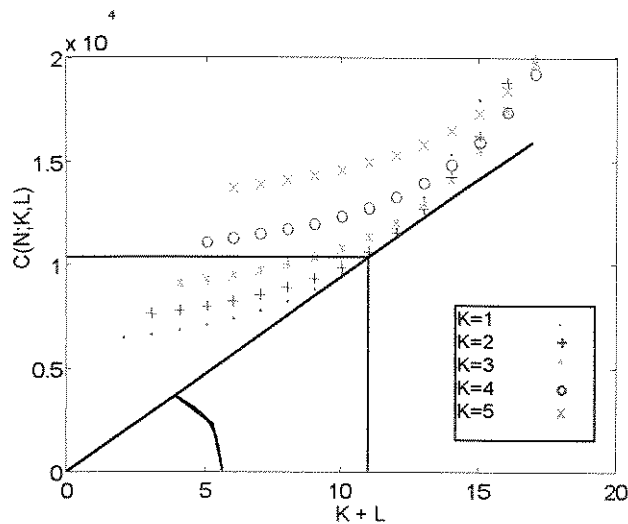


Figura 3 - Custo Total Descontado contra a Duração dos Ciclos para uma Máquina de Idade Atual Igual a 8 anos

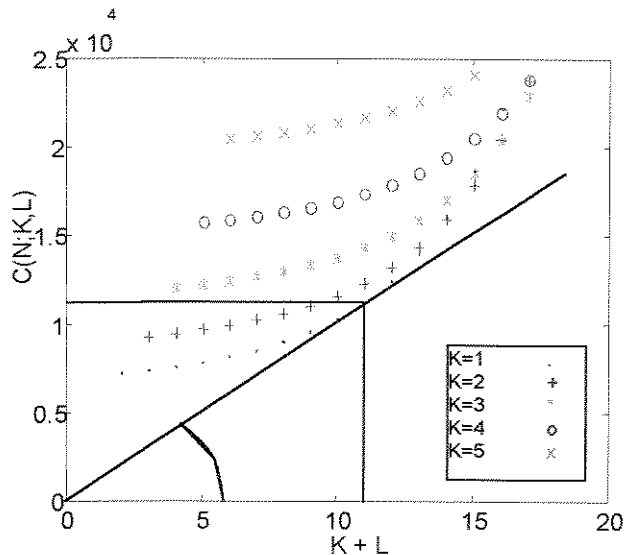


Figura 4 - Custo Total Descontado contra a Duração dos Ciclos para uma Máquina de Idade Atual Igual a 10 anos

A Tabela 6 apresenta o cálculo do prazo ótimo de permanência com o equipamento atual (K^*) e o prazo de permanência com o equipamento substituto (L^*) para a idade atual da

máquina (N) igual a 6, 8 e 10 anos ($N = 6$ anos , $N = 8$ anos e $N = 10$ anos), supondo diversos valores de penalidade por falha (p).

Os valores de K^* e L^* para a quinta linha da tabela 6 abaixo, onde o valor de penalidade é igual a £ 370,00 ($p = £ 370,00$), também podem ser encontrados aplicando o método gráfico de minimização às figuras 2, 3 e 4, respectivamente para $N = 6$, $N = 8$ e $N = 10$ anos.

Tabela 6 - Sensibilidade da Decisão de Substituir ao Custo de Penalidade

Valor de Penalidade/ Falha (£)	Idade Atual da Máquina (N)					
	6 anos		8 anos		10 anos	
	K^*	L^*	K^*	L^*	K^*	L^*
0	6	12	4	13	2	13
37	5	12	4	12	1	12
74	5	11	3	12	1	12
185	4	11	2	11	1	11
370	3	10	1	10	1	10
740	2	8	-	-	-	-
1480	1	7	-	-	-	-

A Tabela 6 acima mostra que conforme o aumento do valor de penalidade por falha p , os prazos ótimos de permanência com o equipamento atual e com o seu substituto (K^* e L^*) diminuem, para as três idades iniciais N . Ou seja o aumento da penalidade leva os equipamentos à substituição em menos tempo.

Quando a idade do equipamento atual é igual a 10 anos ($N = 10$ anos) a tabela 6 indica a mesma decisão para valores de penalidade por falha (p) acima de £ 37,00: substituir o equipamento em 1 ano. De fato, como $K = 1$ é o valor mínimo possível para K , este resultado pode indicar tanto que o equipamento deve ser substituído dentro de 1 ano como imediatamente. Esta questão será estudada no Capítulo 5 desta dissertação, na adaptação intitulada: Permitir a Substituição Imediata do Equipamento Atual.

A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam a perda por atrasar a substituição em relação ao período ótimo de permanência K^* , como definida na Equação 15. Ambas as tabelas supõem atrasos de 1 e 2 anos e diversos valores de penalidade. A Tabela 7 é relativa aos dados de um ventilador cuja idade atual é igual a 6 anos ($N = 6$ anos) e a Tabela 8 é relativa aos dados de um ventilador cuja idade atual é igual a 10 anos ($N = 10$ anos).

A Tabela 8 mostra que a perda por atrasar por 2 anos a substituição de uma máquina atual com idade igual a 10 anos ($N = 10$ anos) pode ser próxima ao valor de uma máquina nova quando o valor de penalidade utilizado for $p = \text{£ } 370,00$.

O comportamento dessas tabelas é inesperado, pois, conforme p aumenta, a perda por atrasar a substituição diminui até um mínimo e depois volta a aumentar. Os autores não apresentaram qualquer comentário quanto a isso.

Este comportamento inesperado motivou a adaptação apresentada no Capítulo 5, intitulada: Calcular a Perda por Atraso na Substituição pela Diferença entre o Custo Médio com Atraso e o Custo Médio Ótimo. Esta adaptação propõe uma forma diferente de cálculo da perda por atrasar a substituição.

Tabela 7 - Perda por Atrasar a Substituição (Máquina com Idade Atual de 6 anos)

Custo de Penalidade (£)	Perda por atrasar a Substituição (£)	
	1 ano de atraso	2 anos de atraso
0	95	420
74	85	414
185	48	374
370	42	405

Tabela 8 - Perda por Atrasar a Substituição (Máquina com Idade Atual de 10 anos)

Custo de Penalidade (£)	Perda por atrasar a Substituição (£)	
	1 ano de atraso	2 anos de atraso
0	64	357
74	28	330
185	325	1050
370	828	2249

Os autores concluíram que:

- método proposto respondeu aos parâmetros como esperado, conforme a interpretação da Tabela 5 da seção de resultados neste capítulo.
- Sua aplicação foi simples.

- Fatores tidos como importantes puderam ser considerados, tais como evolução tecnológica, dados de custo e segurança.
- Eventuais complicações foram fruto da necessidade de modelar manutenção, utilização e outros processos dos equipamentos.

4.3 Comentários

O método de Christer e Scarf considera vários dos fatores do Capítulo 2, todos eles reduzidos e expressos em custos. Por exemplo:

Evolução Tecnológica é medida pela comparação entre o conjunto de custos do equipamento atual e o conjunto de custos do equipamento substituto.

Deterioração é medida através do comportamento dos custos anuais de manutenção.

Na avaliação da deterioração são levados em conta os fatores de confiabilidade (medida pela ROCOF), segurança (medida por penalidades), disponibilidade (incluída no custo de falha) e produtividade (considerada através da utilização).

O fator ergonomia é incluído no método na medida em que afeta a produtividade do equipamento. O fator condição de manutenção pode afetar o custo de falha.

Outros fatores são considerados através da comparação subjetiva entre o valor do custo adicional por atrasar uma substituição e as vantagens ou desvantagens que decorreriam deste atraso.

O método não considera fatores externos como, por exemplo concorrência e efeitos de *marketing*. Também não considera de forma clara e eficiente as perdas de rentabilidade, especialmente aquelas causadas pela evolução tecnológica intensa.

Além disso, a forma usada para considerar evolução tecnológica pode não ser eficiente: O modelo considera que o equipamento substituto será sempre o mesmo independente de quando ocorra a substituição. Assim o equipamento substituto para a substituição imediata

terá o mesmo grau de evolução tecnológica que o equipamentos substituto para a substituição em dez anos, o que provavelmente não corresponde à realidade.

É questionável até que ponto valores financeiros podem expressar o lado subjetivo da questão da substituição. Afinal, é difícil atribuir valor financeiro a vidas humanas, saúde ou bem estar das pessoas e isto constitui, em última análise, o objetivo de um hospital.

A aplicação do método considera a grande maioria dos fatores, todos expressos em uma única unidade, a moeda. Isto favorece a adoção deste método para aplicação tendo em vista que seus valores são mensuráveis, claros e conhecidos, e sua comparação é direta.

Uma qualidade inerente aos métodos econômicos é a repetibilidade. Isto significa que este método pode ser aplicado em outros locais, desde que haja disponibilidade de dados equivalentes.

Os métodos econômicos não são específicos para um local de operação; portanto uma aplicação na realidade brasileira pode ter seus resultados comparados à aplicação apresentada no artigo. Isto motiva a escolha deste método para a aplicação prática dessa dissertação (Capítulo 6).

As adaptações feitas sobre o método econômico de Christer e Scarf (Capítulo 5) procuram abordar os pontos que pareceram passíveis de maior elaboração.

Capítulo 5 Estudo de Adaptações ao Método de Christer e Scarf (1994)

Neste capítulo são desenvolvidas adaptações ao Método Econômico de Christer e Scarf descrito no Capítulo 4. Estas adaptações consistem em exercícios exploratórios sobre dados do estudo de caso do artigo. Algumas adaptações confirmam a validade da tentativa de ampliação proposta, e outras confirmam a correção dos limites propostos pelos autores do artigo.

Este capítulo surgiu do desejo de contribuir com idéias que pudessem desenvolver e facilitar a aplicação do método.

5.1 Propostas de Adaptações à Metodologia

5.1.1 Encontrar a Opção de Menor Custo por Computador (Não Graficamente)

A metodologia apresentada por Christer e Scarf propõe que os valores de K^* (período de permanência com o equipamento atual) e L^* (período de permanência com o equipamento substituto) sejam encontrados graficamente, como ilustrado nas figuras 2, 3 e 4 do capítulo 4.

Alternativamente, é sugerido nesta dissertação que os valores de K^* e L^* sejam determinados diretamente por computador, usando uma matriz $K_{max} \times L_{max}$.

Vale relembrar (Capítulo 4) que o par (K^*, L^*) é aquele par cujos valores minimizam o custo médio anual (equação 13) dentre todos os pares (K, L) possíveis.

É suposto que o valor mínimo tanto para K como para L é 1 ($K \geq 1$ e $L \geq 1$) e que os valores de K e L são sempre inteiros. Assim os valores possíveis para K e L são os números inteiros maiores ou iguais a 1.

É necessário, ainda, indicar um valor máximo de duração da vida do equipamento (L_{max}). Este valor deve ser muito alto, a possibilidade de algum equipamento atingir essa idade em operação é muito baixa, servindo como limite superior aos valores possíveis de L . Estando definido o valor máximo de duração da vida de um equipamento (L_{max}) o prazo máximo de permanência com um equipamento de idade igual a N anos será K_{max} , onde $K_{max} = L_{max} - N$.

Portanto, os pares (K, L) possíveis são todos os pares de K e L tais que $K \in [1; K_{max}]$ e $L \in [1; L_{max}]$.

A proposta desta adaptação é criar, usando o computador, uma matriz de custos médios anuais c_{kl} . Os elementos desta matriz correspondem ao valor do custo médio anual (equação 13), onde o valor de K corresponde à linha deste elemento na matriz e o valor de L à coluna deste elemento na matriz. Por exemplo o elemento da matriz $c_{6,7}$ corresponde ao custo médio anual supondo que o equipamento anual é usado mais 6 anos e o equipamento substituído por 7 anos, ou seja ao custo médio anual correspondente ao par $(K, L) = (6, 7)$.

Estando criada a matriz de custos médios anuais, o computador procura o elemento desta matriz de menor valor. A linha e a coluna referentes a este elemento correspondem aos valores de K^* e L^* , procurados.

Esta solução foi implementada através da criação de rotinas computacionais usando o pacote `MatLab` e sua linguagem própria de programação.

As rotinas do `MatLab` criadas para esta adaptação foram:

CPD – Calcula o valor do Custo Presente Descontado, de acordo com a equação 12, recebendo como entrada valores de N , K e L e dados de custo.

MCMA – Calcula a matriz de Custos Médios Anuais, como explicado nesta seção, utilizando a rotina CPD.

MINMAT – Encontra na matriz fornecida por MCMA o elemento de menor valor. Fornece como resultado a ordem da linha e coluna deste elemento e seu valor.

Essas rotinas foram aproveitadas para implementar todas as adaptações sobre o método de Christer e Scarf apresentadas neste capítulo.

Segue um exemplo dessa implementação: supondo $L_{max} = 20$ anos, $N = 6$ anos, o valor de penalidade por falha nulo ($p = 0$) e os demais dados do estudo de caso apresentado por Christer e Scarf e usando as rotinas criadas para o MatLab, é obtida a matriz de custos médios anuais correspondente. Uma parte dessa matriz é apresentada na tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Parte da Matriz de Custo Médio Anual para $N=6$

L	9	10	11	12	13	14	15
K							
3	622,64	599,30	584,83	579,11	582,58	596,14	621,27
4	598,05	577,45	564,60	559,57	562,86	575,41	598,66
5	584,49	565,55	553,53	548,59	551,28	562,54	583,74
6	581,95	563,79	551,92	546,57	548,28	557,97	576,97
7	591,07	572,93	560,61	554,36	554,73	562,59	579,21
8	613,13	594,29	580,94	573,33	571,97	577,71	591,74
9	650,11	629,89	614,91	605,43	601,93	605,21	616,39

Observando a tabela 9 percebe-se que o elemento de menor valor da matriz de custo médio anual do exemplo está na sexta linha e na décima segunda coluna e vale £ 546,67. Ou seja, $(K^*, L^*) = (6, 12)$. Usando o método gráfico, Christer e Scarf encontraram os mesmos valores de K^* e L^* , mas obtiveram o CMA no valor de £ 528 para os mesmos dados (Tabela 5 – pág. 59). Esta discrepância deve ser fruto da pouca precisão que o método gráfico oferece.

A figura 5 corresponde a uma visão tridimensional da matriz de custo médio anual do exemplo usando falsa cor. O mapa de cores usado é logarítmico para permitir distinguir a região correspondente ao mínimo, pois os valores em seu entorno são muito próximos. Esta figura é apenas ilustrativa, para permitir a visualização a matriz representada, a determinação do elemento de menor valor é feita pela rotina MINMAT diretamente da matriz de custo médio anual. A seta mostra o ponto de mínimo (K^*, L^*) de coordenadas (6, 12) de acordo com a tabela 9.

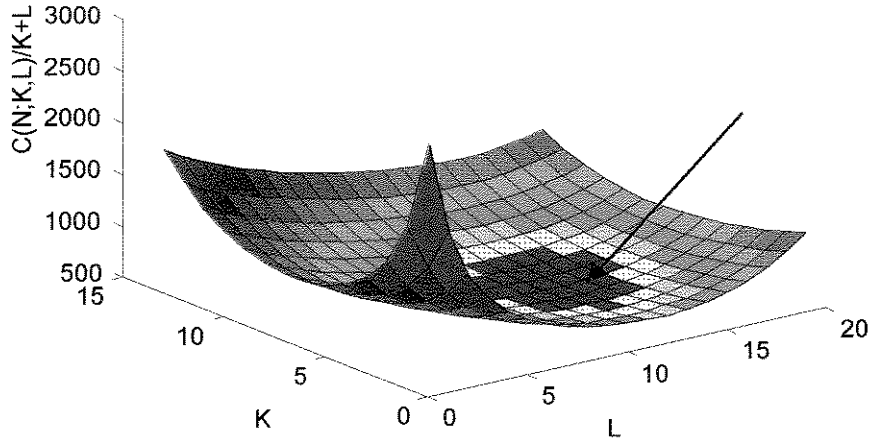


Figura 5 - Valores do Custo Médio Anual para diversos K e L , sendo $N=6$, $p = 0$ e $L_{max} = 20$, usando escala logarítmica de falsa-cor.

5.1.2 Permitir a Substituição Imediata do Equipamento Atual

Outro aspecto a ser considerado é que Christer e Scarf supõem que os valores de K são sempre maiores ou iguais a 1. Nunca é feita a suposição que o equipamento poderia ter que ser substituído imediatamente, o que corresponderia a $K = 0$.

Adaptando as rotinas do MatLab para permitir essa possibilidade (o que corresponde a acrescentar à matriz de custos médios anuais uma linha em que $K = 0$), supôs-se que:

$$K \in [0; K_{max}] \quad e \quad L \in [1; L_{max}]$$

A equação 12, que calcula o Custo Presente Descontado, precisou ser reformulada para admitir $K = 0$, pois neste caso o somatório dos custos de operação para o restante da vida do equipamento atual é nulo. Resultando:

$$C(N;0,L) = \left\{ R_n - S_o(N) + \sum_{i=1}^L (C_n(i) + p_n(i)) \cdot r^{i-1/2} + (R_n - S_n(L)) \cdot r^L \right\}$$

Equação 19 - Custo Presente Descontado com Substituição Imediata

Nesta equação estão somados o custo de substituição imediata do equipamento atual, o somatório dos custos de operação, manutenção e penalidades do equipamento substituto por L anos e o custo de substituição do equipamento substituto.

As seguintes rotinas citadas na seção anterior foram alteradas:

CPD – Foi melhorada para calcular o custo presente descontado quando $K = 0$, conforme a equação 19.

MCMA – Foi alterada para gerar a matriz de custos médios anuais cuja primeira linha corresponde a custos médios anuais onde $K = 0$.

Usando os dados do estudo de caso do artigo de Christer e Scarf e supondo o valor de penalidade por falha igual a £ 370,00 ($p = £ 370,00$), foram calculados os prazos de permanência com o equipamento atual (K^*) e com o equipamento substituto (L^*) supondo o equipamento com idades atuais N entre 6 e 10 anos ($6 \geq N \geq 10$ anos). A tabela 10 apresenta os resultados de K^* , L^* e o custo médio anual (equação 13) para a hipótese original que K seria sempre maior ou igual a um e para a adaptação em que K é maior ou igual a zero.

Tabela 10 - Mudança nos Resultados Permitindo $K=0$, $p=£370$,

N	Resultados qdo. $K \geq 1$			Resultados qdo. $K \geq 0$		
	K^*	L^*	$\frac{C(N;K^*,L^*)}{K+L}$	K^*	L^*	$\frac{C(N;K^*,L^*)}{K+L}$
6	3	9	870,22	3	9	870,22
7	2	10	917,25	2	10	917,25
8	1	10	954,77	1	10	954,77
9	1	10	982,89	0	10	974,72
10	1	10	1.020,99	0	10	974,72

Observando a Tabela 10 acima percebe-se que nos casos em que K^* é maior que 1 na formulação original, o resultado é o mesmo na formulação adaptada. Já nos casos onde anteriormente o prazo previsto de permanência com o equipamento atual é igual a 1 ($K^* = 1$), mostrou-se que $K^* = 0$ representaria um custo ainda menor. Assim, de acordo com esta tabela, quando $N \geq 9$ anos, a substituição deve ser imediata.

Ainda, sendo $K^* = 0$, o custo médio anual previsto é o mesmo. Isto é razoável, pois estão sendo contabilizados apenas os anos de operação do equipamento novo. Isso não quer

dizer que seja indiferente prolongar, ou não a vida do equipamento antigo: após o primeiro ano em que K^* foi determinado como nulo, a substituição deveria ser imediata. Ocorre anualmente uma perda por atraso que pode ser calculada pela equação 15.

Permitindo que K seja nulo, é possível encontrar a idade a partir da qual o equipamento deve ser substituído imediatamente, ou seja, sua idade-limite ou vida econômica, dentro de um valor de penalidade arbitrado.

Outra possibilidade oferecida quando K pode ser nulo é escolher valores de penalidade por falha crescentes até encontrar aquele valor que determina a substituição imediata do equipamento. Este valor de penalidade permite avaliar se um equipamento deve ser substituído imediatamente.

Para calcular o valor de penalidade por falha que determina a substituição imediata foi criada uma rotina no MatLab, chamada ACHAPEN, que calcula os valores de K^* , L^* e CMA correspondente para um mesmo conjunto de dados variando o valor de penalidade por falha até determinar aquele valor para o qual o K^* é nulo.

A prática em geral não permite fazer uma substituição de forma imediata, pois existem tramitações até a compra e instalação de um novo equipamento — mas é conveniente que o método alerte para a necessidade de substituição imediata.

5.1.3 Avaliar o Efeito um Horizonte Composto de Vários Ciclos de Substituição

CHRISTER & SCARF (1994) consideram o horizonte de 1 ciclo de substituição (até a substituição do equipamento substituto) suficiente para decidir a substituição do equipamento atual — o que eventualmente será, de fato, suficiente.

O ideal porém seria estender o horizonte e prever todos os custos de uma função enquanto ela existir; isso no entanto não é simples e é sujeito a erros. Só se torna interessante, portanto, estender o horizonte quando for verificado que o horizonte curto dá resultados diferentes do que o mais extenso. Esta possibilidade será um pouco explorada a seguir para verificar se é frutífera ou não.

Na equação 20, foi reformulado o cálculo do Custo Presente Descontado (equação 12), para que o horizonte inclua c ciclos de substituição:

$$C(N, c; K, L) = \sum_{i=1}^K [C_o(N+i) + p_o(N+i)] \cdot r^{i-1/2} + [R_n - S_o(N+K)] \cdot r^K$$

Equação 20 - Cálculo do custo presente descontado supondo c ciclos

$$+ \sum_{i=0}^{c-1} r^{K+c \cdot L} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^L [C_n(i) + p_n(i)] \cdot r^{i-1/2} + (R_n - S_n(L)) \cdot r^L \right\}$$

Os dois primeiros termos desta equação calculam o custo do restante da vida do equipamento atual (K anos) (Capítulo 4).

No terceiro termo da equação 20, o primeiro somatório determina o fator multiplicativo que permite supor c ciclos e o segundo somatório (entre chaves) encontra o custo de um ciclo de substituição.

Para calcular o Custo Presente Descontado de vários ciclos (de acordo com a equação 20) as rotinas do MatLab foram rescritas. A formulação do Custo Mínimo Anual também precisou ser adaptada para refletir a alteração — como pode ser visto na equação 21.

$$CMA_c = \frac{C(N, c; K, L)}{K + c \cdot L}$$

Equação 21 - Custo Médio Anual adaptado para a existência de c ciclos

As rotinas do MatLab foram alteradas para permitir essa adaptação:

CPD – Calcula o custo presente descontado ao longo de quantos ciclos seja determinado, de acordo com a equação 20.

MCMA – Monta a matriz de custo médio anual, calculando o valor de cada elemento desta matriz de acordo com a equação 21.

Usando os dados do estudo de caso de Christer e Scarf, considerando o valor de penalidade por falha p igual a £ 370,00 ($p = £ 370,00$), foram calculados os prazos ótimos de substituição para várias idades iniciais do equipamento (N), com horizontes de 1, 2 ou 3 ciclos, conforme apresentado na tabela 11 abaixo:

Tabela 11- Resultados para horizontes de 1, 2 e 3 ciclos com $p = \text{£ } 370,00$

N	1 ciclo			2 ciclos			3 ciclos		
	K^*	L^*	$\frac{C(N,1;K^*,L^*)}{K+L}$	K^*	L^*	$\frac{C(N,2;K^*,L^*)}{K+2L}$	K^*	L^*	$\frac{C(N,3;K^*,L^*)}{K+3L}$
4	5	9	769,42	5	9	640,84	5	10	553,10
5	4	9	819,72	4	9	670,29	4	10	573,78
6	3	9	870,22	3	9	698,06	3	10	592,98
7	2	10	917,25	2	9	722,06	2	10	609,45
8	1	10	954,77	1	9	739,10	1	10	621,31
9	1	10	982,89	1	10	754,89	1	10	631,29
10	1	10	1.020,99	1	10	774,84	1	10	644,81

A tabela 11 mostra a variação do valor do custo médio anual e da vida do substituto devida ao horizonte composto por mais ciclos. Mostra também que os valores do período ótimo de permanência com o equipamento atual K^* não se alteram para os três horizontes calculados. Como a decisão que é tratada nesta dissertação é se o equipamento atual deve ser substituído imediatamente ou não, o resultado mais relevante do método é o valor de K^* , que não foi sensível ao aumento no número de ciclos de substituição.

Esta tabela, portanto, confirma a proposta de Christer e Scarf de ser suficiente supor um horizonte de um ciclo para decidir uma substituição para o estudo de caso apresentado em seu artigo. Permanece a indagação se essa proposta é válida em qualquer problema de substituição.

5.1.4 Cálculo do Custo Anual Distribuído x Cálculo do Custo Médio Anual Dividido

Outra possibilidade a ser analisada concerne o cálculo do custo médio anual. O custo médio anual (equação 13) usado por Christer e Scarf representa a divisão do custo presente descontado (equação 12) para um período de $K+L$ anos, pela duração deste período.

Em engenharia econômica é usual distribuir um custo em parcelas iguais, ao invés de dividi-lo pelo período de tempo que abrange. O fator de distribuição d deve ser multiplicado pelo valor a ser distribuído para determinar o valor da parcela. O fator de distribuição, portanto, é função da duração do período n e do fator de desconto r :

$$d(n,r)=\frac{1-r}{1-r^{n+1}}$$

Equação 22 - Fator de Distribuição

Então o custo anual distribuído é determinado através da multiplicação do custo presente descontado (equação 12) pelo fator de distribuição *d* (equação 22).

$$CAD(K,L)=C(N;K,L)\cdot d(K+L,r)$$

Equação 23 - Custo Anual Distribuído

Usar custos anuais distribuídos ao invés de custos anuais divididos é, obviamente, mais complicado. Usá-los só se justifica, portanto, se os resultados que proporcionam não coincidem com aqueles encontrados usando custos anuais divididos.

As seguintes rotinas do MatLab foram rescritas para gerar uma matriz de custos anuais distribuídos:

MCMAD – Cria a matriz de custo médio anual distribuído seguindo a mesma filosofia da rotina MCMA, citada na seção 5.1.1, mas calculando o valor de cada elemento desta matriz de acordo com a equação 23.

A tabela abaixo mostra os prazos de substituição para o equipamento atual e para o equipamento substituto (*K** e *L**, respectivamente), calculados usando custos médios anuais divididos e custos anuais distribuídos. Foram utilizados os dados do estudo de caso de Christer e Scarf e suposto nulo o valor da penalidade por falha *p*.

Tabela 12 - Resultado sendo o custo total distribuído e dividido, para *p* = 0

<i>N</i>	Custos Divididos			Custos Distribuídos		
	<i>K*</i>	<i>L*</i>	$\frac{C(N;K,L)}{K+L}$	<i>K*</i>	<i>L*</i>	$\frac{C(N;K,L)\cdot(1-r)}{1-r^{K+L+1}}$
4	8	12	489,51	7	12	508,53
5	7	12	517,28	6	12	535,77
6	6	12	546,57	5	12	564,25
7	5	12	577,01	5	12	593,48
8	4	12	607,84	4	12	621,92
9	3	13	637,58	3	12	648,77
10	2	13	663,93	2	12	671,71
11	1	13	683,99	1	12	687,00
12	1	13	700,94	1	12	705,32

Observa-se na tabela 12 que os resultados para o prazo de permanência com o equipamento atual (K^*) são semelhantes em ambas as formas de calcular o custo médio anual. Essa semelhança é maior para equipamentos mais velhos, quando realmente ocorrerão as substituições e o método precisa ser mais exato.

Conclui-se que para determinar o prazo de permanência com o equipamento atual é válida a comparação entre custos médios anuais divididos, como era a proposta de Christer e Scarf.

5.1.5 Modelar a Evolução Tecnológica por um Fator Multiplicativo

Em geral não é possível prever os custos de operação e manutenção de um equipamento novo que nem foi ainda comprado. Por outro lado, é viável prever o ritmo com que a evolução tecnológica reduz esses custos.

Foi tentada então, como apresentado a seguir, uma adaptação no modelo de custos de Christer e Scarf que reduz os custos de operação, manutenção, penalidades e substituição em função de um fator de evolução tecnológica — ou seja, a cada ano que a compra do equipamento novo for adiada, poder-se-á comprar um equipamento com maiores evoluções tecnológicas tal que seus custos serão $e\%$ menores que os custos do equipamento que seria comprado no ano anterior. A implementação desta adaptação, a partir da equação 12, é:

$$C(N; K, L) = \sum_{i=1}^K (C_o(N+i) + p_o(N+i)) \cdot r^{i-1/2} +$$

$$+ r^K \cdot E^{K+N} \left\{ R_n - S_o(N+K) + \sum_{i=1}^L (C_n(i) + p_n(i)) \cdot r^{i-1/2} + (R_n - S_n(L)) \cdot r^L \cdot E^L \right\};$$

$$E = \frac{1}{1+e}$$

Equação 24 - Custo presente descontado com fator multiplicativo de evolução tecnológica

O primeiro termo da equação 24 é idêntico ao primeiro termo da equação 12. Os segundo, terceiro e quarto termos da equação 24 são iguais aos correspondentes da equação 12 fora o fator multiplicativo E . O fator E , na equação 24, reduz os custos de aquisição, operação, manutenção e substituição do equipamento novo em $e\%$ ao ano.

A seguinte rotina do MatLab foi adaptada para embutir o fator de evolução tecnológica conforme a equação 24:

CPD – A rotina CPD foi alterada para calcular o custo presente descontado de acordo com a equação 24, a partir do valor do fator de evolução tecnológica informado.

Usando os dados de Christer e Scarf, foi calculado o prazo de permanência com o equipamento atual K^* , supondo o equipamento atual com várias idades N , para vários fatores de evolução tecnológica (e), como apresentado na tabela abaixo:

Tabela 13 - Variável de Decisão para vários níveis de evolução tecnológica

N	Valores de K^* encontrados para cada e						
	$e = 0\%$	$e = 3\%$	$e = 5\%$	$e = 7\%$	$e = 10\%$	$e = 15\%$	$e = 20\%$
1	7	7	7	7	7	7	6
2	7	6	6	6	6	6	5
3	6	6	5	5	5	5	4
4	5	5	5	4	4	4	3
5	4	4	4	3	3	3	2
6	3	3	3	2	2	1	1
7	2	2	2	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1

Observa-se na tabela 13 que os prazos de permanência com o equipamento atual K^* não foram muito afetados pela inclusão do fator de evolução tecnológica. Isto decorre da relação de benefício (atrasando a substituição é possível usufruir de maiores vantagens depois, e substituindo logo é possível usufruir das vantagens antes) que implica a forma de modelamento proposta para a evolução tecnológica.

A evolução tecnológica é um fator decisivo e de grande importância nas decisões de substituição. No entanto, a forma de considerá-la proposta nesta seção não implicou em variações nos resultados. Mais ainda, a evolução tecnológica não é linear nem contínua, como foi modelado por esta adaptação.

Justifica-se portanto, a hipótese de que a comparação entre dados do equipamento atual e dados do equipamento substituto (como fizeram Christer e Scarf) seja uma melhor política para considerar os efeitos da evolução tecnológica.

5.1.6 Calcular a Perda por Atraso na Substituição pela Diferença entre o Custo Médio com Atraso e o Custo Médio Ótimo

O método de Christer e Scarf propõe uma formulação para calcular a perda financeira referente à substituição do equipamento atual passado o prazo ótimo de permanência K^* . Ou seja, a perda devida ao atraso de uma substituição (equação 15).

A equação 15 calcula a perda financeira AT nos próximos K^*+k+L^* anos devido a um tempo contado de atraso na substituição igual a k anos.

A perda por adiantar uma substituição não está incluída na equação 15. E, além disso, as perdas calculadas AT não se referem ao mesmo período (K^*+k+L^* anos) quando os atrasos k variam. Não sendo coerentes, portanto, para comparação.

A equação 15 mostra que o custo presente descontado (CPD – equação 12) para o período com atraso de k anos é: $C(N; K^*+k, L^*)$. Este valor de CPD não corresponde necessariamente ao menor custo médio anual estando definido a permanência com o equipamento atual em $K^* + k$ anos. O período de permanência com o equipamento substituído L deve ser recalculado para representar o número de anos correspondente ao custo mínimo estando fixa a permanência com o equipamento antigo ($K^* + k$).

A proposta desta dissertação é que seja calculada a perda anual por atrasar ou adiantar (desviar) o instante de substituição em relação ao prazo de substituição correspondente ao custo médio mínimo. Este cálculo corresponde à diferença entre o custo médio com atraso e o custo médio ótimo:

$$AT_{anual} = \frac{C(N; K^*+k, L^{**})}{K^*+k+L^{**}} - \frac{C(N; K^*, L^*)}{K^*+L^*} \quad \text{Equação 25 - Perda Anual por desviar o instante de substituição}$$

Para ilustrar o uso da equação 25 seguem os exercícios adiante.

Usando a Tabela 9, onde $K^* = 6$ anos e $L^* = 12$ anos e o CMA mínimo correspondente é de £ 546,57, supondo um atraso de 1 ano, $K^* + 1 = 7$ anos. Busca-se o valor de L^{**} que corresponde ao menor CMA (estando fixo o valor de K em 7 anos), encontrando $L^{**} = 12$ anos. Para o par (7, 12) o CMA é igual a £ 554,36. Conforme a equação 25, a perda anual

por este atraso de 1 ano é de £ 7,79 por ano para os próximos 19 anos ($K^* + 1 + L^{**} = 6 + 1 + 12 = 19$).

Usando os dados de Christer e Scarf (supondo $p = £ 370$), o ideal é que um ventilador de 8 anos seja substituído em 2 anos, e seu substituto após outros 10 anos — a um custo de £ 917,25.

Se a substituição somente for feita em 3 anos, o custo mínimo para $K = 3$ será £ 923,64, para $L = 10$. A perda seria de £ 6,39 por ano para um prazo de 12 anos ($K^* + L^*$) — ou seja, £ 76,68. Isto corresponde a 3% de uma máquina nova, percentual suficientemente pequeno para justificar o atraso de um ano na substituição, levando em conta fatores adicionais que não foram incluídos na metodologia.

5.1.7 Contabilizar a Aquisição do Equipamento Atual em um Período de Depreciação \times Contabilizar a Aquisição do Equipamento Atual em Parcela Única

No método proposto por Christer e Scarf todos os custos passados são considerados perdidos e não são mais incluídos no custeio para o futuro. Mesmo que o equipamento tenha apenas um ano de uso, todo o investimento em sua compra é tido como passado.

Nesta adaptação é suposto que o investimento em um novo equipamento é pago em parcelas, durante um período de depreciação. Este não corresponde ao período fiscal de depreciação contábil, mas a um período hipotético que visa atender a finalidade desta adaptação (evitar substituições prematuras).

A duração do período de depreciação é arbitrária e depende de condições locais, como, por exemplo, volume de atendimentos, lucratividade do serviço e ritmo de evolução da tecnologia. Este período deve ser menor que a vida econômica prevista, para que o equipamento esteja depreciado ao aproximar-se da época de ser substituído.

Quem quiser substituir um equipamento durante seu período de depreciação terá que pagar as prestações restantes do equipamento antigo além de começar a pagar o novo. Para que a depreciação seja considerada da forma desejada, basta acrescentar o valor das parcelas

de depreciação que não tenham sido pagas até instante em que o equipamento é substituído ao custo presente descontado.

Segue a definição de $C_D(N, D ; K, L)$ — custo presente descontado incluindo um período de depreciação do valor do equipamento atual — onde D é o período de depreciação arbitrado:

$$C_D(N,D;K,L)=C(N;K,L)+\begin{cases} \frac{R_o}{D} \cdot (D-(N+K)), & \text{se } N+K < D, \\ 0, & \text{se } N+K \geq D \end{cases}$$

Equação 26 - Custo presente descontado adaptado para considerar um período de depreciação D

A seguinte função do MatLab foi adaptada para calcular o custo presente descontado, de acordo com a equação 26.

CPD – Calcula o custo presente descontado de acordo com a equação 26, a partir do prazo de depreciação D definido.

Seguindo os dados de Christer e Scarf para uma ventilador com 3 anos de uso e sendo o valor de penalidade por falha p igual a £ 370,00, verifica-se que o valor de L^* , correspondente ao menor custo, é de 10 anos.

A tabela 14 abaixo apresenta o valor do custo médio anual supondo um período de depreciação D igual a 7 anos ($D = 7$ anos) e sem período de depreciação ($D = 0$ anos). Sendo a idade do equipamento atual igual a 3 anos ($N = 3$ anos), para diversos prazos de permanência com o equipamento atual (K).

Tabela 14 - Custo médio para $N = 3, L^* = 10, p = \text{£ } 370$, com depreciação (D) de 7 anos e sem depreciação

K	$\frac{C_D(3,D;K,10)}{K + 10}$	
	$D = 0$	$D = 7$
1	892,95	998,14
2	830,08	894,37
3	783,21	812,88
4	750,65	750,65
5	731,72	731,72
6	726,53	726,53
7	735,96	735,96
8	761,67	761,67
9	806,22	806,22

A tabela 14 mostra que o prazo ideal para a substituição (K^*) é o mesmo para ambos prazos de depreciação ($K^* = 6$), correspondendo a um custo médio de £ 726,53.

Como esperado, os prazos ótimos e os custos por período correspondentes não mudaram, mas o custo para fazer substituição de equipamentos ainda em fase de depreciação ficou bem mais elevado.

Na ausência de depreciação, se a substituição for adiantada e feita em 2 anos, por exemplo, o custo médio será de £ 830,08 , correspondendo a um custo adicional por ano de £ 103,55. Considerando a depreciação em 7 anos, a perda é ainda maior: £ 167,84 por ano.

Este último valor é mais realista e deve ser considerado nas tomadas de decisão. Quem quiser fazer uma substituição de um equipamento muito cedo, deve calcular os custos da forma descrita nesta seção (5.1.7), para saber as consequências financeiras reais de tomar essa decisão.

5.2 Propostas de Adaptações na Forma na Análise de Dados

Seguem algumas mudanças na forma como foram analisados os dados no estudo de Christer e Scarf. Os testes foram baseados nos dados e nas condições do artigo original.

As adaptações propostas foram testadas quanto a mudanças que provocam nos resultados e quanto à facilidade de implementação. Algumas destas propostas de adaptação serão aplicadas no estudo de caso local (Capítulo 6).

5.2.1 Supor o Custo da Manutenção Preventiva (MP) Nulo

O custo anual de manutenção preventiva na pesquisa de Christer e Scarf é constante, tanto para o equipamento atual como para seu substituto. Portanto este custo não terá influência na decisão, já que é invariável para qualquer das opções possíveis.

Usando as mesmas rotinas do MatLab para calcular os prazos de substituição — desprezando o custo de MP — obtém-se a tabela 15:

Tabela 15 - Efeito de desprezar o custo de MP sobre os resultados

N	MP = £180		MP = 0	
	K*	$C(N;K,L)/K+L$	K*	$C(N;K,L)/K+L$
4	8	489,51	7	353,26
5	7	517,28	6	379,86
6	6	546,57	6	408,01
7	5	577,01	5	436,51
8	4	607,84	4	465,38
9	3	637,58	3	493,30
10	2	663,93	2	518,09
11	1	683,99	1	536,10
12	1	700,94	1	554,36

A tabela 15 mostra que os prazos de permanência com o equipamento atual são basicamente os mesmos quando se considera a manutenção preventiva e quando esta é ignorada. A tabela não mostra total coincidência dos resultados, talvez devido a aproximações feitas nas contas — já que se supõe sempre períodos inteiros. Como esperado, desconsiderando a MP os custos médios ficam menores.

Os custos de MP, caso sejam constantes ao longo da vida dos equipamentos e de seus substitutos, indicam a ausência de evolução tecnológica e de deterioração; e como se observou na tabela 15 este item de custo não afeta a decisão de substituição. Portanto não precisa entrar no custeio para decidir substituições. Da mesma forma, quaisquer outros itens de custo que sejam constantes em todo o horizonte previsto não influenciarão na decisão, logo não há razão para estimá-los.

5.2.2 Considerar um Fator de Penalidade para a Idade do Equipamento

A penalidade é o componente de custo que engloba fatores subjetivos que representam custos — mas sua quantificação é difícil. Christer e Scarf consideram apenas um componente de penalidade, diretamente proporcional ao número de falhas no período.

Um equipamento que não quebra muito, entretanto, pode provocar inconvenientes quando envelhece, como ruídos, pequenos defeitos intermitentes, aparência antiquada, etc.. Esse tipo de problema dificilmente chega a ser considerado como falha e consertado, por isso não aparece como custo de manutenção, nem de nenhum outro tipo. Para contabilizar esse tipo de custo, é sugerida uma penalidade linearmente crescente com a idade.

Seguindo a nomenclatura de Christer e Scarf, o valor da penalidade em função da idade do equipamento é calculada pela equação 17. A adaptação propõe que esta equação seja rescrita da seguinte forma:

$$p_x(i) = p_1 \cdot \mu(i) + p_2 \cdot i \quad \text{Equação 27 - Penalidade anual incluindo um fator referente à idade do equipamento}$$

Onde, $p_x(i)$ – valor total de penalidades cobradas de um equipamento x em seu i -ésimo ano de operação.

p_1 – valor da penalidade por falha.

p_2 – taxa anual de aumento do valor de penalidade por idade.

A equação 27 expressa o valor previsto para pagamento de penalidade a cada ano de operação para um aparelho de idade i . O primeiro termo corresponde ao valor pago por penalidades sobre falhas no i -ésimo ano de operação conforme a equação 17; o segundo termo corresponde à penalidade cobrada pela idade do aparelho.

Por exemplo, sendo $p_2 = \text{R\$ } 20,00$ e a idade do equipamento igual a 5 anos ($i = 5$ anos), este segundo termo corresponde a:

$$p_2 \cdot i = 20 \cdot 5 = \text{R\$ } 100,00$$

Ou seja, neste exemplo hipotético, o simples fato do equipamento ter 5 anos de uso já implicaria em lançar uma penalidade em seu custeio no valor de 100 reais.

Como o valor de p_2 não é conhecido antecipadamente, ele pode ser arbitrado em vários valores, para possibilitar o exame da sensibilidade dos resultados do método a este novo parâmetro (valor de p_2).

Usando as mesmas rotinas do MatLab, foi calculado o prazo de substituição dos ventiladores do estudo de caso de Christer e Scarf, levando em conta os dois componentes de penalidade dessa adaptação.

A tabela 16 apresenta os valores de p_2 que forçam a decisão de substituir imediatamente um equipamento, supondo os valores da idade deste equipamento iguais a 4, 6 e 8 anos ($N = 4$, $N = 6$ e $N = 8$) e o valor da penalidade por falha p_1 igual a 0, 185 e 370 libras esterlinas ($p_1 = 0$, $p_1 = \text{£ } 185,00$ e $p_1 = \text{£ } 370,00$).

Tabela 16 - Valores da taxa anual de aumento (p_2) da penalidade por idade que forçam a substituição imediata dos equipamentos (£)

N	Custo de penalidade por falha (p_1) em £		
	0	185	370
4	640	620	610
6	300	270	240
8	160	110	60

A tabela 16 mostra que o valor da taxa anual de aumento (p_2) da penalidade por idade que força a decisão de substituição imediata de equipamentos mais novos (4 anos), é muito grande; portanto não é razoável considerá-lo nestes casos.

A tabela 16 foi criada a partir de dados de um caso particular, fornecidos por CHRISTER & SCARF (1994); como os valores de p_2 estimados a partir destes dados se mostraram excessivamente elevados, muito acima do que seria razoável prever, esta adaptação não foi adotada para a aplicação prática que será apresentada no próximo capítulo (Capítulo 6).

5.3 Comentário

Inúmeras adaptações podem ser testadas com base no método de Christer e Scarf, possibilitando melhor conhecimento das variáveis envolvidas na decisão de substituição e de seu comportamento. Algumas delas foram ilustradas e comentadas nessa seção, sem pretender esgotar o leque de possibilidades aberto por este método.

O próximo capítulo versará sobre a aplicação prática do método à realidade local, através do estudo de dados obtidos CAISM/UNICAMP. Serão usadas as adaptações apresentadas nesta seção se que mostraram úteis na ampliação do método original:

- Encontrar a Opção de Menor Custo por Computador (Não Graficamente)
- Permitir a Substituição Imediata do Equipamento Atual
- Calcular a Perda por Atraso na Substituição pela Diferença entre o Custo Médio com Atraso e o Custo Médio Ótimo

- Contabilizar a Aquisição do Equipamento Atual em um Período de Depreciação x
Contabilizar a Aquisição do Equipamento Atual em Parcela Única
- Supor o Custo da Manutenção Preventiva (MP) Nulo

Capítulo 6 Aplicação

Este capítulo descreve a aplicação do método econômico na decisão de substituição de equipamentos médicos em uma instituição de atendimento de saúde brasileira. Isto permite avaliar: a viabilidade de aplicação desse método em outra realidade, a legitimidade dos procedimentos para a aplicação, o tipo de resultado que pode ser obtido, além de identificar dados ou informações que, estando disponíveis, facilitam a aplicação.

O local escolhido para o estudo foi o Centro de Atendimento Integral à Saúde da Mulher (CAISM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Este Centro do Setor de Saúde da Universidade é responsável pelas atividades de ginecologia, obstetrícia, maternidade, neonatologia, oncologia e outras especialidades correlatas. A proximidade e a facilidade de acesso ao pessoal deste Centro determinaram sua escolha.

A manutenção dos equipamentos do CAISM estão a cargo do Centro de Engenharia Biomédica (CEB) da UNICAMP, que controla e encaminha o reparo de qualquer falha dos equipamentos — mesmo que feito por terceiros. O CEB colocou à disposição seus bancos de dados sobre manutenção de equipamentos.

A aplicação foi realizada sobre ventiladores pulmonares usados na Unidade de Terapia Intensiva Neonatal (UTIN). Estes equipamentos têm participação fundamental na manutenção da vida fragilizada de crianças recém nascidas.

Os ventiladores foram escolhidos devido à existência de dados suficientes sobre eles, pela importância de sua função e pela semelhança com o exemplo apresentado por Christer e Scarf.

Existem na UTIN ventiladores SECHRIST (modelo IV-100B) que estão em operação normal com idade média de 7 anos. Mais recentemente foram comprados novos ventiladores da marca INTERMED (modelo INTER-3).

O objetivo da aplicação é definir se os ventiladores SECHRIST ainda em operação devem ser substituídos por ventiladores INTERMED INTER-3 agora ou posteriormente.

6.1 Parâmetros

Inicialmente é explicado como foram determinados os diversos parâmetros específicos da questão em foco para, em seguida, apresentar os resultados obtidos com a utilização do método de Christer e Scarf modificado.

6.1.1 Fator de Desconto

O fator de desconto (r) permite considerar o efeito econômico da passagem do tempo sobre os valores. Como o estudo foi feito em uma instituição pública, o cálculo deste fator foi referido à remuneração da caderneta de poupança. As cadernetas de poupança recebem, em princípio, 6,5% anuais a título de juros e mais a correção monetária, que compensa as perdas pela inflação. Isto torna lícito considerá-la nula.

Da fórmula $r = (1 + j)/(1 + i)$ (equação 11), sendo $j = 0$ e $i = 0,065$ advém que:

$$r = \frac{1}{1 + 0,065} = 0,94$$

6.1.2 Custo de Aquisição

O ventilador Inter-3 da Intermed é o substituto definido para os ventiladores Sechrist. Para decidir a substituição só é necessário conhecer o custo de aquisição das unidades que serão compradas. A própria fabricante, Intermed, informou, em 13/07/98:

Ventilador Intermed Inter-3 — Custo de aquisição: R\$ 8.381,10

Para efeito de comparação, vale informar que o custo de aquisição do ventilador Sechrist IV-100B, comprado em um período de inflação elevada, no dia 14/10/92, foi em cruzeiros novos: CN\$ 40.991.852,34

Neste dia o dólar americano valia: 1 US\$ = CN\$ 7.718,10 (14/10/92)

Logo o custo em dólares deste aparelho foi: US\$ 5.628,00

Esse valor transposto para reais em 13/07/98 (1 US\$ = R\$ 1,21) equivale a R\$ 6.809,88

6.1.3 Custo de Manutenção

Os valores médios cobrados pelas empresas que fazem a manutenção do ventilador Sechrist IV-100B oscila entre R\$ 286,00 e R\$532,00 em 26/06/98.

Daí é possível calcular o valor médio de custo de conserto (C_o):

$$C_o = \frac{286,00 + 532,00}{2} = R\$409,00$$

A manutenção dos ventiladores Inter-3 costuma ser feita pela própria Intermed que informou que o custo médio do reparo de uma falha destes ventiladores é de R\$ 500,00.

6.1.4 Tabela de Falhas

O comportamento provável das falhas dos equipamentos foi encontrado a partir da análise dos dados existentes nos bancos de dados de manutenção do CEB/UNICAMP.

A informação necessária estava em estava em dois arquivos: o cadastro de equipamentos que recebem manutenção do CEB, e o índice de todas as ordens de serviço (OS) sobre esses equipamentos.

O cadastro de equipamentos possui campos de tipo de equipamento, fabricante, modelo, número de série, data de aquisição, local de operação e um número de identificação chamado Patrimônio Interno (PI), que identifica o equipamento em todos os outros bancos de dados da manutenção.

Cada OS contém: o PI do equipamento defeituoso, a data da ocorrência, uma descrição breve do defeito, o técnico responsável pelo serviço e o tipo de serviço a ser realizado: manutenção corretiva, manutenção preventiva, instalação e outros serviços que não estão relacionados a um determinado equipamento.

A partir dos PIs dos ventiladores e de suas respectivas OSs e sabendo a data em que cada aparelho entrou em operação foi possível montar uma tabela com o número de falhas em cada ano de operação dos equipamentos.

Nem todas OSs referidas aos equipamentos correspondiam a falhas, algumas eram manutenções preventivas ou consertos frutos de acidentes. Foram contadas como falhas somente aquelas que foram classificadas como manutenção corretiva e revisão por suspeita de defeito.

As tabela 17 e 18 apresentam o número de falhas para cada ano de operação dos equipamentos estudados. A primeira coluna dessas tabelas corresponde ao PI de cada exemplar e a segunda mostra a data em que esse equipamento foi comprado. As demais colunas apresentam o número de falhas registradas durante cada ano de operação, contados a partir da data de compra.

Tabela 17 - Histórico de Falhas dos Ventiladores Neonatais Sechrist IV-100B

VENTILADOR - SECHRIST - IV-100B								
PI	DATA	Falhas no # Ano de Operação						
		1	2	3	4	5	6	7
27/07293	12/06/91	0	0	4	6	5	4	4
27/07294	12/06/91	1	2	4	4	3	2	6
27/07295	12/06/91	0	0	5	4	2	2	5
27/08426	14/10/92	1	5	11	7	9	3	-
27/08427	14/10/92	2	2	6	1	4	2	-
27/08428	14/10/92	1	3	0	5	5	5	-

Nesta tabela as três primeiras linha correspondem a ventiladores Sechrist comprados em 1991 e que estão em seu sétimo ano de operação. As três últimas linhas correspondem a ventiladores Sechrist comprados em 1992 e que ainda estão em seu sexto ano de operação.

Tabela 18 - Histórico de Falhas dos Ventiladores Neonatais Intermed Inter-3

VENTILADOR – INTERMED - INTER-3				
PI	DATA	Falhas no # Ano de Operação		
		1	2	3
27/09997	21/08/95	7	10	4
27/09998	21/08/95	1	4	3
27/09999	21/08/95	6	4	6
27/10000	21/08/95	8	6	7
27/10001	21/08/95	4	6	6

Essas tabelas apresentam um histórico que permite acompanhar como se comportou cada unidade ao longo dos anos de sua operação.

Os dados das tabelas acima se estendem até a data de 15/06/98. Por isso, por exemplo, o sexto ano de operação de uma unidade comprada em 14/10/92 não corresponde a um período de 365 dias. Caso seja necessário, uma extrapolação pode fornecer o valor esperado para o período inteiro.

As informações obtidas junto ao pessoal de engenharia do CAISM permitem dizer que todas as unidades estudadas operam no mesmo local, sob as mesmas condições e a mesma manutenção.

Todos os ventiladores são usados continuamente, só parando quando falham. Portanto não pode haver um sistema de preferência para sua utilização, que foi considerada uniforme.

6.1.5 Comportamento Esperado de Falhas

Para aplicar o método de substituição proposto por Christer e Scarf é necessário prever o número de falhas que ocorrerão a cada ano de operação do equipamento. Essa é uma forma simples e objetiva de prever os custos com sua manutenção.

Uma análise estatística dos históricos de falhas apresentados na seção anterior permite obter curvas do número de falhas esperado. Estas curvas fornecem o comportamento médio do grupo de equipamentos de amostra e permite extrapolar o comportamento futuro. Como já foi dito, o grupo pôde ser estudado conjuntamente por operar em condições semelhantes.

Um modelo de regressão foi ajustado, com o procedimento GENMOD do sistema SAS... (1990). O modelo ajustado empregou um erro com distribuição de Poisson — apropriado para o número de ocorrência das falhas — e a função de ligação logaritmo dentro do esquema de modelo linear generalizado NELDER & WEDDERBURN (1972).

O ajuste revelou boa aderência aos dados e resultou nas seguintes equações paramétricas para descrever o comportamento das falhas anuais ($\mu(t)$):

Ventilador Infantil Sechrist IV-100B: $\ln \mu_0(t) = 0,62 + 0,15 \cdot \text{idade}$ [falhas/ano]

Ventilador Infantil Intermed Inter-3: $\ln \mu_n(t) = 1,45 + 0,18 \cdot idade$ [falhas/ano]

As curvas apresentadas acima representam o comportamento médio da amostra disponível, apesar da grande dispersão dos dados.

6.1.6 Valor de Revenda

Em instituições públicas os equipamentos usualmente são operados até estarem próximas da sucata. A escassez de recursos, a dificuldade de desativar e revender, ou mesmo de transferir um equipamento para um local de menor risco (recebendo alguma contrapartida) é enorme. Por isso o valor de revenda dos equipamentos foi considerado nulo.

6.1.7 Penalidades

Penalidades são custos virtuais referentes, por exemplo, a danos físicos a recém-nascidos e falta de leitos para tratamento. Fica, portanto, clara a importância do estudo deste parâmetro.

Não foi possível fazer uma estimativa prévia do valor da penalidade por falha dos ventiladores pulmonares. Faltava informação suficiente dos custos adicionais deste evento, e não era possível transformar as consequências em valor. A opção que permanece é calcular o valor de penalidade suficiente para mudar uma decisão, o que será apresentado em conjunto com os resultados (seção 5.2).

6.1.8 Garantia

Os ventiladores Intermed Inter-3 recebem um ano de garantia a partir de sua instalação. Nesse período o custo de conserto é nulo, mas as penalidades não deixam de incidir sobre o equipamento durante garantia.

Os valores usados nesta aplicação serão:

Tabela 19 - Valores Usados na Aplicação

$r = 0,94$	$S_n = 0$
$R_n = \text{R\$ } 8.831,10$	$S_o = 0$
$R_o = \text{US\$ } 5.628,00 = \text{R\$ } 6.809,88$	$p_n(t) = P_n \cdot \mu_n(t)$
$c_n(t) = C_n \cdot \mu_n(t)$	$p_o(t) = P_o \cdot \mu_o(t)$
$c_o(t) = C_o \cdot \mu_o(t)$	$P_n = ?$
$C_n = \text{R\$ } 0 \text{ (garantia) / R\$ } 500,00 \text{ (depois)}$	$P_o = ?$
$C_o = \text{R\$ } 409,00$	$\ln \mu_o(t) = 0,62 + 0,15 \cdot t$
	$\ln \mu_n(t) = 1,45 + 0,18 \cdot t$

Na tabela 19 alguns valores estão expressos em reais mas não foram encontrados na mesma data. Isso, entretanto, não representa problema, em vista da estabilidade monetária ora existente e da relativa proximidade das datas de determinação dos valores.

Esta seção conclui com um sumário da metodologia utilizada na aplicação local. Esta aplicação seguiu fundamentalmente os mesmos passo da metodologia proposta por Christer e Scarf, sendo esta acrescida de alguns procedimentos testados nas adaptações do Capítulo 5.

Segue a descrição da metodologia adaptada para a aplicação no CAISM e comparada à metodologia original de Christer e Scarf (página 58):

- 1) Lançando mão da adaptação intitulada Encontrar a Opção de Menor Custo por Computador (Não Graficamente) (página 65), foi possível prescindir do método gráfico e obter do computador o par K^* e L^* , ou seja o par (K, L) que minimiza o CMA.

Este procedimento engloba os passos 1, 2, e 3 da metodologia original de Christer e Scarf.

- 2) Os resultados fornecidos pela aplicação do método

- a) O equipamento atual deve ser substituído em K^* anos

b) Atrasar ou adiantar essa substituição implicará em perda anual calculada pela adaptação intitulada Calcular a Perda por Atraso na Substituição pela Diferença entre o Custo Médio com Atraso e o Custo Médio Ótimo (página 76), e não pela equação 15.

6.2 Resultados

Diversas rotinas do pacote `MatLab`, criadas para testar as adaptações do método de Christer e Scarf (0), foram reelaboradas para se adequar a esta aplicação.

Primeiramente se calcula em quantos anos se deve substituir um ventilador Sechrist de determinada idade por um Intermed.

Usando as rotinas criadas para o `MatLab` descritas no capítulo 5, o período adicional de permanência com o equipamento atual ótimo (K^*), o período de permanência com o equipamento substituto ótimo (L^*) e o custo médio anual (CMA) correspondente a esses períodos foram calculados supondo o equipamento atual com idades variando de 1 a 13 anos. Resulta a tabela seguinte, correspondente à tabela 5 apresentada por Christer e Scarf.

Tabela 20 - Período de Permanência Ótimo para vários N sendo $p = 0$ (períodos em anos)

N	K^*	L^*	CMA
5	10	7	2.823,86
6	9	8	3.069,72
7	8	8	3.329,70
8	7	8	3.604,81
9	6	8	3.892,76
10	5	8	4.189,45
11	4	8	4.487,99

Na elaboração da Tabela 20, para cada linha é construída uma matriz de custos médios anuais, usando a rotina `MCMA`, para os vários valores de K e L possíveis, para a idade N correspondente. A rotina `MINMAT` determina os valores K^* , L^* e CMA que completam as informações da linha. Este procedimento está descrito na seção 5.1.1.

Para exemplificar segue a Tabela 21 abaixo que representa parte da matriz de custos médios anuais para a idade atual igual a 7 anos ($N = 7$ anos). Nesta tabela observa-se o ponto de menor valor correspondendo ao par (6 ,8), de acordo com o resultado apresentado anteriormente na Tabela 20.

Tabela 21 - Matriz de Custos Médios Anuais para $N = 7$ anos

K	L					
	6	7	8	9	10	11
1	3.733,99	3.747,69	3.808,15	3.909,05	4.046,65	4.218,97
2	3.525,99	3.536,24	3.587,22	3.674,19	3.794,32	3.946,14
3	3.390,88	3.393,34	3.432,24	3.503,85	3.605,91	3.737,24
4	3.312,22	3.304,76	3.330,50	3.386,38	3.470,52	3.581,95
5	3.278,87	3.260,54	3.272,86	3.313,21	3.380,00	3.472,39
6	3.283,07	3.253,59	3.252,65	3.277,99	3.328,20	3.402,52
7	3.319,35	3.278,80	3.265,00	3.275,97	3.310,43	3.367,71
8	3.383,84	3.332,45	3.306,29	3.303,58	3.323,15	3.364,36
9	3.473,79	3.411,90	3.373,89	3.358,17	3.363,65	3.389,72
10	3.587,30	3.515,24	3.465,90	3.437,80	3.429,94	3.441,73

Calcula-se em seguida a sensibilidade dos períodos ótimos de permanência ao valor de penalidade por falha. Para esta análise a idade dos ventiladores Sechrist foi colocada igual a 7 anos ($N = 7$ anos) que corresponde à idade atual dos exemplares mais antigos destes ventiladores em operação no CAISM. O valor de penalidade por falha é suposto igual para o equipamento antigo e para seu substituto, ou seja, $p_o = p_n = p$, pois as consequências de uma falha de um ventilador Sechrist não devem ser diferentes das consequências de uma falha de um ventilador Intermed.

Utilizando novamente os dados da Tabela 19 obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela 22 - Sensibilidade ao Valor de Penalidade por Falha dos Períodos Ótimos de Permanência de Ventiladores Neonatais com 7 anos de uso. (períodos em anos)

p	K^*	L^*	CMA
0,00	8	8	3.329,66
100,00	8	8	3.981,78
200,00	7	7	4.616,02
300,00	7	7	5.246,95
400,00	6	6	5.873,18
500,00	6	6	6.484,37

A Tabela 22 corresponde à Tabela 6 de Christer e Scarf, apresentando apenas uma única idade do equipamento atual e acrescida do custo médio anual (quarta coluna) correspondente a cada valor de penalidade suposto. Esta tabela mostra que os ventiladores Sechrist, mesmo com valores altos de penalidade, ainda devem ser usados por vários anos. Portanto, não devem ser substituídos imediatamente.

Usando a rotina do MatLab ACHAPEN, descrita no final da seção 5.1.2 foi determinado o valor de penalidade por falha que indicava a necessidade de substituir imediatamente o ventilador Sechrist. O valor de penalidade por falha encontrado é de R\$ 18.617,00. Ou seja, a substituição imediata de um ventilador Sechrist somente é justificada se for razoável (não for grande demais) um valor de penalidade por falha maior ou igual a R\$ 18.617,00 ($K^* = 0 \Leftrightarrow p \geq 18.617,00$).

No entanto, tal valor de penalidade indica que a vida prevista para o ventilador substituído também é nula. Isso pode ser interpretado como significando que o risco do serviço é grande demais para continuar a ser oferecido. Além disso, tal valor de penalidade é mais que o dobro do valor de uma unidade nova. Portanto não é de se esperar que o valor de penalidade possa ser tão elevado, confirmando que os ventiladores Sechrist, mesmo os mais antigos não devem ser substituídos imediatamente.

6.3 Comentários e sugestões

Analisando os resultados contidos na tabela 20 observa-se que a vida prevista para um ventilador Sechrist IV-100B é de 13 anos (1ª linha), inicialmente. Observa-se Também que se um exemplar desse equipamento tem 7 anos de uso a previsão é que ele deve ser usado outros 8 anos antes de ser substituído.

Olhando agora a tabela 21, observa-se que, independentemente do valor de penalidade, os ventiladores Sechrist mais antigos em operação no CAISM não deverão ser substituídos proximamente. Os capitais disponíveis, portanto, devem ser aplicados em equipamentos que precisem de substituição mais urgente ou em novas aquisições.

Uma preocupação que surge é a possível existência de erros nos dados utilizados. Primeiro, todos os dados utilizados na aplicação eram absolutamente razoáveis e vinham de fon-

tes competentes. Mesmo assim não deixam de estar sujeitos a imprecisões. Devido às características de robustez do método, apresentadas por CHRISTER & SCARF (1994) e confirmadas neste capítulo, seus resultados não são sensíveis a pequenos erros. Também olhando os resultados, que prevêm ainda vários anos de uso para os aparelhos cuja substituição era questionada, não há razão para crer que estejam incorretos. Em uma outra aplicação em que os prazos para substituição sejam muito pequenos, os dados devem ser revistos e talvez ser feita uma análise de sensibilidade para cada parâmetro. (CHRISTER & WALLER, 1987a).

Ficou claro na elaboração desta aplicação a importância de poder dispor de bancos de dados completos sobre os equipamentos. Para o uso corrente de um método como o que foi aplicado neste capítulo é importante que todas as ocorrências com os equipamentos sejam registradas. Sobre cada ocorrência é preciso saber se foi realmente uma falha do equipamento ou se foi uma reinstalação, reconserto ou um acidente que o atingiu. Também é importante anotar o custo de recuperação de cada falha. Com essas informações é possível obter dados e, conseqüentemente, resultados mais precisos. A sistematização dos bancos de dados também permitirá automatizar a aplicação do método tornando-o ainda mais útil.

Esta aplicação foi desenvolvida exclusivamente com dados que estavam disponíveis no local e mais algumas informações encontradas com fabricantes e prestadores de serviços. Assim o mesmo método pode ser usado em outros locais, mesmo que não exista um controle da manutenção sofisticado.

No exemplo apresentado, o equipamento substituído já estava em uso, havendo dados sobre seu comportamento de falhas.

Finalmente, resta a questão de como relacionar o método econômico (tal como foi estudado) com a pergunta: o equipamento deve ser substituído imediatamente ou não? Os resultados obtidos na UNICAMP foram interpretados tendo em mente esta decisão — substituir (sim ou não) o equipamento alvo.

Assim a informação dada ao tomador de decisão, decorrente do estudo e associada a questões práticas do seu contexto deveria ser: A substituição imediata dos ventiladores Sechrist não é recomendada a princípio, pois estes ventiladores estão com 8 anos de uso e o método recomenda que só sejam substituídos em mais 7 anos.

Entretanto a aplicação do método não incluiu alguns fatores tais como segurança, disponibilidade, ergonomia, condição de manutenção e padronização. Estas considerações confirmam que o método serve apenas de apoio à tomada de decisão e é fundamental que o responsável por essa decisão conheça os fatores associados. Só assim ele poderá, de forma efetiva, se valer do método na hora de definir o curso de ação que de fato será seguido.

Capítulo 7 Discussão e Encerramento

A decisão de substituir equipamentos médicos é complexa, envolvendo grande quantidade de fatores; muitos são subjetivos mas nem por isso deixam de ser reais. O volume e diversidade de fatores que influenciam a decisão de substituição sugere que dificilmente poderá ser feita uma formulação que considere todos ao mesmo tempo.

Apesar da impossibilidade de se criar uma formulação global do problema, este pode ser tratado com razoável abrangência — o que contribui para um enfoque objetivo. Portanto, embora conhecida a limitação dos métodos de decisão existentes, mostra-se válido o uso de tais métodos no apoio à tomada de decisão.

O conhecimento dos fatores pertencentes ao contexto estudado é parte integrante e indispensável na construção de qualquer método de tomada de decisão. Decisões são tomadas por pessoas e os métodos de apoio a essas decisões existem para dar suporte à tomada de decisão. Conhecer os fatores importantes é necessário para o tomador de decisão poder avaliar as virtudes de cada método e optar por um deles. Saber associar experiência pessoal aos resultados do método adotado para apoiar a decisão (substituir agora ou não) também decorre da análise dos fatores, base real de qualquer método de avaliação.

A indústria fabricante de equipamentos médicos tem o interesse permanente de que os equipamentos em operação sejam substituídos, para tanto trabalham com obsolescência planejada. Isto cria no meio clínico um temor de parecer desatualizado por estar trabalhando com equipamentos aquém da tecnologia de ponta. Assim podem surgir pressões pela substituição que transcendem critérios técnicos.

O empírico “Método dos 30%”, muito usado em instituições brasileiras, pode ser usado como uma política indicativa da eventual necessidade de substituir um equipamento. Mas não pode ser considerado como um método para apoiar a tomada de decisão de substituição, pois, tendo em vista a enorme variedade de fatores, não é possível aceitar que o custo de um único conserto seja determinante para substituir um aparelho.

A decisão tratada nesta dissertação limita-se à questão: deve a substituição de um equipamento médico ser imediata ou não? Para isto foram pesquisados na literatura pertinente métodos de decisão de substituição de equipamentos e mais especificamente aqueles dirigidos para equipamentos médicos. Os métodos encontrados puderam ser agrupados em dois tipos, classificados neste trabalho como métodos econômicos e métodos multiparamétricos.

Os Métodos Econômicos relacionam a decisão de substituição às suas conseqüências futuras através de uma medida de valor financeiro, enquanto que os Métodos Multiparamétricos correlacionam a conjuntura presente com outras conjunturas tomadas como referencial, e a partir destas comparações, determinam a decisão a ser tomada. Foi selecionado um artigo representativo de cada tipo de para objetivar e exemplificar seu estudo.

Estes dois tipos de métodos científicos foram apresentados e analisados. Razões de ordem prática conduziram à opção pelo método econômico para dar continuidade ao trabalho. A análise do mesmo foi aprofundada, através do estudo detalhado do artigo representativo; foram então examinadas propostas de adaptações ao método deste artigo e em seguida, o método adaptado foi aplicado em um estudo de caso sobre equipamentos do CAISM/UNICAMP.

O significado dos resultados obtidos no estudo de caso puderam ser comparados aos resultados apresentados no artigo original, conforme os objetivos deste trabalho. Os resultados da aplicação se mostraram válidos e a questão se os equipamentos em estudo deveriam ser substituídos imediatamente ou não, pôde ser discutida e respondida.

O estudo do problema da decisão de substituição de equipamentos médicos é muito amplo e abre perspectivas para vários outros estudos, por exemplo: métodos específicos para determinadas classes de equipamentos, análises de custo-efetividade, sugestão de novos métodos e formas de avaliação das vantagens econômicas decorrentes da própria aplicação destes métodos. O armazenamento e sistematização de dados e informações sobre equipamentos médicos é ferramenta essencial para a evolução destes métodos bem como para a aplicação cada vez mais eficiente dos métodos já conhecidos.

Tanto as adaptações propostas neste trabalho, como a aplicação prática no CAISM/UNICAMP apontam para a necessidade de mais estudos sobre temas correlatos ao deste trabalho, tais como estudos sobre: confiabilidade de equipamentos médicos, comportamento de suas falhas, custos relacionados a um procedimento, a uma falha e à segurança dos

equipamentos médicos; estes estudos certamente facilitarão a aplicação prática dos métodos, e possibilitarão, eventualmente, o desenvolvimento de métodos de decisão de substituição mais sofisticados.

Referências Bibliográficas

- ASCHER, Harold. Basic probabilistic and statistical concepts for maintenance of parts and systems. *IMA Journal of Mathematics Applied Business and Industry*, v.3, p.153-167, 1992.
- BAGAI, Isha. JAIN, Kanchan. Improvement, deterioration and optimal replacement under age-replacement with minimal repair. *IEEE Transactions on Reliability*, v.43, n.1, 1994.
- CAPUANO, M. Technology acquisition strategies for clinical engineering. *Biomedical Instrumentation & Technology*, v.31, n. 4, p.335-357, Jul/Aug 1997
- CHRISTER, A. H. GOODBODY W. Equipment replacement in an unsteady economy. *Journal of the Operational Research Society*, v.31 n.6, p.497-506, 1980.
- CHRISTER, A. H. SCARF, P. A. A robust replacement model with applications to medical equipment. *Journal of the Operational Research Society*, v.45 n.3, p.261-275, 1994.
- CHRISTER A. H. WALLER M. W. Tax-adjusted replacement models. *Journal of the Operational Research Society*, v.38, n.11, p.993-1006, 1987a.
- CHRISTER A. H. WALLER M. W. A descriptive model of capital plant replacement. *Journal of the Operational Research Society*, v.38, n6, p.473-477, 1987b.
- CHRISTER A. H. Determining economic replacement ages of equipment incorporating technological developments. In: OPERATIONAL RESEARCH '87, (G. K. Rand, Ed.) North-Holland, Amsterdam. p.343-354. 1988.
- CLAPHAM, J. C. R., Economic life of equipment. *Operational Research Quarterly*, v8, p.181-190, 1957.
- CLARK, J. T. FORSELL R. Clinical equipment replacement planning. *Biomedical Instrumentation & Technology*, v.24, n.4, p.271-276, 1990.

- DAVIS, Carol E. Managing the replacement cycle of laser inventory. *Journal of Clinical Engineering*, v.17, n.5, p.399-404, 1992.
- DICKERSON, M. L. JACKSON, M. E. Technology management: a perspective on system support, procurement, and replacement planning. *Journal of Clinical Engineering*, v.17, n.2, p.129-136, 1992.
- DRINKWATER, R. W. HASTINGS, N. A. J. An economical replacement Model. *Operational Research Quarterly*, v.18, n.2, p.121-138, 1967.
- ELTON, Edwin J. GRUBER, Martin J. On the optimality of an equal life policy for equipment subject to technology improvement. *Operational Research Quarterly*, v.27, n.1, p.93-99, 1976.
- EILON, S. KING, J. R. HUTCHINSON, D. E. A study on equipment replacement. *Operational Research Quarterly*, v.17, n.1, p.59-71, 1966.
- FENNIGKOH, L. A medical equipment replacement model. *Journal of Clinical Engineering*, v.17, n.1, p.43-47, 1992.
- FLOREZ, Ciriaco Valdez- FELDMAN, Richard M. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics*, v.36, p.419-446, 1989.
- FRASER, Jane M. POSEY, Jack W. A framework for replacement analysis, *European Journal of Operational Research*, v.40, p.43-57, 1989.
- HART, David T. COOK, E. Dean. Upgrade versus replacement: a practical guide to decision making. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, v.31, n.5, p.1136-1139, 1995.
- HASTINGS, N. A. J. Some notes on dynamic programming and replacement. *Operational Research Quarterly*, v.19 n.4, p.453-464, 1968.
- HASTINGS, N. A. J. The repair limit replacement method. *Operational Research Quarterly*, v.20 n.3, p.337-349, 1969.

- HSU, J. S. Equipment replacement policy — a survey. *Production and Inventory Management Journal*, v.29, n.4, p.23-27, 1988.
- JAYABALAN, V. CHAUDHURI, Dipak. Optimal Maintenance and replacement policy for a deteriorating system with increased downtime. *Naval Research Logistics*, v.39, n.1, p.67-78, 1992.
- JELLEN, F. C. (ed.) *Cost and optimization engineering*. New York: Mc Graw Hill Book Company, 1970. 490p.
- LAKE, D. H., MUHLEMANN, A. P., An equipment replacement problem, *Journal of the Operational Research Society*, v.30 n.5, p.405-411, 1979.
- LAMBE, Thomas A. The decision to repair or scrap a machine, *Operational Research Quarterly*, v.25, n.1, p.99-110, 1974.
- LUCE W. BROWN D. The use of technology assessment by hospitals, health maintenance organizations, and third-party payers in the United States. *International Journal of Technological Assessment*, v.11, n.1, p.79-92, 1995
- MANUAL *para materiais excedentes e inservíveis*, Coordenação Geral de Administração - Secretaria Estadual de Saúde/São Paulo, Novembro 1995.
- MIRSHAWKA, V. OLMEDO N. L. *Manutenção – Combate aos custos da não-eficácia – a vez do Brasil*. São Paulo: Makron Books do Brasil Ed., 1993. 373p.
- NELDER, J. A. WEDDERBURN, R. W. M. Generalized linear models. *Journal of Royal Statistical Society, Series A* (135), p.370-384, 1972
- PARK, Kyeung S. Cost limit replacement policy under minimal repair. *Microelectronics and Reliability*, v.23, n.2, p.347-349, 1983.
- PATTON Jr., J. D. *Maintainability and maintenance management*. 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1988. 446p.
- PREINREICH, Gabriel A. D. The economic life of industrial equipment. *Econometrica*, v.8, p.12-44, 1940.

RUSSELL, J. C. Vehicle replacement: a case study in adapting a standard approach for a large organisation, *Journal of the Operational Research Society*, v.33, n.10, p.899-911, 1982.

SAS Institute Inc. (1990): SAS Stat User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. #72JRSS-A 135 370-384 J#Generalized linear models#Nelder, J. A.;Wedderburn, R. W. M.#Probit analysis;Analysis of variance;Contingency table;Exponential family;Quantal response;Weighted least squares####BT94#

WOODMAN, R. C. Viewpoint: an economic replacement model. *Operational Research Quarterly*, v.18 n.4, pp.468-469, 1967.