APLICAÇÃO DE UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTE DE EQUIPAMENTO MÉDICO: UM ESTUDO DE CASO

Humberto de Alencar B. T. Araújo
Universidade Federal de Pernambuco, UFPE
Departamento de Engenharia de Produção
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, PE
betobelem@gmail.com

Cristiano Alexandre V. Cavalcante
Universidade Federal de Pernambuco, UFPE
Departamento de Engenharia de Produção
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, PE
cristiano@ufpe.br

Luiz Paulino do Nascimento Neto
Universidade Federal de Pernambuco, UFPE
Departamento de Engenharia de Produção
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, PE
luizpesca@hotmail.com

RESUMO

A manutenção vem ganhando cada vez mais espaço e importância em qualquer tipo de empresa. Assim, não seria diferente no ambiente hospitalar que além do fator econômico envolvido há também o fator social implicado no fornecimento dos serviços. Um dos fatores que determina a qualidade do serviço fornecido é a disponibilidade dos equipamentos, pois em caso de necessidade da utilização de um aparelho médico e o mesmo não estiver pronto para o uso no Estabelecimento Assistenciais de Saúde (EAS) causará grandes transtornos para o paciente, desde piora do quadro clínico até mesmo o falecimento. Neste contexto, o trabalho tem o intuito de apresentar uma metodologia baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) sustentada por dois critérios importantes: Custo e Tempo Médio entre Falhas Operacionais (TMEFO). Deste modo, o trabalho visa contribuir para EAS a melhoria do fornecimento do serviço mantendo as finanças saudáveis.

PALAVRAS CHAVE. Teoria da Utilidade Multriatributo. Substituição de Componente de Equipamento Médico. Custo e Tempo Médio entre Falhas Operacionais. Apoio a decisão multicritério.

ABSTRACT

Maintenance has been gaining more space and importance in companies of all types. Thus, this also applies to hospitals since in addition to the economic factor involved there is also the social factor implied in the provision of services. One of the factors that determines the quality of the service provided is the availability of equipment, because should there be a need to use medical apparatus device and should it not be ready for use in health care facilities (EAS in Portuguese), this will cause major problems for the patient, which range from hi´/her clinical condition worsening to death. In this context, the article sets out to a methodology based on Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) supported by two important criteria: Cost and Mean Time between Operational Failures (MTOF). Thus, the study aims to help improve the service provision to EAS while maintaining a healthy financial situation.

KEYWORDS. Multi-attribute Utility Theory. Replacement of Components in Hospital Equipment. Cost and Mean Time Between Operational Failures.

1. Introdução

Hoje em dia os Estabelecimentos Assistenciais a Saúde são verdadeiros centros de tecnologia, com equipamentos cada vez mais sofisticados e complexos. Nesta área temos a junção do maior número de tecnologias (ótica, microeletrônica, robótica, informática, radiação, bioquímica, biofísica, etc.) aplicadas para o benefício do ser humano para a melhoria da qualidade de vida, de modo a permitir que o ser humano viva mais, com menor sofrimento e desfrutando plenamente de sua saúde (Antunes et al, 2002).

A fim de alcançar tais objetivos, os avanços na área de tecnologia médica vêm crescendo exponencialmente, o que tem tornado bastante significativo o montante de recursos financeiros caracterizados como despesas hospitalares. Destaca-se, também, que os equipamentos hospitalares apresentam modernidade e avanço tecnológico semelhantes às mais modernas plantas industriais. Tais equipamentos agem sobre o paciente diretamente ou indiretamente, no entanto uma falha ou indisponibilidade do equipamento para diagnóstico, tratamento ou suporte a vida pode ocasionar sérios problemas como a piora no quadro clínico e, em casos extremos, a morte. Manter os EMH sem risco ao paciente e ao mesmo tempo diminuindo os custos operacionais é uma tarefa difícil que exige a existência de um setor de engenharia clínica capaz de tomar decisões que contenham fatores conflitantes. Apesar da grande evolução das ferramentas da Engenharia de Manutenção, elas vêem sendo aplicadas neste tipo de ambiente de maneira incipiente comparada a qualquer indústria ou empresa. Observa-se que não são apenas os engenheiros clínicos que não dão a devida importância ao uso de ferramentas adequadas para suportar o processo de planejamento de manutenção, no meio acadêmico, também, não há muitas pesquisas que trate desta temática no contexto hospitalar, o que pode ser comprovado por pouquíssimos resultados que são encontrados como produto de pesquisas em banco de dados de artigos científicos.

Para termos uma real situação dos hospitais brasileiros, o setor de manutenção hospitalar é considerado um dos setores que apresentam o custo mais elevado, da ordem de 10% do faturamento em instituições particulares. E a média nacional entre todos os segmentos da economia é de 4,39 % (Costa, 2004). A indisponibilidade geral dos equipamentos e sistemas operacionais hospitalares por falta de algum aspecto referente ao gerenciamento de manutenção variam de 30 % a 96 % (Carpio & Flores, 1998 apud Lucatelli, 2002). Diante desse cenário, percebemos a necessidade de utilização de ferramentas que ajudem a enfrentar esse problema. Sabe-se que uma das atividades que influenciam nestes índices é a substituição, normalmente esta decisão de substituir é realizada de maneira subjetiva e sem previsão alguma de quando deverá acontecer. Na literatura há alguns trabalhos relacionados à substituição de equipamento médico (Christer & Scarf, 1994; Dreiss,2008; Clark, 2004; Dondelinger, 2003 e 2004;Taylor, 2005). No entanto, nem todo problema de manutenção é resolvido com a substituição do equipamento inteiro, alguns casos deve-se substituir apenas um componente chave e fundamental para o funcionamento, como é o caso do tubo de raios-X do tomógrafo. Um dos principais problemas que causam grande transtornos a utilização dos tomógrafos é a falha no tubo de raios-X, um detalhamento maior sobre o funcionamento dos tomógrafos é apresentado mais adiante.

Neste artigo propomos um modelo para planejar a substituição de um tubo de raios-X de um tomógrafo, visto que é um equipamento importante, pois gera grande receita, há uma grande demanda para este equipamento, bem como ele é bastante relevante para diagnóstico de doenças complexas.

A definição do período de substituição é baseada em critérios relacionando ao risco e o custo, visto que são dois critérios que neste ambiente são bastante importantes. O critério risco será quantificado pelo atributo tempo médio entre falhas operacionais, pois este descreve a incapacidade de funcionamento ininterrupto do equipamento. A interrupção poderá causar a demora no diagnóstico da doença, por outro lado, dependendo da enfermidade, cada minuto é de extrema importância. Caso um hospital tenha apenas um tomógrafo e este esteja indisponível, o paciente terá que ser deslocado a outro hospital, o que corresponde a outros riscos que o paciente

será submetido. Como alternativa, pode-se utilizar outro tipo de equipamento no mesmo estabelecimento para diagnosticar a doença com menos recurso ou precisão necessária, podendo induzir um erro médico.

Em algumas regiões do país o número de tomógrafos por 100 mil habitantes é menor do que o recomendado pelo Ministério da Saúde, assim uma indisponibilidade do equipamento nestes locais poderá causar grandes transtornos para a população, que além dos riscos que submete a uma população, acarreta conseqüências de insatisfação popular, podendo resultar em desgaste político dos responsáveis pela saúde coletiva. Tendo em vista a complexidade deste aspecto, este não será tratado aqui.

Por fim, o custo levará em consideração a perda da receita decorrente das paradas, bem como os custos inerentes à política de manutenção praticada. Observa-se que os hospitais têm orçamentos bem apertados para a realização de atividades de manutenção, bem como para o investimento em seus equipamentos, nesse sentido, o custo é de extrema importância para a definição do período de substituição do tubo de raios-X.

Sendo assim, o artigo apresenta um estudo de caso. Tendo como pano de fundo o contexto hospitalar e como equipamento objeto de estudo o tubo de raios-X que integra tomógrafo computadorizado. Um modelo multicritério é aplicado para definição de uma política de substituição mais apropriada que não só permite que os conflitos entre os critérios envolvidos sejam tratado, mas, principalmente, leva em consideração as preferências do decisor.

Este artigo está dividido em 4 seções, além da introdução. Na seção 2 discute-se sobre o planejamento da manutenção, na seção 3 aprofunda-se no modelo multicritério para estabelecimento de política de substituição por idade. O estudo de caso é apresentado na seção 4. Finalmente, conclui-se o trabalho apresentando algumas considerações na última seção.

2.Planejamento de Manutenção

O planejamento da manutenção é uma prática tradicional recomendada para a preservação de máquinas, equipamentos e instrumentos, através da preparação dos planos de trabalho e a definição das normas e padrões para a sua condução. Márques (2007) define o plano da manutenção como um conjunto estruturado de tarefas que inclui atividades, procedimentos, recursos e definição do tempo necessário para a realização das tarefas de manutenção. Estas definições explicitam o escopo do planejamento da manutenção:

- O quê deve ser feito;
- Quando deve ser feito;
- Com que ferramentas fazer.

Tanto mais acertadas sejam as respostas a esses três pontos, mais eficientes serão os planejamentos de manutenção que são decorrentes destas questões. Nesse sentido, um efetivo planejamento de manutenção permite que os dirigentes de manutenção atuem no equipamento correto, no momento certo e com as ferramentas adequadas. O sucesso na implementação das atividades de manutenção é diretamente relacionado a um planejamento prévio.

A resposta a estes questionamentos seguirão um ordenamento hierárquico. Sendo assim, inicialmente, deve-se especificar qual (quais) atividade(s) realizar para cada equipamento; posteriormente, defini-se para cada uma das atividades empregadas a cada um dos equipamentos em estudo a sua respectiva periodicidade, e, finalmente, define-se o conjunto de recursos que serão empregados.

A implementação do planejamento de manutenção na prática conduz ao estabelecimento de políticas de manutenção. Política de manutenção corresponde à coordenação das atividades de manutenção às características particulares de cada sistema, bem como aos objetivos que se desejam atingir, quais sejam: a minimização dos custos, dos tempos de parada, a maximização da confiabilidade ou da disponibilidade, etc (Cavalcante, 2005).

A uma política de manutenção, normalmente, associa-se um modelo matemático que, através de uma função de performance, define os níveis de cada ação que deverão ser empregados para otimizar esta função.

Em algumas ocasiões, mais de uma função de performance é utilizada para definir políticas eficientes. Para tais casos, têm-se modelos multicritério de apoio a decisão que tratam as distintas dimensões de escolha como critérios de maximização ou minimização que devem ser levados em conta na definição de uma política de manutenção que esteja mais alinhada a estrutura de preferência do decisor. A presença de múltiplos critérios de decisão se deve a impossibilidade de traduzir todos os aspectos importantes do problema em uma única dimensão (geralmente custo). Particularidades do contexto do problema influenciam nesse processo de tradução. Para o caso específico da manutenção em equipamentos hospitalares, conforme já foi discutida, a indisponibilidade de um equipamento, devido a uma falha, envolve um conjunto de aspectos que não tem uma relação explicita em termos de custo. Por este motivo é bastante pertinente o uso de critérios adicionais para a definição da política de manutenção ideal.

Como anteriormente mencionado, as políticas de manutenção correspondem à coordenação de ações que são empregadas a fim de otimizar uma função de performance. Nesse sentido, tornou-se popular a denominação de uma política de manutenção pelas atividades que estão previstas em sua implementação. É bastante comum encontrar em artigos a conceituação de políticas de inspeção e políticas de substituição para os casos em que, respectivamente só se tem inspeção e substituição. A essas políticas alguns autores (Nakagawa, 2005) denominam de políticas puras. Por outro lado, é bastante comum, além das atividades de verificação de estado (inspeção) se ter ações complementares previstas em uma única política de manutenção. Neste caso, se tem políticas chamadas híbridas em que condições específicas estabelecem os instantes ideais para uma gama de ações, por exemplo, reparo, inspeção e substituição (ver, Scarf and Cavalcante, 2010).

Para o caso específico explorado, tendo em vista que as inspeções têm pouco ou nenhum efeito para observar estados anteriores à falha, considerou-se que o estado do componente será conhecido com certeza, sendo ações de substituições realizadas a fim de se evitar as falhas. Por esta razão discute-se mais detalhadamente no próximo tópico as políticas de substituição puras.

3. Modelo Multicritério para Estabelecimento de Política de Substituição por Idade

Segundo Scarf et al (2005), a política de substituição por idade é bastante popular. Tendo sido estendida e estudada por muitos outros autores, essa política consiste em substituir um componente quando este falhar ou quando este alcançar uma idade *T*, o que ocorrer primeiro. De modo geral, qualquer política de substituição empregada tem a finalidade de reduzir a incidência de falhas no sistema (Belzunce et al, 2006). A substituição por idade implica que o risco de falhar de uma unidade aumenta com a idade e que pode ser lógico substituir uma unidade a partir de uma certa idade, apesar do fato deste ainda estar funcionando (Yoo et al, 1985). No entanto, só faz sentido aplicar a substituição planejada de peças ou partes que podem falhar em operação a menos que a falha durante a operação represente conseqüências mais graves que a substituição preventiva. Quando não se observa vantagem na substituição preventiva, não se recomenda a aplicação desta política (Glasser, 1969).

A forma mais comum em que se apresentam os modelos de substituição por idade baseia-se em minimizar custo esperado pelo tempo esperado de funcionamento. Sendo assim, conforme já exposto, a substituição só fará sentido se o custo da falha do item ocorrer em operação for maior do que o custo da substituição antes da falha. Ou seja, o custo depois da falha (*Ca*) deve ser maior que o custo antes da falha (*Cb*) ou o custo relativo (*Ca/Cb)* ser maior que 1. A figura 1 mostra bem este aspecto.

O custo esperado *u()* para um tempo *T* será dado pela equação (1):

$$u(T) = c_a \int_0^T f(x)dx + c_b \int_T^\infty f(x)dx \qquad (1)$$

O primeiro termo indica o custo relativo à falha e o segundo termo indica o custo para a substituição do item no tempo *T*, ou seja, custo da substituição preventiva.

A seguinte equação representa o tempo esperado de um ciclo, podendo um ciclo ser finalizado devido a uma falha, ou devido à substituição preventiva, este tempo depende da idade escolhida para se fazer a substituição preventiva *T*.

$$v(T) = \int_0^T xf(x)dx + T \int_T^\infty f(x) \qquad (2)$$

O limite de idade *T* que minimiza o custo a longo prazo por unidade de tempo (*c(T)*)é então determinado usando o teorema da renovação. Nesse sentido, o valor ótimo de *T* é aquele que minimiza a razão *u(T)/v(T).*

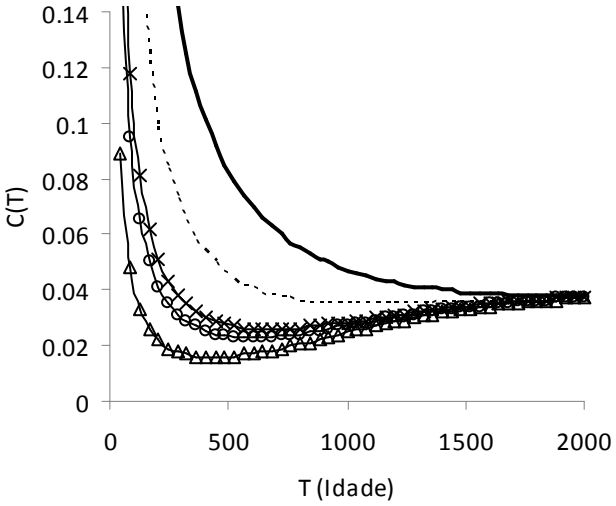

Figura 1 – Comportamento do custo a longo prazo em função de *T*, para *Ca/Cb* = 1(—) ; *Ca/Cb* = 2 (·····); *Ca/Cb* = 4 (—+—); *Ca/Cb* = 5 (—o—); *Ca/Cb* = 10 (—Δ—)

O valor de *T* pode estar em termos de horas operacionais, em termos de quilômetros rodados, em fim, ele deve estar coerente com a unidade que melhor descreva a passagem do tempo para o componente.

Apesar de ser bastante comum o uso de apenas um critério para a definição dos tempos de substituição, como já mencionado, no contexto hospitalar há um conjunto de aspectos que não tem uma correspondência direta em termos de custo e tem uma importância fundamental para a definição da idade de substituição. Isto porque, quanto maior o intervalo entre substituições, maiores os riscos associados à impossibilidade de atender os pacientes.

Sendo assim, no contexto hospitalar as falhas são menos toleradas que no contexto de manufatura, em que o uso do mínimo custo é bem difundido, haja vista que as conseqüências das falhas na manufatura, para a grande maioria dos casos, incorrem unicamente em custos.

Como um critério adicional a ser considerado, é natural se esperar que um atributo que possa quantificar as conseqüências associadas com a impossibilidade de atendimento esteja relacionado com a disponibilidade ou indisponibilidade. Contudo, observa-se que para o calculo da disponibilidade é necessário se ter os tempos gastos com as ações de manutenção. Por outro lado, é muito comum não se ter tais dados, ou mesmo, que estes dados não sejam aproveitáveis.

Por esse motivo, faz-se uso do tempo médio entre falhas operacionais, aqui, representado por *TMEFO(T)*. Este critério corresponde à média dos tempos que separam duas falhas consecutivas e retrata bem a capacidade do dispositivo operar ininterruptamente. Para políticas puras de substituição esse critério é uma função decrescente de *T*, como pode ser visto na figura 2. Na prática, quanto menor a idade de substituição, menos falhas ocorrem. Assim, o tempo operacional tende a se prolongar. Para valores pequenos de *T*, a distribuição dos tempos entre falhas operacionais pode ser aproximada por uma distribuição exponencial, tendo em vista que as falhas tornam-se eventos raros com taxa de ocorrência $\int_0^T f(x)dx\ /T$ (ver SCARF et al, 2005), ou seja, o tempo médio entre falhas operacionais pode ser dado por $T/\int_0^T f(x)dx$.

A figura 2 mostra a aproximação do *TMEFO* considerando as falhas eventos raros (linha tracejada), bem como considerando a fórmula exata para o cálculo do *TMEFO(T)* (linha contínua). Observa-se que as duas linhas estão sobrepostas para quase todo o domínio de tempo, havendo uma diferença maior quando os valores de *T* são bastante grandes. Observa-se que o uso da aproximação é bem plausível. Isto porque os tempos em que se inicia uma diferença maior entre os resultados obtidos pela aproximação e os resultados obtidos pela fórmula exata correspondem a faixas de ações dominadas. Ou seja, para o caso em estudo, esses valores de tempo apresentam desempenhos medíocres em ambos os critérios.

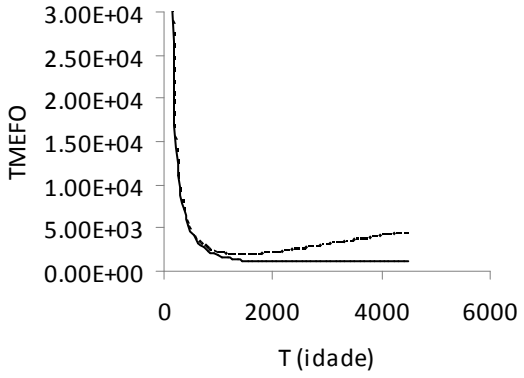

Figura 2 – Comportamento do Tempo Médio Entre Falhas Operacionais como função de *T*. Usando a expressão exata (·····); Usando a aproximação Exponencial (——)

Posto isto, faz-se uso de uma abordagem Multicritério de apoio a decisão para lidar com os dois critérios simultaneamente. O método usado corresponde ao MAUT (Teoria da Utilidade Multiatributo) é considerado um dos métodos mais adequados, especialmente para o caso em que os critérios estão relacionados a aspectos de incerteza. MAUT fornece fundamentos axiomáticos para as escolhas que envolvem múltiplos critérios, o seu principal resultado consiste em estabelecer a forma funcional da função de utilidade com base na confirmação de algumas das suposições em relação às preferências do decisor (Figueira et al, 2005).

Assim, a fim de poder levantar mais facilmente a função utilidade de múltiplos atributos, bem como para garantir um resultado mais consistente, um processo com cinco etapas comumente é seguido (Keeney e Raiffa, 1993): (1) Introdução da terminologia e idéias; (2) Identificação das suposições relevantes de independência, (3) Levantamento das funções utilidade condicional; (4) Levantamento das constantes de escala e (5) verificação de consistência.

O primeiro passo é mais direto. Consiste em garantir que o decisor tenha uma boa compreensão de cada elemento utilizado na aplicação do MAUT. Destaca-se que todas as etapas subseqüentes se baseiam principalmente na compreensão do espaço conseqüência. Para o nosso caso particular, as alternativas consistem das possíveis idades T_i para substituição do componente. Para cada alternativa, há consequências em termos de custo $C(T_i)$ e tempo médio

entre falhas operacionais *TMEFO(T_i)*. Assim, para cada alternativa T_i há um ponto correspondente no espaço conseqüência (*C(T_i); TMEFO(T_i)*), que também está associado com ele, além disso o intervalo de cada critério é estabelecido no espaço de conseqüência [C^0; C*] e [$TMEFO^0$, TMEFO*] (ver Figura 3.).

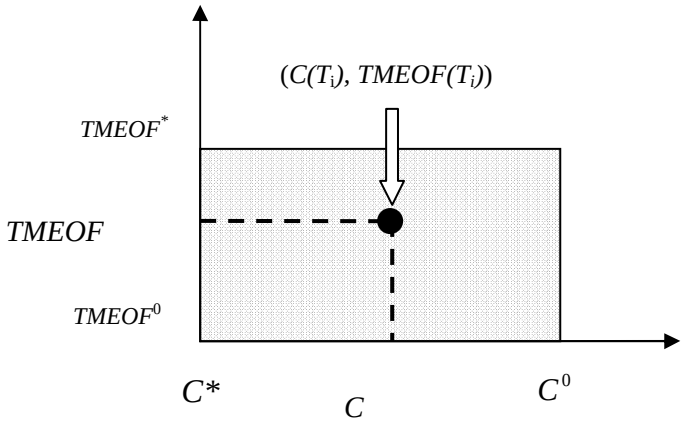

Figura 3 – Espaço de Conseqüências

A segunda etapa é muito útil e consiste em identificar um conceito fundamental da teoria da utilidade multiatributos, a independência em utilidade. Tal conceito é verificado por meio de um procedimento sugerido por Kenney & Raiffa (1993) através de questionamentos ao decisor por meio de loterias.

Outro fator importante refere-se à independência aditiva. Segundo Keeney & Raiffa (1993), os atributos Y e Z são independentes aditivos se a comparação emparelhada da preferência de quaisquer duas loterias, definidas por duas distribuições de probabilidades conjuntas em Y x Z, depende somente de suas distribuições de probabilidade marginais. Se for observada, a representação da função de utilidade multiatributo é reduzida a uma soma ponderada das funções utilidade monoatributo (ver) (3). De acordo com Fishburn (1965), a maioria dos trabalhos aplicados em teoria da utilidade Multiatributo lida com agregação aditiva das funções utilidades monoatributo

$$U(C(T_i), TMEFO(T_i)) = \sum_{j=1}^{N} k_j u_j(T_i) \qquad (3)$$

Onde
u_j é o utilitário atributo único para cada critério *C* e *TMEFO*, respectivamente.
k_j é a constante de escala do critério *j*
N é o número de critérios

Caso o conceito de independência aditiva não seja observado, isto não equivale a impossibilidade do uso do MAUT, apenas resulta no fato que a função utilidade terá um formato diferente da soma ponderada, podendo ser apresentada na forma de uma função multiplicativa, por exemplo.

Convém salientar que a independência em utilidade e independência aditiva difere do conceito de independência estatística. Isto implica que critérios podem não ser independentes no senso estatístico, porém nada impede que o decisor julgue que tais critérios apresentem independência preferencial (Almeida, 2010).

O terceiro passo consiste em dividir o processo de levantamento da função utilidade multiatributo. A função utilidade de cada critério é obtida separadamente. Existem diferentes processos para elicitar a função utilidade. Alguns deles são muito complicados e implicam na

aplicação de longos questionários. Raiffa (1997) propôs um método muito simples que consiste em determinar alguns equivalentes certos, quando comparado com algumas loterias diferentes, a fim de poder levantar a função utilidade.

A quarta etapa compreende o levantamento das constantes de escala, este processo depende do formato final da função utilidade multiatributo. Para o caso de uma forma aditiva, há uma constante de escala para cada critério. Em nosso caso particular de dois critérios, a avaliação de uma constante de escala já é suficiente para que ambas as constantes estejam determinadas. Fazendo uso da equação $k_1 + k_2 = 1$, tendo uma das constantes, a outra é determinada (Keeney e Raiffa, 1993).

Finalmente, a quinta etapa resume-se a verificação de consistência. Esta etapa é muito importante para constatar se a função utilidade multiatributo tem, de fato, correspondência com a estrutura de decisão do decisor. Este processo pode ser realizado de diversas formas (Keeney, 1992).

O próximo tópico é referente à aplicação propriamente dita do MAUT para a definição de uma política de substituição por idade para tubos de raios-X. Os critérios C e TMEFO são usados para mensurar a performance das alternativas de tempo.

4. Estudo de caso

O tomógrafo computadorizado (TC) foi desenvolvido em 1970 e teve um impacto revolucionário no diagnóstico por imagem com raios-X. Porque eliminou ou minimizou vários problemas que os equipamentos convencionais apresentavam, fornecendo aos médicos uma capacidade de examinar o paciente de forma não invasiva de estruturas internas do corpo com uma precisão e especificidade nunca vistas antes (Robb, 1982). Deste modo, este equipamento se tornou de imensa importância para os hospitais e consequentemente aos pacientes fornecendo uma melhoria no diagnóstico médico, acarretando um melhor tratamento e qualidade de vida aos pacientes.

O TC é, simplificadamente, formado por um emissor de raios-X (tubo de raios-X) e um detector na direção oposta. Eles podem girar 360° em torno do paciente e através da emissão dos feixes de raios-X, a imagem é formada. Esta imagem formada é chamada de fatias. Após a emissão do feixe em direção a parte do corpo a ser investigada, os fótons atingem o detector e são absorvidos. A partir daí os fótons são transformados em sinal analógico e posteriormente em sinal digital e apresentada no computador ou de forma impressa.

Os custos de operação do tomógrafo são elevados, em contra partida a receita proveniente dos exames realizados são muito bem vistos, deste modo ganha-se ênfase em reduzir as paradas não programadas. Um dos componentes que pode causar a parada completa é o tubo de raios-X. A vida útil de um tubo de raios-X para tomografia computadorizada é de algumas centenas de horas, o tempo perdido devido a falha do tubo pode assumir uma parcela significativa de tempo em que o TC está fora de uso (Smith,1980). Quando uma falha ocorre, o tempo perdido durante o fornecimento e instalação de um tubo de substituição será longo e os prejuízos substanciais (Smith,1980). Normalmente, os estabelecimentos assistenciais de saúde apresentam apenas um equipamento, não tendo um *backup*. Sendo assim, a falha deste componente geralmente desencadeia o cancelamento de todos os exames até que o novo item seja adquirido, entregue e instalado, provocando perdas de receita enormes e pagamento desnecessário dos funcionários que estão disponibilizados para a realização dos exames.

Segundo o Ministério da Saúde, os tomógrafos computadorizados devem está na proporção de 1 para cada 100 mil habitantes. O censo de 2005 do IBGE apresentou o índice de 1,1 por 100 mil habitantes, mas variando de 0,5, na Região Norte, a 1,4, na Região Sudeste. Apesar do índice está dentro do sugerido pelo Ministério da Saúde, há grande discrepância entre as regiões. Na região Norte e Nordeste os valores do índice estão muito abaixo, o que significa se um tubo de raios-X falhar, provocará além dos transtornos acima mencionados, um grave prejuízo a sociedade.

Deste modo, vê-se a enorme necessidade de aplicar uma política de manutenção que diminuía estes transtornos e que faça os hospitais terem receitas e os pacientes sejam atendidos da melhor maneira possível.

Nesse trabalho, propõe-se uma política de substituição por idade para o tubo de raios-X. Diferentemente dos modelos mais comuns, o modelo em uso utiliza múltiplos objetivos para determinação da idade de substituição mais adequada. Conforme já exposto no tópico anterior, um passo a passo é seguido nessa seção para facilitar o processo de aplicação. Como ponto de partida, destaca-se que é necessário os dados de falhas relacionados com o tubo de raios-X, bem como os valores de *Ca* e *Cb* relacionados com os custos estimados de corretiva e preventiva, respectivamente (ver tabela 1 com dados realísticos).

Dados de falha	
Weibull	
β	2.5
η	1200
Custo	
Ca	40
Cb	4

Tabela 1- Dados do comportamento de falhas do tubo de raios-X

A partir do modelo que descreve a falha do tubo de raios-X, é possível observar o comportamento dos critérios envolvidos na análise para definição da idade mais adequada de substituição. Destaca-se que os gráficos para os parâmetros da tabela 1, não diferem muito dos gráficos que já foram (figuras 1 e 2). Compreendendo como os critérios *C(.)* e *TMEFO*(.) variam, o decisor precisa estabelecer o espaço de conseqüência envolvido no problema. Nesse sentido, tendo em vista os parâmetros que descrevem a falha deste componente, um valor de tempo mínimo foi empregado como sendo 66 horas, isto porque na prática é pouco provável a implementação de substituições com periodicidade tão pequena. O limite superior para *T* foi obtido pelo estudo do comportamento dos critérios, observou-se que para os parâmetros que constam na tabela 1, o ponto de ótimo para o critério custo corresponde à idade T_c^*=430 horas. O intervalo de tempo superior a este valor (T_c^*, ∞) configura infinitas alternativas dominadas. Isto porque, o critério TMEFO é monotônico decrescente, sendo assim, como a partir deste ponto o custo começa a crescer novamente, para ambos os critérios as avaliações tendem a ser piores para as alternativas de tempo, na medida em que estas se afastam do ponto de ótimo no critério custo T_c^*. Posto isto, temos o espaço conseqüência determinado: [C^0=0,061005; C*=0,015836] e [$TMEFO^0$=5.812,11; TMEFO*=93.066,07] (ver Figura 3).

De forma bastante sucinta, descreve-se a aplicação dos passos junto ao decisor. Uma vez identificado e entendido o espaço de conseqüências, observou-se que a independência aditiva foi confirmada de acordo com os procedimentos adotados por Kenney e Raiffa (1993) na seção 3. Posteriormente, as funções utilidade condicionais, ou seja, as funções utilidade do u(C) e u(TMEFO) foram obtidas através de loterias (ver equação 4 e 5, respectivamente).

A função utilidade correspondente ao critério custo:

$$u_c(t) = -2.273 * 10^7 + 2.273 * 10^7 * e^{-0.000005*t} \qquad (4)$$

A função utilidade referente ao critério TMEFO obtida neste estudo de caso é definida como segue:

$$u_{tmefo}(t) = 1.145 * 10^3 - 1.145 * 10^3 * e^{-0.00000001*t} \qquad (5)$$

Tendo em vista que a função utilidade multiatributo é uma soma ponderada das utilidades monoatributo por suas constantes de escala (ver equação 3), as constantes de escala foram obtidas

via procedimento descrito em (Keeney e Raiffa, 1993), teremos a função utilidade global representada pela equação 6.

$$u_{global}(t) = 0.55 * u_c(t) + 0.45 * u_{tmefo}(t) \qquad (6)$$

Finalmente, o processo de verificação consistiu da validação junto ao decisor dos valores que foram obtidos através da função utilidade multiatributo.

O resultado final está coerente com a expectativa que se tinha. Uma vez que as falhas do tubo de raios-X podem provocar conseqüências bastante graves associadas com o risco a saúde do paciente. E que este critério impõe um comportamento mais conservador, a fim de reduzir tais falhas, é esperado que a periodicidade obtida a partir de uma visão mais abrangente corresponda a um tempo menor, quando comparado com a idade recomendada utilizando a minimização do critério custo.

O tempo ótimo sob a perspectiva do mínimo custo foi T_c^*=430, o que corresponde a um custo mínimo de C* (T_c^*) = 0,015836, contudo apresenta um valor de TMEFO (T_c^*) = 5.812,11. Por outro lado, o ponto que maximiza o tempo médio entre falhas operacionais foi T_{TMEFO}^*= 66, correspondendo a um valor de TMEFO*(T_{TMEFO}^*) = 93.066,07, porém correspondendo a um custo de C(T_{TMEFO}^*) = 0,061005.

Observa-se que os critérios são altamente conflitantes, sendo um procedimento multicritério, que lide com o conflito dos critérios e leve em consideração as preferências do decisor, extremamente valioso.

O resultado da maximização da função utilidade indicou como idade ideal para substituição o T_{Umax} = 340, o que corresponde a um custo de C (T_{Umax}^*) = 0,016392 e TMEFO(T_{Umax}^*) = 8.127,94.

5. Conclusão

Este trabalho trouxe a tona algumas dificuldades que os gestores hospitalares, principalmente os engenheiros clínicos, enfrentam na dia-a-dia na manutenção dos equipamentos médico-hospitalares. Tais dificuldades não são apenas decorrentes de sua complexidade tecnológica, mas também de fatores conflitantes que dificultam a realização de qualquer atividade. Tais fatores podem ser satisfatoriamente representados pelo custo e pelo risco relativo ao paciente, já que o equipamento afeta direta ou indiretamente a vida de um ser humano. Assim, este trabalho tem o intuito de ajudar os gestores na manutenção deste tipo de ambiente a implementar uma política ótima de substituição por idade através da metodologia da teoria da utilidade multiatributo (MAUT).

O equipamento escolhido para o estudo de caso foi o tomógrafo, pois representa grande importância nos estabelecimentos assistenciais de saúde por gerarem grande receita e também por sua importância no diagnóstico de doenças complexas. Tal equipamento apresenta um componente chave que tem grande peso no comportamento de falhas e no custo, o tubo de raios-X. Para tanto, o trabalho foi desenvolvido em cima desse componente. Deste modo foram coletados dados referente ao comportamento de falha e realizado um estudo com o MAUT para o desenvolvido da função utilidade global que represente os critérios conflitantes descritos acima. A partir daí a função utilidade global foi otimizada para obtermos o seu maior valor e consequentemente a política ótima de substituição. O modelo funcionou de maneira coerente e promissora para a sua aplicação de fato nos hospitais.

Além da importância de reduzir os custos e diminuir o risco, salienta-se também que o modelo é uma forma de planejar a aquisição de uma peça previamente antes que a falha ocorra. A aquisição com antecedência abre o leque de negociar o pagamento sem ter que afetar fortemente o orçamento.

Referências

Almeida, A. T. de; *O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritérios de Apoio a Decisão*, Editora Universitária, Recife, 2010.

Antunes, E.; Vale, M.; Mordelet, P.; Grabois, V.; *Gestão da Tecnologia Biomédica – Tecnologia e Engenharia Clínica*, ACODESS, Paris, 2002

Belzunce, F., Ortega,E. e Ruiz, J. M., Comparison of Expected Failure Times for Several Replacement Policies, *IEEE transactions on reliability*, 55 (3), 2006

Carpio, A. & Flores, J. M. Analisis y Propuesta para una Gestion de Mantenimiento Hospitalario, *Anales do 1er Congresso Latinoamericano de Ingenieria Biomédica*. Mazatlan, México, 475-480, 1998. APUD LUCATELLI, M. V. *Proposta de Aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade em Equipamento Médico-Hospitalares*, tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.

Cavalcante, C. A.V., *Modelagem de decisão multicritério no planejamento da manutenção abordando problemática de escolha e classificação*, tese doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Engenharia de Produção, 2005.

Christer, A. H.; Scarf, P. A. A robust replacement model with applications to medical equipment, *Journal of the Operational Research Society*, 45(3); 261-275, 1994.

Clark, T. Health care technology replacement planning, *Clinical Engineering Handbook*. Elsevier, New York, 153-154, 2004.

Costa, L. E.; *Gestão de Tecnologia Genérica - Projetos Hospitais Sentinela e a sua contribuição para melhoria da Gestão Hospitalar*, Seminário no Fecomércio, 2004.

Dondelinger, R., A complex method of equipment replacement planning, *Biomedical Instrumentation and Technology*, 38(1), 26-31, 2004.

Dondelinger, R., A simple method of equipment replacement planning, *Biomedical Instrumentation and Technology*, 37(6), 433-436, 2003.

Dreiss, A., When does medical equipment need to be replace?, *Journal of Clinical Engineering*, 33(2), 78-81, 2008.

Figueira J, Greco S, Ehrgott M., *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, Springer, USA, 2005.

Fishburn PC.(1965), Independence in utility with whole product sets. *Operations Research*, 13, 28–45.

Glasser, G. J., Planned Replacement: Some theory and its Application, *Journal of Quality Technology*, 1(2), 110-119, 1969.

IBGE, *Estatísticas da Saúde - Assistência Médico-Sanitária*, 2005.

Keeney R., *Value-focused Thinking: a path to creative decisionmaking*, Harvard University Press, United States of America, 1992.

Keeney RL, Raiffa H., *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*, Cambridge University Press, United Kingdom, 1993.

Legát,V., Zaludová, A.H.,Cervenka V. e Jurca V., Contribution to optimization of preventive replacement, *Reliability Engineering and System Safety* 51, 259-266, 1996.

Márquez, A. C., *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*, Springer, USA, 2007.

Raiffa H., *Decision Analysis: Introductory Lectures on Choices Under Uncertainty*, McGraw-Hill College Custom Series, 1997.

Robb, R., X ray Computed Tomography: From basic principles to applications, *Biophys. Bioeng*., 11, 177-201, 1982

Scarf, P.A., Dwight, R., Al-Musrati, A., On reliability criteria and the implied cost of failure for a maintained component, *Reliability Engineering and System Safety*, 89, 199-207, 2005.

Scarf, Philip A. ; Cavalcante, Cristiano A.V., Hybrid block replacement and inspection policies for a multi-component system with heterogeneous component lives, European *Journal of Operational Research*, 206, 384-394, 2010.

Smith C. B., Measurement of X-ray tube output in computed tomography: a simple method for anticipating tube failure, *British Journal of Radiology*, 53, 718-720, 1980
Taylor, K., Jackson S. A medical equipment replacement score system, *Journal of Clinical Engineering*, 30(1), 37-41, 2005.
Yoo, B. K. e Sung, C. S., Optimal Age-Replacement Policy for Equipment Monitored by a Stochastically Failing Indicator, *IEEE transactions on reliability*, 34 (2), 162-164, 1985.
Nakagawa T., *Maintenance Theory of Reliability*, Springer Verlag, London, 2005.