

# Gestão — Da — Manutenção

Na Direção da Competitividade

Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando M. Campello de Souza  
(Organizadores)



Departamento de Engenharia de Produção/PPGEP-UFPE/IDEP

# GESTÃO DA MANUTENÇÃO

## *na Direção da Competitividade*

ORGANIZADORES:

*Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando Menezes Campello de Souza*

AUTORES:

*Adiel Teixeira de Almeida  
Ana Paula Cabral Seixas Costa  
André Marques Cavalcanti  
Ângela Maria de Araújo Silva  
Caroline Maria Guerra de Miranda  
Cícero Mariano Pires dos Santos  
Cristiano Santos Lúcio de Melo  
Fernando Menezes Campello de Souza  
Heldemárcio Leite Ferreira  
Hélio Burle de Menezes  
Iony Patriota de Siqueira  
Joel de Jesus Lima Souza  
José Carlos da Silva  
Lilian L. Barros  
Luiz Carlos Miranda  
Rogério Augusto Coelho Fernandes*

ISBN 85-7315-273-7

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEP  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - DEP  
INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO - IDEP  
<http://www.npd.ufpe.br/gpsid>  
email: [gpsid@npd.ufpe.br](mailto:gpsid@npd.ufpe.br)

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n  
Cidade Universitária  
50.670-901 Recife-PE  
Tel/Fax 81-32718728

Capa: *Jeann Melo*

Editoração Eletrônica: *Os autores*

Diagramação: *Gilberto José*

Revisão: *Os autores*

Impressão e acabamento: *Editora Universitária/UFPE*

**Gestão da manutenção na direção da competitividade /** Adiel Teixeira de Almeida, Fernando Menezes Campello de Souza (organizadores) ... et. al. -- Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2001.

xviii, 380 p. : il. tab.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de produção – Manutenção 2. Sistemas de produção – Avaliação de desempenho. 3. Métodos de gestão. 4. Manutenção – Gerenciamento – Confiabilidade de equipamentos. I. Almeida, Adiel Teixeira de. II. Souza, Fernando Menezes Campello de.

658.5

CDU (2. ed.)

UFPE

658.5

CDD (20. ed.)

BC/2001-292

# APRESENTAÇÃO

A gestão da manutenção de forma competitiva sempre foi objeto de preocupação de estudiosos no assunto. Para as Empresas, esta preocupação tem se tornado cada vez mais crescente através de seus gerentes e executivos. A gestão da manutenção dos sistemas de produção deve incorporar uma ótica diretamente associada aos impactos na competitividade do negócio deste sistema.

A manutenção tem uma relação direta com a percepção que o cliente tem da qualidade do produto para todos os tipos de sistemas de produção. Na produção de serviços, este impacto está diretamente associado com o atendimento ao cliente. Na produção de bens, as exigências cada vez mais crescentes de desempenho competitivo dos sistemas de produção, requerem que os sistemas estejam disponíveis para fornecer os produtos em tempo hábil, atendendo a credibilidade nos prazos comprometidos. Outro aspecto, na produção de bens, está associado à assistência técnica que deve ser bem planejada e estruturada como complemento ao produto fornecido.

A função manutenção consiste de forma clara na gestão de um sistema de produção, cujo produto se caracteriza como um serviço. Esta visão é fortemente incorporada pela Engenharia de Produção. A área de conhecimento denominada Engenharia de Produção está preocupada com o planejamento e gestão dos sistemas de produção, envolvendo a especificação, previsão e avaliação de resultados obtidos destes sistemas. A natureza

interdisciplinar da área envolve conhecimentos especializados da matemática, física, ciências humanas e sociais, conjuntamente com os princípios e métodos de análise e projeto da engenharia. Esta visão é baseada nas definições adotadas pelo International Institute of Industrial Engineering (IIIE) e pela Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO). Esta visão da Engenharia de Produção considera também que os sistemas de produção são integrados de bens e serviços, envolvendo homens, materiais, tecnologia, informação e energia.

Os aspectos abordados anteriormente justificam a divulgação deste livro, enfocando aplicações e inovações relacionadas a questão da gestão da manutenção de forma a contribuir para que a competitividade do sistema de produção seja atingida de forma concreta. Assim, este livro constitui numa contribuição para o tratamento do planejamento e gestão da manutenção, considerando sua multidisciplinaridade, que envolve temas tais como: gestão, confiabilidade, manutenibilidade, métodos estatísticos, pesquisa operacional, gestão de custos, sistemas de decisão, dentre outros.

Com esta publicação esperamos estar contribuindo para a ampliação da divulgação dos resultados de pesquisas e aplicações no tema. Assim, o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) e o Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão (GPSID) do Departamento de Engenharia de Produção da UFPE dão continuidade a sua linha de edição de livros em temas de interesse relacionados a sua área de conhecimento, reunindo a produção de seu corpo docente juntamente com outros colaboradores que se associam nas atividades do PPGEP na forma de pesquisadores ou outros colaboradores, integrados ao GPSID.

Os temas foram agrupados em quatro blocos: conceitos básicos; métodos de gestão; substituição e manutenção de prevenção; e modelos de decisão em manutenção.

O primeiro grupo, conceitos básicos, envolve a abordagem de aspectos básicos da manutenção, destacando a necessidade do uso métodos de engenharia de produção, o enfoque probabilístico e o uso dos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade. Esta parte inclui os trabalhos: “Engenharia de manutenção” de Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes Campello de Souza; “Confiabilidade e Manutenibilidade na manutenção” de Adiel Teixeira de Almeida, Heldemarcio Leite Ferreira e André Marques Cavalcanti; e “Avaliação de Desempenho de Sistemas – Conceitos Básicos” de Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes Campello de Souza.

O segundo grupo, métodos de gestão, trata de aspectos importantes no planejamento e gestão da manutenção. A manutenção pode contribuir para a competitividade dos sistemas de produção, através do tratamento adequado a sistemas de gestão. Neste grupo encontram-se os textos: “Procedimentos estatísticos para o desenvolvimento da avaliação de desempenho de sistemas” de Joel de Jesus Lima Souza, José Carlos da Silva e Adiel Teixeira de Almeida; “Tpm – manutenção produtiva total: Da concepção conceitual à implantação” de Hélio Burle de Menezes e Adiel Teixeira de Almeida; “Sistemas de custeio para apoio À gestão da manutenção” de Luiz Carlos Miranda e Ângela Maria de Araújo Silva; “O dimensionamento de sobressalentes” de Heldemarcio Leite Ferreira, Cristiano Santos Lúcio de Melo e Adiel Teixeira de Almeida; “Terceirização da Manutenção” de Rogério Augusto Coelho Fernandes e Adiel Teixeira de Almeida; “Teste de confiabilidade de Equipamentos” de Adiel Teixeira de Almeida, Fernando Menezes Campello de Souza e André Marques Cavalcanti; “Modelos de manutenção – Ênfase na confiabilidade e manutenibilidade” de Cícero Mariano Pires dos Santos.

O outro grupo, substituição e manutenção de prevenção, engloba métodos para o tratamento de problemas relacionados a substituição, monitoramento e manutenção programada nos sistemas de produção, considerando as questões probabilísticas,

otimização e os múltiplos aspectos associados a competitividade. Neste conjunto foram agrupados os textos: “Gerenciamento da substituição e manutenção programada de equipamentos na indústria” de Adiel Teixeira de Almeida; “Applying level of repair analysis to a condition monitoring problem” de Lilian L. Barros; “Otimização da periodicidade da manutenção centrada na confiabilidade” de Iony Patriota de Siqueira e Adiel Teixeira de Almeida; “Manutenção de software” de Ana Paula Cabral Seixas Costa e Fernando Menezes Campello de Souza; “Monitoramento: controle estatístico de processo em uma aplicação de tempo real” de Hélio Burle de Menezes e Fernando Menezes Campello de Souza.

O último grupo, modelos de decisão em manutenção, apresenta modelos de decisão para problemas de manutenção com ênfase no uso de métodos de pesquisa operacional, destacando teoria da decisão e decisão multicritério. Neste conjunto foram agrupados os textos: “Modelos de Decisão em Problemas de Manutenção Baseados em Teoria da Decisão” de Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes Campello de Souza; “Teste de Confiabilidade Baseado em Teoria da Decisão” de Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes Campello de Souza; “Seleção de Contratos de Manutenção através de Modelos de Decisão Multicritério” de Adiel Teixeira de Almeida, Rogério Augusto Coelho Fernandes e Caroline Maria Guerra de Miranda.

Com este livro esperamos, organizadores e autores, contribuir para o estudo e aprofundamento das questões relacionadas à gestão da manutenção. Esperamos também estimular o desenvolvimento de estudos e aplicações concretos, associados a competitividade na manutenção dos nossos sistemas de produção.

A organização de um livro, como se sabe, não é uma tarefa simples. É importante destacar o esforço exigido na tarefa de concluir este livro, envolvendo todos os autores e outros colaboradores, seja em suas contribuições específicas e isoladas em

partes deste trabalho, seja, especialmente, no esforço multidisciplinar de obter uma integração para elaboração do livro como um todo. Neste sentido, os organizadores e autores, agradecem a todos os colaboradores, destacando Jeann Melo na idealização da capa e o corpo técnico da Editora Universitária da UFPE na tarefa de dar a forma final. Finalmente, deve ficar registrado o apoio institucional, na viabilização de recursos financeiros ou outros recursos, diretamente associados à elaboração deste livro ou indiretamente, quando relacionados ao desenvolvimento de projetos ligados aos resultados apresentados ou ao suporte para funcionamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção ou do Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão. Neste contexto incluem-se: Instituições de fomento e Empresas envolvidas nos projetos desenvolvidos, dentre as quais destacam-se: CAPES, CNPq, FACEPE, IDEP, ELETROBRAS, CHESF e CELPE.

Recife, dezembro de 2001

Adiel Teixeira de Almeida

Fernando Menezes Campello de Souza

(organizadores)



## OS AUTORES

### Adiel Teixeira de Almeida

PhD pela Universidade de Birmingham, Inglaterra, professor do Departamento de Engenharia de Produção da UFPE, atualmente é coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFPE. Coordenador do GPSID (Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão). Atua nas áreas de Decisão Multicritério, Sistemas de Informação e Decisão, Avaliação de Desempenho, Confiabilidade e Manutenção.

### Ana Paula Cabral Seixas Costa

MSc, Doutoranda em Engenharia de Produção pela UFPE. Membro do GPSID e Docente dos cursos de especialização em Gestão da Manutenção e Gestão da Informação da UFPE.

### André Marques Cavalvanti

MSc, Doutorando em Engenharia Elétrica pela UFPE. Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.

### Ângela Maria de Araújo Silva

MSc em Engenharia de Produção pela UFPE.

### Caroline Maria Guerra de Miranda

MSc em Engenharia de Produção pela UFPE. Membro do GPSID.

## Cícero Mariano Pires dos Santos

DSc pela Universidade Federal de Santa Catarina, professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência da UFPE

## Cristiano Santos Lúcio de Melo

MSc, Doutorando em Economia pela UFPE. Membro do GPSID.

## Fernando Menezes Campello de Souza

PhD pela Universidade de Cornell, Estados Unidos, professor titular no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFPE. Atua nas áreas de Sistemas de Decisão, Sistemas Probabilísticos e Métodos Quantitativos em geral.

## Heldemárcio Leite Ferreira

MSc em Engenharia de Produção pela UFPE. Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.

## Hélio Burle de Menezes

MSc, Doutorando em Engenharia Elétrica pela EFEI, Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.

## Iony Patriota de Siqueira

MSc em Engenharia de Produção pela UFPE. Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.

## Joel de Jesus Lima Souza

MSc pela UFPE. Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.

## José Carlos da Silva

MSc em Engenharia de Produção pela UFPE. Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.

## Lilian L. Barros

PhD pela Universidade Católica de Los Angeles, Estados Unidos, professora da Faculty of Mathematics da Universidade de Southampton, Inglaterra. Atualmente é presidente da ICIL (International Centre for Innovation and Industrial Logistics). Atua nas áreas relacionadas a Logística Industrial e Inovação.

## Luiz Carlos Miranda

PhD pela University of Illinois, Estados Unidos. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFPE e do Departamento de Ciências Contábeis da UFPE. Atualmente é coordenador do Programa Multiinstitucional e Inter-Regional de Pós-Graduação em Ciências Contábeis da UFPE. Atua nas áreas de Agronegócios; Agribusiness e Medição do Desempenho Econômico Financeiro.

## Rogério Augusto Coêlho Fernandes

MSc em Engenharia de Produção pela UFPE. Membro do GPSID e Docente do curso de especialização em Gestão da Manutenção da UFPE.



# SUMÁRIO

**Apresentação**..... V

**Os autores**..... XI

## PARTE I – CONCEITOS BÁSICOS

### **Engenharia de manutenção**

*Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes*

*Campello de Souza*..... 3

### **Confiabilidade e Manutenibilidade na manutenção**

*Adiel Teixeira de Almeida, Heldemarcio Leite Ferreira e*

*André Marques Cavalcanti*..... 11

### **Avaliação de Desempenho de Sistemas – Conceitos Básicos**

*Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes*

*Campello de Souza*..... 43

## PARTE II – MÉTODOS DE GESTÃO

### **Procedimentos estatísticos para o desenvolvimento da avaliação de desempenho de sistemas**

*Joel de Jesus Lima Souza, José Carlos da Silva e*

*Adiel Teixeira de Almeida*..... 65

<b>Tpm – manutenção produtiva total: Da concepção conceitual à implantação</b>	
<i>Hélio Burle de Menezes e Adiel Teixeira de Almeida.....</i>	91
<b>Sistemas de custeio para apoio À gestão da manutenção</b>	
<i>Luiz Carlos Miranda e Ângela Maria de Araújo Silva.....</i>	113
<b>O dimensionamento de sobressalentes</b>	
<i>Heldemarcio Leite Ferreira, Cristiano Santos Lúcio de Melo e Adiel Teixeira de Almeida.....</i>	135
<b>Terceirização da Manutenção</b>	
<i>Rogério Augusto Coelho Fernandes e Adiel Teixeira de Almeida.....</i>	157
<b>Teste de confiabilidade de Equipamentos</b>	
<i>Adiel Teixeira de Almeida, Fernando Menezes Campello de Souza e André Marques Cavalcanti.....</i>	173
<b>Modelos de manutenção – Ênfase na confiabilidade e manutenibilidade</b>	
<i>Cícero Mariano Pires dos Santos.....</i>	187
 <b>PARTE III – SUBSTITUIÇÃO E MANUTENÇÃO DE PREVENÇÃO</b>	
<b>Gerenciamento da substituição e manutenção programada de equipamentos na indústria</b>	
<i>Adiel Teixeira de Almeida.....</i>	209
<b>Applying level of repair analysis to a condition monitoring problem</b>	
<i>Lilian L. Barros.....</i>	225

<b>Otimização da periodicidade da manutenção centrada na confiabilidade</b> <i>Iony Patriota de Siqueira e Adiel Teixeira de Almeida.....</i>	249
<b>Manutenção de software</b> <i>Ana Paula Cabral Seixas Costa e Fernando Menezes Campello de Souza.....</i>	271
<b>Monitoramento: controle estatístico de processo em uma aplicação de tempo real.</b> <i>Hélio Burle de Menezes e Fernando Menezes Campello de Souza.....</i>	293
<b>PARTE IV – MODELOS DE DECISÃO EM MANUTENÇÃO</b>	
<b>Modelos de Decisão em Problemas de Manutenção Baseados em Teoria da Decisão</b> <i>Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes Campello de Souza.....</i>	311
<b>Teste de Confiabilidade Baseado em Teoria da Decisão</b> <i>Adiel Teixeira de Almeida e Fernando Menezes Campello de Souza.....</i>	329
<b>Seleção de Contratos de Manutenção através de Modelos de Decisão Multicritério</b> <i>Adiel Teixeira de Almeida, Rogério Augusto Coelho Fernandes e Caroline Maria Guerra de Miranda.....</i>	357



**PARTE I**  
***CONCEITOS BÁSICOS***

---

---



# ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

*Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando Menezes Campello de Souza*

## 1. Introdução

Engenharia de Manutenção é uma expressão informal, por vezes ocasionando dificuldades de interpretação. É importante distinguir-se inicialmente a atividade de execução da manutenção, a qual nem sempre inclui uma atividade de engenharia. Segue-se, distinguindo-se o desenvolvimento de técnicas de manutenção. Neste caso a ênfase se dá na área de tecnologia, como as engenharias mecânica, elétrica, eletrônica, química, civil, etc., conforme a constituição tecnológica do sistema a ser considerado. É este tipo de engenharia (tecnológica) que ocasionalmente é desenvolvida numa atividade de execução de manutenção. Como exemplo, tem-se o caso em que é necessário projetar e construir uma peça (ou parte de um sistema) para substituição de equivalente defeituoso: esta situação pode ocorrer em tecnologia mecânica.

Por fim distingue-se a engenharia na manutenção. Para desenvolvê-la recorre-se à área informalmente denominada de engenharia de manutenção.

A atividade de engenharia na manutenção envolve muitos outros aspectos além do tecnológico. Engenhar um sistema produtivo implica em aspectos econômicos e metodológicos associados aos de natureza tecnológica. A Engenharia de Produção é a área de conhecimento que trata desta questão em qualquer que seja o contexto, inclusive no de manutenção. A engenharia de

produção surgiu inicialmente aplicada na produção de bens, sendo posteriormente estendida à produção de serviços.

A manutenção nesta concepção é vista como a produção de um serviço. Esta visão conceitual, ressaltada a seguir; embora não seja recente só mais recentemente tem tido sua aplicação mais crescente no Brasil

## **2 Conceituação da Engenharia de Manutenção**

Engenhar corresponde a idear, inventar ou engendrar. A engenharia é a arte de aplicar conhecimentos científicos e empíricos, juntamente com habilidades específicas na criação de dispositivos e processos, visando a atender a objetivos bem definidos.

A engenharia de manutenção, ou a engenharia de produção na manutenção, preocupa-se com o planejamento e gerenciamento de sistemas em operação, ou seja com a produção de um serviço.

A Engenharia de Produção é classicamente definida como sendo a “atividade que estuda o projeto e a implantação de sistemas integrados de homens, materiais, equipamentos e ambientes, baseando-se em conhecimentos matemáticos, físicos e sociais, em conjunto com os métodos de análise e de projeto técnico, para especificar e avaliar os resultados a serem obtidos destes sistemas” (2).

Embora este conceito remonte a algumas décadas só mais recentemente têm-se intensificado a associação de aspectos de integração de homens e ambientes e o uso de conhecimentos sociais, a engenharia.

A engenharia de produção tem característica interdisciplinar, associando à tecnologia outras áreas, tais como administração, economia, e matemática aplicada incluindo estatística e probabilidade. Neste sentido o profissional que desenvolve a engenharia de manutenção tem um perfil de

generalista. Portanto, a engenharia de produção é bastante abrangente, podendo ser segmentada de formas diferentes, dentre as quais: gerência de produção, pesquisa operacional e engenharia econômica.

Na sub-área de gerência da produção destacam-se os métodos qualitativos, aplicáveis à gestão da manutenção: planejamento e controle da produção, tempos e movimentos, PERT/CPM (aplicáveis em planejamento de paradas para manutenção), gestão de qualidade.

A pesquisa operacional é por si só muito abrangente e envolve os métodos quantitativos no processo decisório, aplicando-se no planejamento e gerenciamento da manutenção (5). Alguns métodos de pesquisa operacional aplicados na manutenção são: Confiabilidade, Processos Estocásticos (Cadeias de Markov no estudo de desempenho de sistemas, representando esquemas de manutenção, dentre outros), Teoria da Decisão (referências (5), (7) e (8)), Teoria das Filas (dimensionamento de equipes de manutenção), programação matemática (na otimização de ações de manutenção, dimensionamento de sobressalentes, etc. referência (2)).

A engenharia econômica inclui o uso de matemática financeira, finanças, análise de investimentos, além da aplicação dos conceitos básicos de micro e macro-economia na engenharia. A base de custos, suporte às duas outras áreas, é aqui estabelecida.

Uma formação nesta área de engenharia de produção, complementar à tecnológica, tem se tornado muito produtiva em algumas organizações. Um programa de capacitação buscando o contexto de manutenção incluiria as seguintes disciplinas num esquema de pós-graduação: probabilidade e métodos estatísticos, planejamento e controle da produção de serviços, sistemas de informação gerencial e de apoio à decisão, engenharia econômica,

confiabilidade, manutenibilidade, pesquisa operacional (métodos determinísticos), pesquisa operacional (métodos probabilísticos), controle estatístico de qualidade, tempos e movimentos, tópicos especiais aplicados à manutenção (incluindo aplicação de métodos de pesquisa operacional em diversos problemas de manutenção).

### **3 Visão Básica da Área de Manutenção**

A Manutenção tem sido apresentado na literatura de diversas formas. Uma visualização mais bem estruturada é apresentada na forma de duas abordagens: Matemática e de Engenharia.

#### **3.1 Abordagem Matemática**

Esta abordagem consiste em estudos dedicados à otimização de procedimentos. Os modelos de manutenção são classificados de acordo com três critérios: número de estados (modos de falhas no sistema), observabilidade do estado do sistema, e número de componentes.

No primeiro caso os modelos são classificados em dois grupos: modelos de dois estados e modelos multi-estado. No segundo caso, são classificados por modelos de manutenção preventiva, onde o estado do sistema é sempre conhecido, e modelos preditivos (“preparedness”), onde o real estado do sistema não é conhecido com certeza.

A classificação por número de componentes implica em dois tipos de modelos: simples (um componente) e complexos (vários componentes). A modelação matemática, com as hipóteses básicas e desdobramentos são função do tipo de classificação acima.

### **3.2 Abordagem de Engenharia**

Esta abordagem consiste no tratamento de um conjunto satisfatório de procedimentos de manutenção. O que fazer e quando?

Três visões são aplicadas para esta abordagem:

- Visão de Geraerds, aborda a concepção de manutenção e distingue as seguintes estratégias: espere e veja; manutenção oportunística; e manutenção preventiva.
- Visão de Kelly, permite a obtenção de um plano de manutenção e proporciona diretrizes para a determinação de cursos de ação.
- Visão de Manutenção Centrada na Confiabilidade, inicialmente aplicada na aviação pode ser sintetizada em quatro etapas: divisão do sistema, determinação de itens significativos, classificação de falhas, determinação de tarefas de manutenção.

### **3.3 Aplicação no Processo Decisório**

Não há uma forma concreta de se estabelecer uma escolha da visão a ser adotada dentro da abordagem de engenharia. Estas são apenas visões e tem uma natureza muito relacionada a estilo de atuação ou a contextos específicos onde surgiram. Há algumas similaridades entre as visões e de maneira geral oferecem um bom encaminhamento para visualização dos problemas.

A escolha de um dos modelos na abordagem matemática se apresenta de forma bem concreta, pela própria natureza dos modelos matemáticos.

Normalmente, pode-se escolher uma das abordagens adotadas em engenharia para se visualizar o problema como um todo, visto que o mesmo está num contexto de engenharia. Em seguida, dependendo da natureza do problema, alguns aspectos específicos podem ser tratados pela abordagem matemática.

#### **4 Conclusão**

A essência de um programa para o desenvolvimento da engenharia de manutenção está calcada na educação do lado humano do sistema, admitindo-se que as pessoas são parte deste sistema, que se propõe a reduzir um serviço, o qual requer o suporte destas pessoas.

No contexto de sistemas de produção sócio-técnicos, apresentada pela visão da engenharia de produção, a questão da educação tem sido enfocada e destacada de forma apropriada, aplicando-se igualmente a este contexto de manutenção.

Portanto, é imprescindível se buscar a engenharia de produção, seja dotando de formação apropriada os componentes da organização, seja combinando-se com a terceirização de algumas ações de engenharia.

#### **Bibliografia**

1. Almeida, A. T. de; Wajzman, D. Engenharia de Manutenção-Visão Conceitual. IV Congresso Brasileiro de Manutenção; Agosto/ 1989. São Paulo-SP: 180-197.
2. Maynard, H. B. Manual de Engenharia de Produção. Editora Edgar Blucher LTDA. 1970-Tradução.
3. Guimarães, P. A. R. Sistemática para Avaliação de Desempenho de Circuitos de Telecomunicações. III SNTTEE-Seminário Nacional de Telecomunicações das Empresas de Energia Elétrica. Curitiba-PR. 22-24/Outubro/1985:1-30.

4. Guimarães, P. A. R.; Wajzman, D.; Caneca, J. A.; Kwan, W. K.; Alderete, M.; Santos, O. G. Sistemática de Análise de Desempenho de Sistema de Telecomunicações. VI Congresso Ibero-Americano de Mantenimiento; Barcelona, 1991: 1-20.
5. Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C. Pesquisa Operacional Aplicada na Avaliação de Desempenho. VIII SNPTEE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica: Maio/ 1986: São Paulo-SP: GTL-02.
6. Oliveira, J. F. F. de; Almeida, A. T. de. Avaliação da Confiabilidade e Mantabilidade de Equipamentos de Proteção a partir de Dados de Corretivas. VII Congresso Brasileiro de Manutenção: 28 de setembro a 02 de outubro de 1992: Porto Alegre-RS.
7. Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C. de. Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System. IEE Trans. Reliability: Junho/1993: 25 p.
8. Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C. de; Bohoris, G. A. Preference Elicitation in Reliability Engineering. IFORS/IFAC Workshop on Support Systems for Decision and Negotiation Process: 24-26 June 1992: Warsaw-Poland. 2: 11-16.
9. Gits, C. W.; (1986) On the Maintenance Concept for the Technical System: II Literature Review. Maintenance Management International. 6(3)pp.181-196.
10. Geraerds, W. M. J.; (1992) The EUT Maintenance Model. International Journal of Production Economics. 24pp.209-216.



# CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE NA MANUTENÇÃO

*Adiel Teixeira de Almeida  
Heldemarcio Leite Ferreira  
André Marques Cavalcanti*

## 1. Introdução

Tendo em vista que a missão básica da manutenção está associada a um sistema sujeito a características probabilísticas de comportamento, não tem muito sentido proceder um gerenciamento da manutenção ignorando os conceitos básicos associados ao funcionamento de dois elementos importantes do sistema em questão:

- Os equipamentos, cujo comportamento de falhas deve ser compreendido e está associado à área denominada confiabilidade, e
- A estrutura organizacional, incluindo as equipes, de manutenção cujo comportamento de atendimento às falhas dos equipamentos deve ser compreendido e está associado à área denominada manutenibilidade

A seguir são apresentados alguns elementos básicos sobre confiabilidade e manutenibilidade, especialmente aqueles relacionados à manutenção, os quais são utilizados nos capítulos subsequentes.

## **2. Confiabilidade – Conceitos Básicos**

Intuitivamente pode-se associar a confiabilidade à durabilidade de um item, considerando que esse item deve cumprir uma determinada missão durante um certo intervalo de tempo. A denominação item representa de forma genérica um componente, dispositivo, equipamento, ou sistema. Entende-se que um sistema é constituído de equipamentos e estes de componentes ou dispositivos. Um sistema pode ser analisado incluindo o ser humano como parte integrante. Assim, o estudo de confiabilidade pode considerar a análise de componentes ou equipamentos isoladamente ou a associação destes levando a análise de sistemas.

Formalmente, confiabilidade -  $R(t)$  - de um item é definida como a probabilidade que este item funcionará num dado intervalo de tempo  $t$ , de acordo com especificações preestabelecidas. Ou seja, trata-se de um conceito probabilístico.

Tomando-se  $T$  como o tempo de vida do item, tem-se que a confiabilidade até o tempo  $t$  é a probabilidade de que  $T > t$ :

$$R(t) = \Pr (T > t)$$

A suspensão do funcionamento deste item implica em falha. A definição de falha pode ser efetuada em função do objetivo ao qual o item ou sistema se destina. Isto é, diz-se que ocorre uma falha, quando a missão a qual se destina o sistema/item não pode mais ser atendida. Uma falha pode ser classificada em função de:

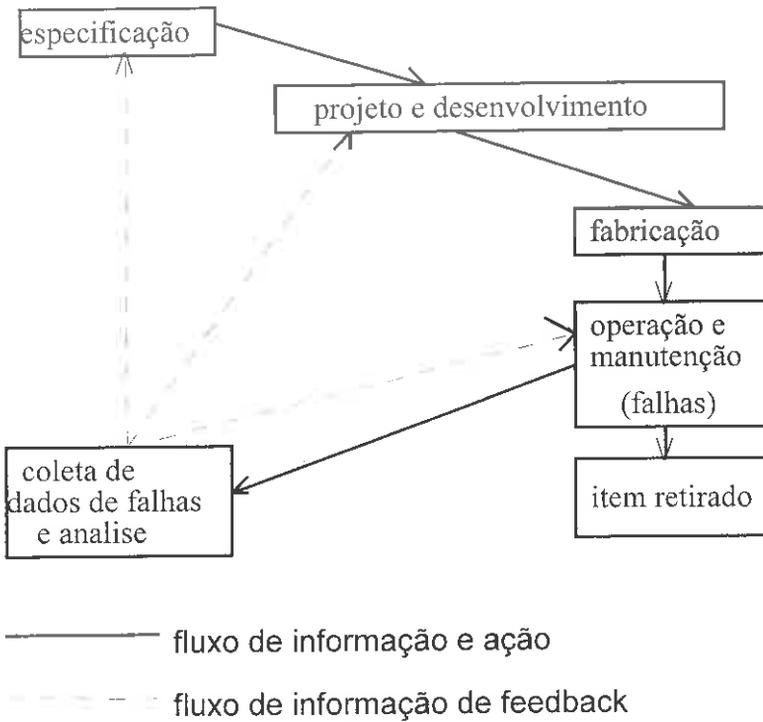
- seus efeitos (sistêmico, parcial, etc)
- sua origem (configuração, composição material)
- sua causa (anormalidade de fabricação, fora de condições operacionais, operação indevida)

## **2.1 - Confiabilidade - Histórico e Finalidade**

O estudo de confiabilidade está associado a alguns aspectos de natureza históricos:

- No início da era industrial produtos simples atendiam às expectativas e não requeriam grandes preocupações com confiabilidade
- A evolução tecnológica implicou em maior complexidade dos sistemas, aumentando a possibilidade de falhas.
- O surgimento da indústria aeronáutica deu um forte impulso à necessidade de estudos de confiabilidade
- Esta necessidade de confiabilidade foi intensificada na segunda guerra mundial, face a complexidade na aviação e ao grande uso de equipamentos eletrônicos (radares, comunicação, automação, etc)
- Após esta fase o desenvolvimento da disciplina confiabilidade foi intensificada devido ao acentuado desenvolvimento industrial, à corrida espacial, sofisticação na tecnologia militar e à automação na indústria

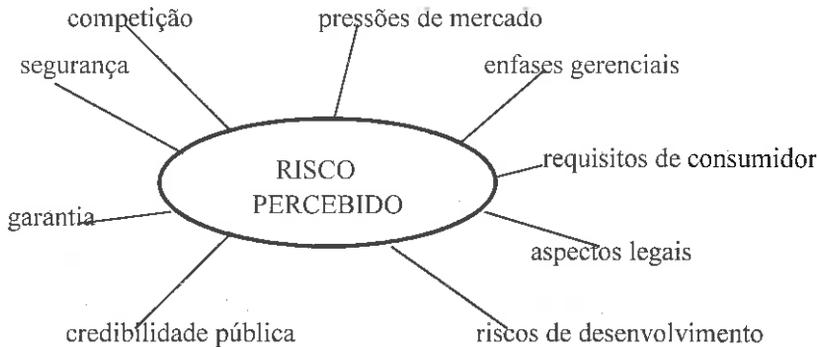
## REPRESENTAÇÃO DO FLUXO DE INFORMAÇÕES DURANTE A VIDA DE UM ITEM



Os problemas básicos estudados em confiabilidade são associados à predição e especificação, melhoria de projetos, tecnologia de processo de fabricação, controle e avaliação de sistemas em operação e engenharia de manutenção. A figura anterior ilustra o fluxo de informações durante a vida de um item.

Muitas pressões desafiam a eficácia de abordagens tradicionais no desenvolvimento de produtos. Dentre essas, destacam-se: competição, pressão por prazos, custo de falhas, rápida evolução de novos materiais, métodos e sistemas complexos, redução de custos, considerações de segurança. Tudo isto aumenta o risco de desenvolvimento de produtos e serviços.

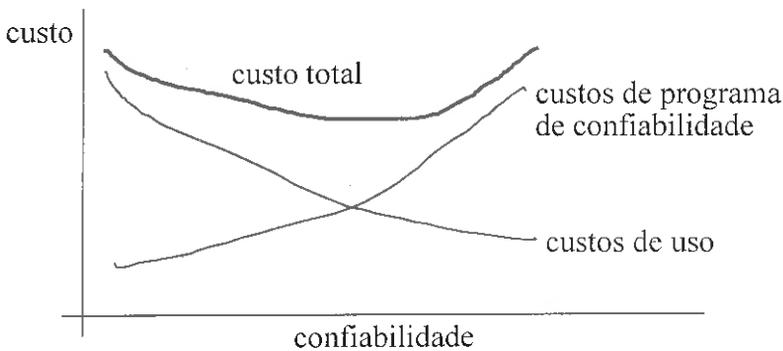
A figura a seguir ilustra a visão das pressões que levam a percepção de riscos.



No tratamento destes problemas vários métodos são aplicados para adequar um projeto à questão do aumento da confiabilidade de um item, tais como:

- revisão de objetivos-funções;
- trade-off (método de decisão por troca entre fatores) entre confiabilidade e manutenibilidade;
- uso de redundância;
- revisão de tipo de componentes básicos;
- investimento no desenvolvimento de peças mais confiáveis.

O custo total de confiabilidade deve ser visto numa visão de ciclo de vida do item, englobando: além dos custos diretamente relacionados ao programa de confiabilidade, os custos associados ao uso do item. Sob a ótica do custo, o valor ideal de confiabilidade depende do comportamento dos dois aspectos acima. A figura a seguir mostra os custos de Confiabilidade no ciclo de vida.



3.

## 2.2 - Formulação Probabilística da Confiabilidade

Conforme já mencionado, o conceito mais formal de confiabilidade é de natureza probabilística. Dois conceitos de probabilidade aplicáveis são o de função densidade de probabilidade representada por  $f(t)$  e o de função de distribuição (acumulada) representada por  $F(t)$ . Considerando a variável aleatória de interesse que é o tempo de vida do item  $t$ ,  $F(t)$  representa a probabilidade de que o item falhará até o tempo  $t$ . Ou seja, o oposto de  $R(t)$ . Portanto,  $R(t) + F(t) = 1$ .

A função confiabilidade  $R(t)$  pode ser formulada matematicamente a partir do seguinte experimento. Observa-se um lote de  $n_0$  itens durante um período de tempo  $t$ . Ao final verifica-se quantas peças estão com falha. Denota-se  $n_f$  o número de peças com falha e  $n_s$  o número de peças que sobrevivem.  $n_f(t)$  é número de peças que falham até o tempo  $t$ . Igualmente  $n_s(t)$  é o número de peças que sobrevivem até o tempo  $t$ . Tem-se as seguintes relações:

$$n_0 = n_f + n_s$$

$$n_0 = n_f(t) + n_s(t)$$

A probabilidade  $R(t)$  pode ser vista pela relação:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_0}$$

Sabe-se que  $R(t) + F(t) = 1$ , então:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$F(t) = 1 - \frac{n_s(t)}{n_0}$$

$$F(t) = 1 - \frac{n_0 - n_f(t)}{n_0}$$

$$F(t) = 1 - \left( \frac{n_0}{n_0} - \frac{n_f(t)}{n_0} \right)$$

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n_0}$$

$$R(t) = 1 - \frac{n_f(t)}{n_0}$$

Derivando em relação a  $t$ :

$$\frac{dR(t)}{dt} = - \frac{1}{n_0} \frac{dn_f(t)}{dt}$$

$$-n_0 \frac{dR(t)}{dt} = \frac{dn_f(t)}{dt}$$

Da equação acima  $\frac{dn_f(t)}{dt}$  é considerado a taxa na qual o lote de peças falha.

Dividindo os termos da equação acima por  $n_s$  tem-se:

$$-\frac{n_0}{n_s(t)} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{n_s(t)} \frac{dn_f(t)}{dt}$$

O termo à direita na equação acima é considerado a taxa de falhas  $\lambda(t)$  de um item. Tem-se então:

$$\lambda(t) = -\frac{n_0}{n_s(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

Observa-se que  $\frac{n_0}{n_s(t)} = \frac{1}{R(t)}$  e também que

$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t)$ , tem-se então a seguinte relação entre taxa de falhas, confiabilidade e função densidade de probabilidade:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Outro resultado para  $\lambda(t)$  é apresentado a seguir:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t)dt = -\frac{dR(t)}{R(t)}$$

Aplicando integração na equação acima no intervalo  $(0,t)$  e  $(1,R(t))$ , tem-se:

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t)$$

Resolvendo-se o termo à direita na equação:

$$\ln R(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt$$

$$- \int_0^t \lambda(t) dt$$

$$R(t) = e$$

Esta é a forma geral para a função confiabilidade. Se a taxa de falhas  $\lambda(t)$  for constante, tem-se o modelo exponencial:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

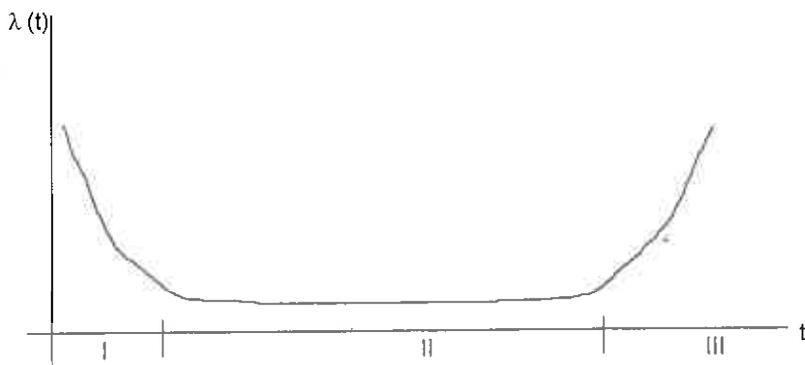
Este é um dos modelos mais usados em confiabilidade e será revisto no item relativo às distribuições utilizadas em confiabilidade.

### 2.3 - Curva da Banheira

A partir da equação geral acima para confiabilidade, pode-se ver que a mesma é função da forma como a taxa de falhas varia com o tempo. Este comportamento da taxa de falhas  $\lambda(t)$  em função do tempo é importante para distinguir formas diferentes de abordar um estudo em confiabilidade. A curva  $\lambda(t)$  em função de  $t$  é comumente denominada de "Curva da Banheira" devido a seu formato. Esta curva é ilustrativamente apresentada a seguir.

Observa-se que há três fases:

1. A fase I corresponde a uma  $\lambda(t)$  decrescente;
2. A fase II corresponde a uma  $\lambda(t)$  constante;
3. A fase III corresponde a uma  $\lambda(t)$  crescente.



A fase II é considerada a fase operacional, para a qual o item é normalmente projetado para funcionar. Nesta fase as falhas são consideradas "casuais" ou puramente aleatórias. Isto significa que não há uma razão específica para as falhas e a natureza aleatória de seu comportamento é mais significativa. Esta é a chamada fase de vida útil do equipamento ou sistema. O modelo estatístico de falhas nesta fase é o exponencial, como pode ser observado a partir da equação geral de confiabilidade.

As fases I e III não são consideradas operacionais. Procura-se evitar o uso do item nestas fases. As falhas ocorrem por um motivo específico e indesejável. Há estudos e procedimentos específicos aplicáveis para cada uma destas fases no sentido de evitá-las.

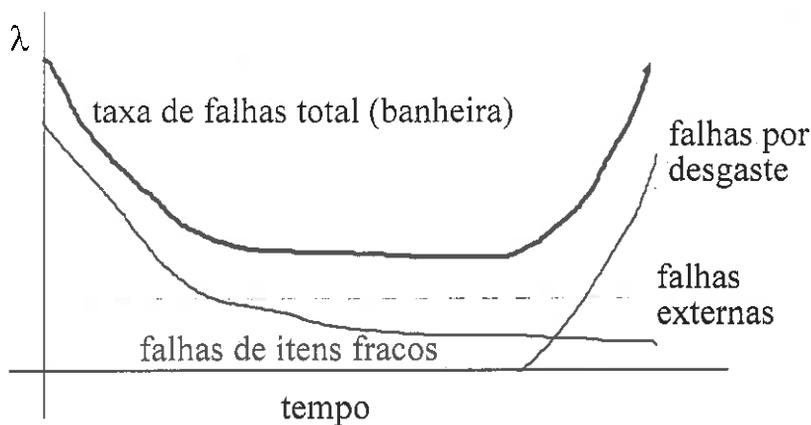
Na fase I as falhas são denominadas de falhas precoces. Em geral são oriundas de problemas de projeto ou fabricação, ou mesmo relacionado a aspectos de transporte ou instalação de equipamentos ou sistemas. Esta fase é por vezes denominada de fase de "mortalidade infantil". Existem procedimentos específicos com o intuito de se evitar que um item seja entregue ao cliente nesta fase. Estes são denominados de "burn-in" e "debuging". O primeiro é geralmente aplicado a componentes mais básicos e implica em acelerar o envelhecimento do item através de

procedimentos que envolvem temperaturas elevadas de funcionamento. O segundo pode ser traduzido por processos de depuração, onde um equipamento é submetido a testes funcionais sob condições mais adversas verificando-se seu desempenho. Estudos de confiabilidade tratam este problema determinando que condições adversas devem ser aplicadas e por quanto tempo para garantir que o item entrou na fase operacional com um padrão de qualidade adequado.

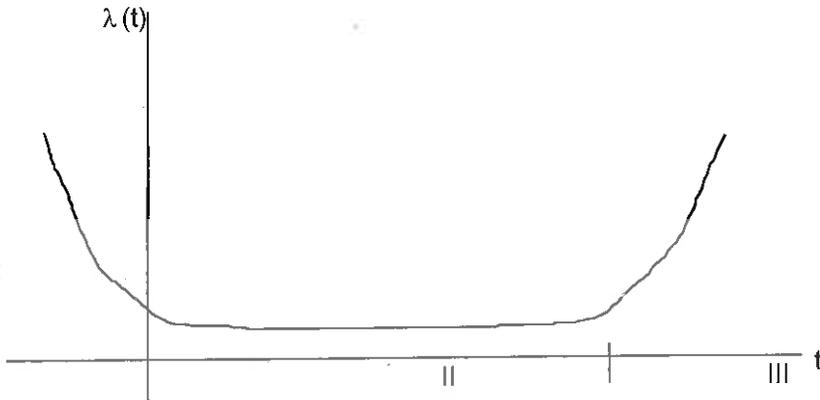
A fase III corresponde ao fim da vida útil do item. As falhas ocorrem em função de desgaste físico do item. Nesta fase deve se proceder a substituição do item.

A forma dessa curva pode ser diferente em função da tecnologia empregada para o item. Equipamentos eletrônicos em geral têm longa vida útil. A fase II é mais extensa na curva. Equipamentos mecânicos em geral têm um período de tempo menor na fase II e logo entram na fase III.

A combinação dos três tipos de falhas acima gera a curva da banheira de modo que se pode visualizar a situação ilustrada na figura a seguir.



Entende-se que quando um item é entregue ao cliente para uso este já se encontra na fase II, conforme ilustra a figura a seguir



### **3. Principais Distribuições de Probabilidade em Confiabilidade**

A seguir são apresentadas algumas características das principais distribuições de probabilidade aplicadas em confiabilidade, e portanto, de interesse para a Engenharia de Manutenção.

Para representar o comportamento de confiabilidade de um item pode-se considerar a variável contínua tempo até a falha ou tempo entre falhas, ou ainda a variável discreta número de falhas num dado período de tempo (mensal, por exemplo).

Para o caso de variável aleatória contínua a distribuição exponencial é aplicável no caso de taxa de falhas constante. As outras distribuições são aplicáveis nas fases I e III da curva da banheira. Para o caso de variável aleatória discreta são aplicáveis principalmente as distribuições de Poisson e a binomial.

### 3.1 - Distribuição Exponencial

Uma das distribuições mais aplicadas em confiabilidade é a distribuição exponencial. Esta se reveste de importância fundamental por ser a distribuição apropriada para modelar a fase operacional de um item quando  $\lambda(t)$  é constante.

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Observa-se que  $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$

O valor esperado ou média de  $t$  é dado por

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

Assim, o valor médio do tempo até a falha (ou tempo entre falhas) é função do parâmetro taxa de falhas. Neste caso específico convencionou-se chamar o valor esperado do tempo entre falhas no caso do modelo exponencial de MTBF (mean time between failures). Assim:

$$E(t) = 1/\lambda = \text{MTBF}$$

Conceitualmente é muito importante considerar este resultado. Há muitos erros de interpretação sobre o significado do MTBF de um item. Ele representa o inverso da taxa de falhas no modelo exponencial, onde não há falhas por desgaste.

Observa-se que quando  $t = \text{MTBF}$ , tem-se:

$$R(t) = e^{-\lambda(\text{MTBF})} = e^{-\frac{\lambda}{\lambda}} = e^{-1} = 0,368$$

Assim:  $F(t) = 1 - R(t) = 0,632$ . Isto significa que 63,2% dos itens falham até o tempo  $t = \text{MTBF}$ .

Observa-se a seguir a relação entre o tempo de missão  $t$  e valor do parâmetro MTBF para vários valores de  $R(t)$ :

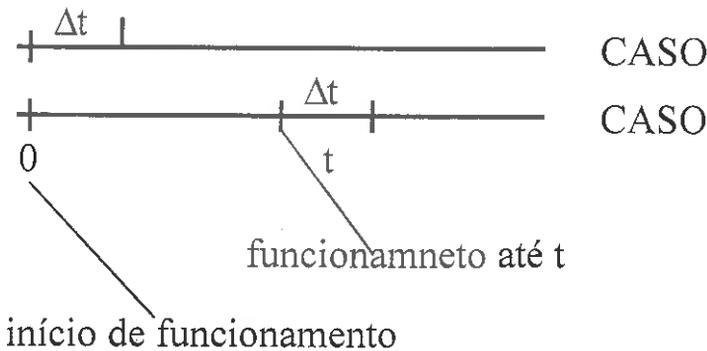
$$R(t) = 90\% \quad \text{MTBF} = 10x \text{ tempo de missão}$$

$$R(t) = 95\% \quad \text{MTBF} = 20x \text{ tempo de missão}$$

$$R(t) = 99\% \quad \text{MTBF} = 100x \text{ tempo de missão}$$

Uma característica importante, nesta distribuição, é que o processo por ela representado não tem memória. Isto significa que não importa o tempo de vida do item. Enquanto está funcionando o item é tão bom quanto novo. Não há o efeito de desgaste.

Observando a figura a seguir, pretende-se analisar a probabilidade de sobrevivência ou de ocorrer uma falha no período  $\Delta t$ , para dois instantes diferentes na vida do item: no início de funcionamento e após o tempo  $t$  de funcionamento.



No caso 1 a confiabilidade  $\Delta t$  é obtida diretamente na expressão  $R(\Delta t)$ . No caso 2, qual a probabilidade de que o item vai funcionar entre  $t$  e  $t + \Delta t$ ? Prova-se que a resposta no caso 2 é  $R(\Delta t)$ . Assim, não importa o tempo de funcionamento anterior.

Analisa-se a probabilidade de ocorrência de uma falha num tempo  $T$ , no intervalo  $t, \Delta t$ , considerando-se  $\Delta t > 0$ . Aplicando-se probabilidade condicional, analisa-se:  $\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T > t)$ . Esta probabilidade condicional representa a probabilidade de que o item falhe durante as próximas  $\Delta t$  unidades de tempo, desde que ele não tenha falhado até o instante  $t$ .

Aplicando-se a definição de probabilidade condicional:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

$$\frac{\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T > t) = \Pr(T > t \mid t \leq T \leq t + \Delta t) \Pr(t \leq T \leq t + \Delta t)}{\Pr(T > t)}$$

Substituindo-se

- $\Pr(T > t \mid t \leq T \leq t + \Delta t) = 1$

- $\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t) = F(t + \Delta t) - F(t) =$   
 $1 - e^{-\lambda(t + \Delta t)} - 1 + e^{-\lambda t}$   
 $= e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(t + \Delta t)}$

$$\Pr(T > t) = R(t) = e^{-\lambda t}$$

obtem-se:

$$\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T > t) = \frac{e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(t + \Delta t)}}{e^{-\lambda t}} = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$$

Portanto, a probabilidade analisada é independente de  $t$ . Isto é, independente do tempo de funcionamento anterior. Enquanto o item estiver funcionando, ele é tão bom quanto novo.

Observa-se que, em sistemas complexos (constituídos de vários itens), o tempo entre falhas tende a uma distribuição exponencial a medida que a complexidade e o tempo de operação aumentam. Esta aproximação pode ser aplicada para um equipamento composto de vários componentes, cada um seguindo padrões diferentes de falhas.

Alguns cuidados na aplicação desta aproximação devem ser adotados. Quando há no equipamento um componente com um padrão de falhas muito sério, se destacando dos demais, então o padrão coletivo tende a ser afetado principalmente por este.

### **3.2 - Distribuição de Poisson**

Considerando a confiabilidade observada através do número de falhas  $x$  num dado período de tempo, tem-se que  $x$  segue uma distribuição de Poisson. Então a distribuição de probabilidade  $x$  é dada por:

$$\Pr(x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}$$

A distribuição de probabilidade acumulada é dada por:

$$\Pr(X \leq x) = \sum_{k=0}^x \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

As seguintes hipóteses são consideradas em relação a um processo de Poisson:

- independência entre número de falhas em intervalos diferentes.

- a probabilidade de ocorrer um evento em um pequeno intervalo é aproximadamente proporcional ao intervalo.
- a probabilidade de ocorrer mais de um evento num intervalo pequeno é desprezível, comparada com a probabilidade de ocorrer um evento.

Observa-se uma relação entre a distribuição exponencial e o processo de Poisson. Isto é, se  $t$  segue uma distribuição exponencial, então o número de falhas  $x$  por período corresponde a um processo de Poisson.

Seja  $t$  o tempo de vida do item  $F(t) = \Pr(T \leq t) = 1 - \Pr(T > t)$ .  $T > t$  significa não ocorrer nenhuma falha durante  $(0, t)$ , ou seja,  $x = 0$ . Logo, aplicando a distribuição de Poisson:

$$F(t) = 1 - \Pr(x = 0) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Ou seja, a causa das falhas envolve uma lei de falhas exponencial. Este comportamento pode ser verificado para valores de  $x$  maiores do que 0.

### 3.3 - Distribuição Weibull

Uma distribuição muito aplicada em confiabilidade é a Weibull. A seguir a forma analítica desta função:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left[ \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left[ \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]}$$

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t}{\eta}\right]^{\beta}}$$

A função relativa a taxa de falhas no caso Weibull é a seguir apresentada:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta}\right]^{\beta-1}$$

Esta função tem dois parâmetros:

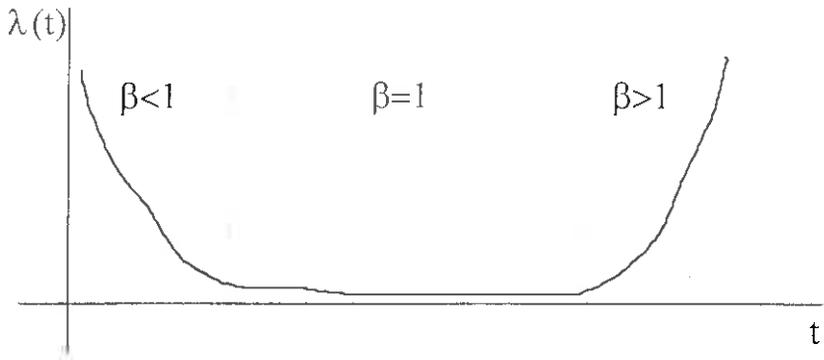
- $\beta$  - parâmetro de forma
- $\eta$  - parâmetro de escala

Pode-se observar um papel muito interessante relacionado a  $\beta$  :

1.  $\beta = 1$ , a taxa de falhas é constante, tem-se a função exponencial como um caso particular.

2.  $\beta > 1$ , a taxa de falhas é crescente. Neste caso, a fase III da curva da banheira pode ser modelada.

3.  $\beta < 1$ , a taxa de falhas é decrescente. Neste caso, a fase I pode ser modelada.



Esta função foi desenvolvida pelo engenheiro sueco Weibull. Os estudos de Weibull eram dirigidos especialmente para confiabilidade. As duas distribuições mais usadas em confiabilidade são a Weibull e a exponencial.

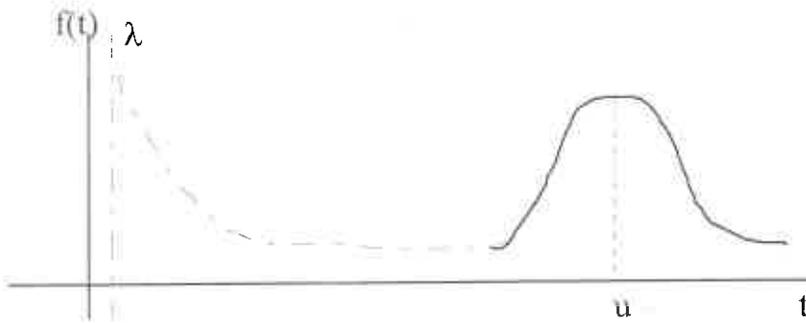
Observa-se que quando  $\beta = 3,5$ , a distribuição Weibull aproxima-se a uma distribuição normal.

### **3.4 - Distribuição Normal**

A distribuição Normal eventualmente é aplicada como uma aproximação para representar a fase III da curva da banheira, onde há o efeito de desgaste.

Os parâmetros desta distribuição são a média  $\mu$  e seu desvio padrão  $\sigma$ . O valor esperado da distribuição Normal  $E(t) = \mu$ . Esta característica corresponde ao tempo médio de vida útil.

Este modelo é apropriado (por aproximação) para o caso em que há o efeito de desgaste. Entretanto não é muito usada em confiabilidade.



A taxa de falhas é crescente com  $t$ . Isto é visto provando-se que  $\lambda'(t) \geq 0$ .

$$\text{Dado: } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}.$$

$$\text{Aplicando-se } \left[ \frac{f(x)}{g(x)} \right]' = \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{(g(x))^2}$$

Obtém-se:

$$\lambda'(t) = \frac{(1 - F)f' + f^2}{(1 - F)^2}$$

O denominador é não negativo para todo  $t$ . Pode-se provar que  $(1 - F)f' + f^2 \geq 0$ .

### 3.5 - Distribuição Gamma

A função densidade relativa a distribuição Gamma é dada pela expressão:

$$f(t) = \frac{t^{\beta-1}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} e^{\left[-\frac{t}{\alpha}\right]}$$

onde:  $\beta$  é o parâmetro de forma e  
 $\alpha$  é o parâmetro de escala.

Se  $(\beta-1)$  é inteiro positivo, então:

$$f(t) = \frac{t^{\beta-1}}{\alpha^\beta (\beta-1)!} e^{\left[-\frac{t}{\alpha}\right]}$$

Obtém-se:

$$R(t) = \sum_{k=0}^{\beta-1} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^k \frac{1}{k!} e^{\left[-\frac{t}{\alpha}\right]}$$

Quando  $\beta = 1$ , tem-se a distribuição exponencial como um caso particular, onde  $\alpha = \text{MTBF}$ .

A distribuição Gamma pode ser aproximada pela normal com  $\mu = \beta\alpha$  e  $\sigma = \alpha\sqrt{\beta}$

#### 4. Manutenibilidade

A seguir são apresentados alguns aspectos relacionados a característica manutenibilidade, especialmente, considerando o contexto de manutenção. Destaca-se as distribuições de probabilidade mais aplicadas e as formas de obtenção desta representação probabilística da manutenibilidade.

Por fim, tendo em vista o aspecto logístico que a manutenibilidade ocupa quando se considera um sistema ao invés de

um equipamento, é desenvolvido um estudo sobre a questão de dimensionamento de sobressalentes.

A Manutenibilidade surgiu dentro do contexto de projeto de equipamentos, tendo como preocupação buscar concepções de projeto que permitissem uma maior facilidade na realização da manutenção ou reparo de um item.

O tempo para reparo é representado por TTR (Time To Repair), que significa tempo para reparo, donde vem a sigla MTTR (Mean Time To Repair), representando o tempo médio para reparo. Para simplificação de notação TTR poderá ser representado por  $t$ .

O conceito formal aplicado é de natureza probabilística. A manutenibilidade de um item no tempo  $t$ , denotada por  $M(t)$ , é definida como a probabilidade de que um item será restaurado para sua condição original de funcionamento dentro de tempo  $T$ , quando procedimentos pré-estabelecidos são executados. Tem-se:

$$M(TTR) = \Pr \{T \leq TTR\}$$

sendo  $T$  o tempo efetivo para realização do reparo.

Tratando-se de um conceito probabilístico, estudos estatísticos são aplicáveis à manutenibilidade. Assim, a função densidade de probabilidade relativa a manutenibilidade pode ser representada por  $f(t)$  e a função distribuição por  $F(t)$ . Tem-se que:

$$M(t) = F(t).$$

A manutenibilidade é importante quando se considera sistemas reparáveis, pois surge a consideração de uma característica mais global de desempenho chamada Disponibilidade. Esta característica representa um aspecto mais agregado e geral do desempenho do item. Um item estará mais provavelmente disponível se tiver uma boa confiabilidade (falhar pouco) e uma boa manutenibilidade (quando falhar seja reparado rapidamente). A disponibilidade  $A(t)$  é definida como a

probabilidade de que um item esteja disponível para uso no instante de tempo  $t$ . Assim, a disponibilidade é uma função da confiabilidade e da manutenibilidade.

#### 4.1 - Distribuições de Probabilidade em Manutenibilidade

A seguir são apresentadas algumas características das principais distribuições de probabilidade aplicadas em manutenibilidade, e portanto, de interesse para a Engenharia de Manutenção.

Para representar o comportamento de manutenibilidade de um item pode-se considerar a variável contínua tempo para reparo. Neste caso de variável aleatória contínua duas distribuições a exponencial e a lognormal são as mais aplicáveis.

##### - Distribuição Exponencial

Esta distribuição tem uma importância grande devido a simplicidade analítica que proporciona, podendo em alguns casos, por aproximação substituir a lognormal.

A função manutenibilidade é dada por:

$$M(t) = 1 - e^{-ut}$$

A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = ue^{-ut}$$

$u$  = parâmetro da função, muitas vezes denominado de taxa de atendimento;  $u = 1/MTTR$ .

$$E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = 1/u = MTTR.$$

### - Distribuição Lognormal

Nesta distribuição tem-se os parâmetros  $u, \sigma$ . Quando  $u \gg \sigma$  a lognormal se aproxima de uma distribuição normal.

Nesta distribuição, se  $t$  é definido de modo que  $x = \ln t$ , então  $x$  segue uma distribuição Normal com parâmetros  $u, \sigma$ . Uma vez que  $t = e^x$ , resultados da lognormal podem ser obtidos através da distribuição Normal. obtém-se:

$$M(t) = F(t) = \Pr \left[ z \leq \frac{\ln t - u}{\sigma} \right]$$

$z$  pode ser obtido na tabela da distribuição Normal.

EXEMPLO: A manutenibilidade de um componente segue uma distribuição lognormal com  $u = 5$  e  $\sigma = 1$ , qual a  $M(150)$ ?

$$M(150) = \Pr \left[ z \leq \frac{\ln 150 - 5}{1} \right] = \Pr(z > 0,01) = 0,496$$

### - Distribuição Normal

A distribuição Normal eventualmente é aplicada como uma aproximação para representar a a função lognormal, conforme já mencionado. Os parâmetros desta distribuição são a média  $u$  e seu desvio padrão  $\sigma$ . O valor esperado da distribuição Normal  $E(t) = \text{MTTR}$ .

### - Distribuição Gamma

A função densidade relativa a distribuição Gamma é dada pela expressão:

$$f(t) = \frac{t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} e^{\left[ -\frac{t}{\alpha} \right]}$$

onde:  $\beta$  é o parâmetro de forma e

$\alpha$  é o parâmetro de escala.

A distribuição Gamma, em alguns casos, pode ser utilizada como uma aproximação da distribuição lognormal. Isto pode permitir algumas facilidades de tratamento analítico.

## **4.2 - Estimação em Manutenibilidade**

A obtenção da função manutenibilidade pode ser obtida através de análise estatística de dados de tempos de manutenção e reparo. Neste caso, se aplica principalmente os métodos de estimação paramétrica. A questão da estimação suscita com frequência problemas de interpretação oriundos de aspectos culturais quanto ao trato da incerteza. Muitas vezes a média de uma amostra de tempos para reparo é considerado como próprio o MTTR, quando este consiste apenas num parâmetro da função  $f(t)$ .

Observar os Capítulos sobre Avaliação de Desempenho de Sistemas, destacando as abordagens determinísticas e probabilísticas na análise de dados

O uso de conhecimento a priori no caso de manutenibilidade é muito apropriado no caso de ausência de dados de tempos de manutenção, ou quando os dados não são adequados, ou ainda, em situações nas quais são efetuadas mudanças na estrutura de manutenção e os dados históricos não representam a realidade atual.

De qualquer forma o processo de utilização de conhecimento a priori dos engenheiros e gerentes ou outros especialistas que detêm um conhecimento significativo sobre a estrutura de manutenção e seu comportamento em relação ao TTR, permite estabelecer e construir um conhecimento a priori sobre a manutenibilidade.

Muitas vezes pode-se assumir hipóteses sobre o comportamento probabilístico da variável TTR, a partir das características e históricos do sistema e, assim, construir o conhecimento a priori sobre o(s) parâmetro(s) da função  $f(TTR)$ .

Para obtenção de  $\pi(MTTR)$  há vários procedimentos aplicáveis. Estes procedimentos são aplicados a um especialista que tenha conhecimento sobre o problema de interesse. No caso de  $\pi(MTTR)$ , sobre na estrutura de manutenção correlata.

Um dos procedimentos para obtenção de conhecimento a priori aplicados em confiabilidade obtém a função densidade de probabilidade a priori Gamma, a partir de informações fornecidas por um especialista, o qual pode ser aplicado à mantenedibilidade. Este procedimento permite a obtenção dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da função densidade Gamma.

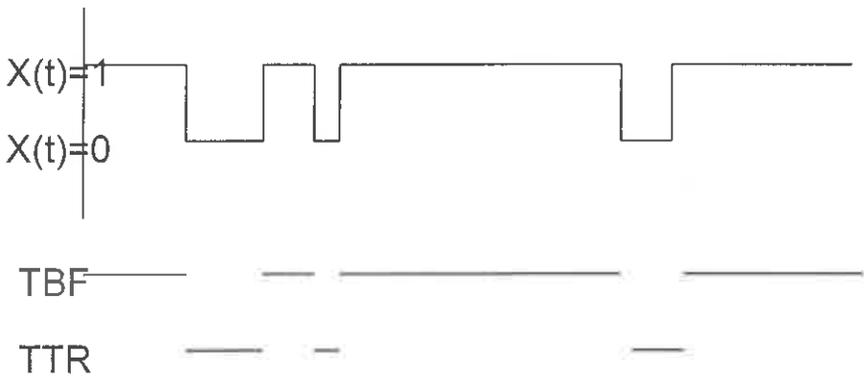
### **4.3 Sistemas Reparáveis**

Um sistema ou item pode ser classificado como reparável ou não-reparável. No primeiro caso esse é reparado ("consertado") após uma falha, voltando a funcionar. Isso se repete por todo o ciclo de vida útil. O item não-reparável é substituído após uma falha sem ser reparado. A figura a seguir ilustra esta diferença.

## SISTEMA NÃO REPARÁVEL



## SISTEMA REPARÁVEL



A seguinte terminologia adotada universalmente é introduzida:

- TTF (time to failure) significa tempo até falhar; está relacionado a um item não reparável. O interesse é apenas nesta primeira falha que leva um tempo TTF.
- TBF (time between failures) significa tempo entre falhas; está relacionado a sistemas reparáveis. No caso, há várias falhas. O tempo médio dos diversos TBF's é denominado MTBF (mean time between failures) também chamado tempo médio entre falhas por vezes também denotado por TMEF.

- TTR (time to repair) significa tempo para reparo; aplicável quando há reparo. o tempo médio é chamado MTTR (mean time to repair) tempo médio de reparo.

Na figura anterior o sistema reparável varia entre dois estados:

1.  $X(t) = 1$  quando o sistema está funcionando
2.  $X(t) = 0$ , quando o sistema está em falha

#### **4.4 - Disponibilidade**

Esta característica é aplicável ao caso de itens reparáveis.

A disponibilidade  $A(t)$  é definida como a probabilidade de que um item esteja disponível para uso no instante de tempo  $t$ . A disponibilidade é uma função da confiabilidade e da manutenibilidade.

Esta característica representa um aspecto mais agregado e geral do desempenho do item. Um item estará mais provavelmente disponível se tiver uma boa confiabilidade (falhar pouco) e uma boa manutenibilidade ( quando falhar seja reparado rapidamente).

No planejamento de sistemas reparáveis é comum se determinar uma combinação da confiabilidade e da manutenibilidade para se obter um dado grau requerido de disponibilidade. Pode-se investir menos em confiabilidade desde que o sistema tenha uma melhor manutenibilidade. Se a manutenibilidade for menor é necessário uma maior confiabilidade.

A disponibilidade é normalmente calculada através da equação seguinte:

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Entretanto, deve-se observar que esta expressão corresponde a um estimador da disponibilidade válido para o caso em que a confiabilidade e a manutenibilidade seguem uma distribuição exponencial.

#### 4.5 - Dimensionamento de Sobressalentes

O problema de dimensionamento de sobressalentes ocorre sempre no planejamento de sistemas onde o ciclo de vida útil é focalizado. Existe uma abordagem de planejamento que enfoca a visualização de um sistema na fase de projeto considerando aspectos de confiabilidade e custos. Esta é denominada Terotecnologia.

O dimensionamento de sobressalentes deve considerar aspectos qualitativos e quantitativos. O primeiro diz respeito principalmente a fatores tecnológicos do equipamento ou sistema em consideração. A questão quantitativa deve considerar aspectos de confiabilidade e de mantanbilidade.

A situação deve ser analisada, inicialmente por tipo de falha, conforme quadro a seguir:

FALHA PRECOCE	⇒	GARANTIA DO FABRICANTE
FALHA CASUAL (VIDA ÚTIL)	⇒	DIMENSIONAR SOBRESSALENTES ALEATÓRIO
FALHA POR DESGASTE (FIM VIDA ÚTIL)	⇒	DIMENSIONAR REPOSIÇÃO PROGRAMADO (QUANTIDADE DE SUBST. PREVENTIVA)

Outro aspecto a considerar está relacionado a situação por tipo de sistema:

- sistemas reparáveis  $\Rightarrow$  dimensionar sobressalentes para cada reparo previsto, considerando que o item é reparável e retornará.
- sistemas não-reparáveis  $\Rightarrow$  dimensionar peças de reposição para cada reparo previsto, considerando que o item não é reparável e não retornará.

O dimensionamento de sobressalentes para o período de vida útil, considera que a quantidade de sobressalentes é função da demanda. Esta é função do número de falhas, que depende da confiabilidade do equipamento. A questão básica é:

como se comporta a variável número de falhas  $x$  em  $T$ ?



No período de vida útil:  $\lambda(t) = \text{constante}$ , tem-se o modelo exponencial. Logo o número de falhas  $\Rightarrow$  processo de Poisson.

As seguintes abordagens podem ser adotadas (ver anexo 3):

- dimensionar quantitativo para um certo risco  $\alpha$ ;
- dimensionar quantitativo, dada uma certa restrição de custo; minimiza-se o risco  $\alpha$  ;
- dimensionar quantitativo maximizando uma função valor (utilidade) que agrega custo e risco  $\alpha$  .

## Bibliografia

- [1] O'Connor, P. D. T.; (1989) Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons, pp.398p. ISBN: 0-471-90551-8.
- [2] Mann, Nancy R.; Schafer, R. E.; Singpurwalla, N. D.; (1974) Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data. John Wiley & Sons, pp.564p.
- [3] Kapur, K. C.; Lamberson, L. R.; (1977) Reliability in Engineering Design. John Wilwy & Sons, pp.586 p. ISBN: 0-471-51191-9.
- [4] Goldman, A. S.; Slattery, T. B.; (1977) Maintainability: A Major Element of System Effectiveness. Robert E. Krieger Publishing Company, ISBN: 0-88275-292-8.
- [5] Carter, A. D. S; (1986) Mechanical Reliability. MacMillan, ISBN: 033313817.
- [6] Barlow, R. E.; Proschan, F.; (1967) Mathematical Theory of Reliability. John Willey & Sons, Inc.
- [7] Almeida, A.T. de; (1987) "Testes de Aceitação de Confiabilidade em Equipamentos Eletrônicos", IV Congresso Ibero-Americano de Manutenção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dez/1987, p.61-72.
- [8] Almeida, A.T. de, (1988) "Dimensionamento de Sobressalentes de Equipamentos Eletrônicos", III Congresso Brasileiro de Manutenção, Salvador-Ba, Set-1988, pp. 184-197.
- [9] Almeida, A.T. de; (1987) "Teoria da Decisão Aplicada em confiabilidade", XX simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Salvador-BA, Nov/1987, pp.333-347
- [10] Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C.de; (1993) Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System. IEEE Trans. Reliability. 42(3)pp.401-407.
- [11] Billinton, R., [1983] - *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, Pitman Advanced Publishing Program.



# AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS: CONCEITOS BÁSICOS

*Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando Menezes Campello de Souza*

## 1. Introdução

A questão da Avaliação de Desempenho de Sistemas muitas vezes representa um problema de difícil solução, pelas dificuldades de se estabelecer a mesma como um mecanismo de apoio à gestão e ao processo decisório. A determinação e uso de índices sempre acarreta dificuldades quanto a efetividade.

A partir destas dificuldades foi desenvolvida uma pesquisa visando um tratamento mais adequado para a questão, resultando numa proposta de metodologia (4). Aspectos conceituais foram inicialmente tratados (5) e a partir dos mesmos foram obtidos critérios para estabelecimentos de índices e níveis de desempenho (7).

A aplicação da metodologia envolveu vários aspectos, tais como reformulação no tratamento da questão de sistemas de informação (6), investimento na formação de recursos humanos a nível de pós-graduação e treinamentos internos visando a conscientização para o pensamento estatístico e a capacitação para uso destas ferramentas.

Na área de Sistemas de Informação além do investimento no desenvolvimento de sistemas, houve um redirecionamento na forma de abordar a questão, incorporando conceitos de Sistemas de Apoio à Decisão (27), e Sistemas de Informação Gerencial -SIG- (28), além de se introduzir uma metodologia apropriada para o

planejamento de SI, incorporando a visão estratégica do negócio e o enfoque de processos (29).

A seguir são estabelecidos os atributos básicos de Desempenho de um Sistema, visualizados por: Disponibilidade, Confiabilidade, Manutenibilidade, Qualidade de Serviço e Custo, concentrando-se principalmente nos três primeiros. Segue-se uma visão global do processo de Avaliação de Desempenho destacando a questão de determinação de níveis e índices de Desempenho.

O procedimento utilizado inclui a obtenção de referenciais de um sistema em operação, através de um estudo desenvolvido sobre dados históricos de manutenção.

É destacada a importância dos métodos estatísticos nesta tarefa, permitindo inferência sobre o verdadeiro estado da natureza, determinando as funções e parâmetros que servem como modelos probabilísticos para a confiabilidade e a manutenibilidade do sistema.

A partir dos referenciais obtidos, expressos através de modelos probabilísticos, são estabelecidos os níveis requeridos também expressos por modelos/ parâmetros. Estes são definidos num processo de discussão e interpretação dos modelos visando os resultados no sistema.

## **2. Avaliação de Desempenho**

A finalidade da Avaliação de Desempenho de Sistemas (ADS) compreende o desenvolvimento das atividades de planejamento e gerenciamento num contexto de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas. Assim, a mesma pode também ser efetuada na etapa de aquisição de equipamentos, através de testes de Desempenho de Qualidade ou testes de fase de planejamento e projeto, onde o problema de dimensionamento de sobressalentes ou de confiabilidade/mantenabilidade, podem ser tratados como problemas de Avaliação de Desempenho, uma vez que a decisão

adotada implicará na obtenção de uma certa eficácia, ou nível de Desempenho do Sistema.

## **2.1 - Atributos de desempenho**

O tratamento do problema de Avaliação de Desempenho deve ser iniciado com o estabelecimento de objetivos. Estes objetivos dizem respeito ao serviço que será prestado pelo Sistema, e correspondem aos requisitos mínimos a serem atendidos com o menor custo possível. Portanto, o Desempenho é tratado como uma relação custo/benefício.

Assim, como atributos de Desempenho podemos relacionar: Disponibilidade (Confiabilidade e Manutenibilidade), Qualidade de Serviço e Custo. Isto, vendo o Desempenho como objetivo ou consequência de um problema. Outro atributo que não é visto neste sentido de consequência, mas está relacionado ao Desempenho é Fatores Humanos.

### **2.1.1 - Disponibilidade**

A disponibilidade  $A(t)$  é definida como a probabilidade de que o sistema esteja disponível em dado instante de tempo  $t$ . Temos uma variável aleatória  $X(t)$ , que representa o estado deste sistema; se  $X(t)=1$  o sistema está em operação no instante  $t$ , e se  $X(t)=0$ , não está disponível. Desta forma, a definição acima implica em  $A(t)=Pr(X(t)=1)$ .

A disponibilidade é uma composição de dois atributos: Confiabilidade e Manutenibilidade.

#### **2.1.1.1 - Confiabilidade**

A confiabilidade  $R(t)$  é definida como a probabilidade de que um equipamento não deixará de operar em um dado intervalo de tempo  $t$ .

Entendemos por falha, uma degradação que ocasiona uma paralisação no funcionamento do equipamento. A característica de anormalidade através de graus de degradação neste funcionamento, em que a operação não é interrompida, mas a variação nos componentes produz uma mudança nas características de funcionamento do sistema além do limite desejável e para o qual foi projetado, é um problema de Qualidade de Serviço.

A frequência na qual as falhas ocorrem é usada como um parâmetro para a formulação matemática da confiabilidade  $R(t)$  e é chamada de taxa de falhas.

Outro parâmetro empregado é o MTBF (Tempo Médio entre Falhas), que no modelo exponencial corresponde ao inverso da taxa da falhas ( $\lambda$ );  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ .

### **2.1.1.2 - Mantenabilidade**

A manutenibilidade  $M(t)$  é definida como a probabilidade de que um dispositivo que tendo falhado, será restaurado para operação efetiva, dentro de um dado período de tempo  $e$ , quando a ação de manutenção é executada de acordo com procedimentos prescritos.

A manutenibilidade está relacionada aos períodos de tempos envolvidos nas ações de restabelecer os equipamentos à operação normal.

Destacamos aqui o TTR, tempo para reparo ou de interrupção devido a falha, a partir do qual se obtém a média MTTR. O MTTR representa o parâmetro da função manutenibilidade.

Analisando o processo de reparo vemos que há uma grande variedade de cursos de ação alternativos para efetuar um reparo, e

este processo sugere que as equipes se esforcem, de forma que grande número de intervenções tenham curto tempo para reparo, enquanto poucos números tenham grandes tempos de reparo. As distribuições mais usadas para descrever frequências de ocorrência de tempos de interrupção são a Exponencial e a Lognormal, tendo uso também a Gama em substituição à Lognormal, por simplicidade algébrica.

A exponencial se aplica aos tipos de equipamentos que requerem ajustes de, relativamente, curta duração e que podem ser colocadas de volta, em operação por rápida substituição.

A Lognormal descreve tipos de equipamentos razoavelmente complexos, onde há poucos TTR's de pouca duração, um grande número de TTR's próximos de um valor modal e um número não significativo acima deste.

## **2.2 - Qualidade de serviço**

A qualidade de serviço é um conjunto de características de desempenho de sistema que está prestando o serviço, dado que este sistema está no estado de funcionamento, isto é, disponível.

## **2.3 - Custo**

A escolha de qualquer ação no Processo Avaliação requer a determinação dos custos envolvidos. Isto implica na necessidade da explicitação clara da estrutura de custos.

O custo na operação/manutenção de um sistema é função de pessoal, reserva técnica, equipamentos de suporte e ferramenta de planejamento.

Uma estrutura de custo para auxiliar a atividade de Avaliação de Desempenho pode ser montada, considerando sub-sistema e equipamento, e tipo de atividade desenvolvida sobre estes equipamentos.

Um aspecto a ressaltar é a característica probabilística muitas vezes associada ao custo, quando tratado neste contexto. Isto ocorre em função de sua relação a fatores aleatórios. A referência (9) apresenta formulação e solução de um problema relativo a esquema de platão/sobreaviso de equipes de manutenção e de transportes. Neste problema o custo depende do comportamento dos equipamentos e dos tempos relativos a tarefas de manutenção, sendo assim, a sua estimativa é de ordem probabilística.

#### **2.4 - Fatores humanos (emprego)**

Esta característica é própria em sistemas integrados de Homens e Máquinas, onde há interação oriunda do próprio emprego dos equipamentos pelo pessoal que opera e mantém. Esta interação pode ocasionar um erro humano, que podemos exemplificar com o caso em que um técnico de manutenção ao trocar um componente elétrico (resistor) especificado com a potência de 100 Watts, substitui o defeituoso por um de 50 Watts. Isto poderá acarretar um funcionamento inadequado afetando a qualidade de serviço ou no caso mais freqüente outra falha. Neste caso, a falha observada não é função do nível de confiabilidade do equipamento, e assim, este efeito deve ser considerado.

A engenharia de fatores humanos é o projeto de equipamentos, ambiente de trabalho e métodos de trabalho em acordo com as potencialidades e limitações humanas. Os especialistas desta área se preocupam com: características de ambiente de trabalho, além de outros fatores que interagem com o desempenho do pessoal.

### **3. Atividades Básicas no Desenvolvimento da Avaliação de Desempenho**

No desenvolvimento da ADS pode-se, em função do objetivo, efetuar três atividades básicas, descritas a seguir:

- **Determinação do Estado do Sistema:** consiste no estabelecimento de valores que exprimem o estado real do sistema, ou melhor, a partir de dados históricos observados ao longo de um período representativo obtém-se valores estimativos que se aproximem do estado real do sistema. A finalidade desta atividade é descrever o sistema.
- **Acompanhamento Periódico do Sistema:** consiste em saber como está o comportamento do sistema, em dado instante, com base em um período de observação anterior. É desenvolvido de forma sistematizada e periódica.
- **Tratamento de Problemas Decisórios:** corresponde à tomada de decisão diante de problemas no contexto de ADS. A mesma pode ser desenvolvida a partir das duas anteriores, ou para casos específicos. Neste caso, a função ADS é desenvolvida num processo de transformação de informação em ação, de modo que a escolha de um determinado nível de desempenho a ser obtido do sistema.

#### **3.1 - Abordagens em cada atividade**

Cada uma destas atividades pode ser tratada através de duas abordagens, as quais diferem entre si essencialmente na forma de tratamento dos dados.

Neste artigo destacaremos a abordagem probabilística, considerada de maior valor. Na realidade, do ponto de vista técnico, a abordagem adequada é a probabilística. Entretanto, devido a problemas de formação adequada (envolvendo conhecimento de fundamentos de probabilidade, estatística e

confiabilidade) no meio profissional que atua na área de engenharia, de uma forma geral, empregamos este artifício de incorporar a abordagem determinística (assim denominamos para distinguir dos procedimentos que não usam visão ou interpretação estatística adequada). A seguir a descrição de ambas.

### **3.1.1 - Abordagem determinística**

Neste caso, faz-se uso de indicadores. Do ponto de vista do usuário implica na manipulação de índices numéricos representando as amostras de dados coletadas em dado período. Na visão técnica, corresponde às estatísticas descritivas obtidas a partir de dados coletados em dado período e não são do ponto de vista estatístico representações testadas em significância e consistência, podendo ser tendenciosas. Apresentam apenas uma síntese de seu comportamento em dado período, sem considerar a natureza aleatória deste comportamento. Devido a todas estas restrições de caráter técnico, não permitem um apoio mais consistente nas decisões, a não ser quando se trata de casos com grande volume de dados observados. Ou mesmo em situações tão óbvias que nem os dados seriam necessários. Para o usuário, os indicadores permitem algumas utilizações diversificadas, e pela sua natureza qualitativa são fáceis de serem manipulados, exercendo grande atrativo. *Tão atrativo quanto perigoso.*

### **3.1.2 - Abordagem probabilística**

Neste caso não se utiliza indicadores. Todo o tratamento é desenvolvido sobre os dados, como coletados originalmente. Inclusive a coleta, obtenção e organização dos dados deve ser cuidadosamente observados. Do ponto do vista do usuário a informação é apresentada de forma mais objetiva. Entretanto, em alguns casos requer conhecimento especializado. O emprego de métodos estatísticos, e de otimização permitem uma abordagem quantitativa, a partir de critérios e técnicas consolidadas para este

fim. Em função do objetivo podem ser desenvolvidas: Inferência, Testes de Hipótese ou Aderência em dados de um período, ou uso de modelos de decisão. O primeiro requer conhecimento especializado do usuário na execução e na interpretação. Os outros podem ser sistematizados, não requerendo conhecimento especializado.

#### **4. Determinação do Estado do Sistema**

Nesta atividade, a preocupação é unicamente voltada para o estabelecimento de estimativas que representam o comportamento do sistema ao longo do tempo, assumindo condições de regime permanente. Após a determinação do estado do sistema com respeito aos vários equipamentos e centros de manutenção, pode-se como resultado efetuar comparação entre os mesmos.

##### **4.1 - Abordagem determinística**

Neste caso o uso de indicadores obtidos a partir de grande massa de dados são assumidos como representativos do estado do sistema.

##### **4.1.1 - Confiabilidade**

É apresentada pelo indicador "Taxa de falhas observada" ( $\lambda$ ), na forma de índice de falhas correspondente ao número de falhas no período de observação relacionado ao número de itens observados. Este procedimento é um erro lamentável e comum.

##### **4.1.2 - Mantenabilidade**

É apresentada na forma de tempos médios no período de observação e outras estatísticas descritivas, como desvio padrão da amostra e mediana.

## **4.2 - Abordagem Probabilística**

Nesta abordagem, esta atividade é denominada de Inferência Estatística. É consolidada através de testes de consistência nos dados, e testes de tendências dos estimadores empregados.

Neste caso é possível estabelecer as funções confiabilidade para os equipamentos e as funções manutenibilidade, que descrevem as estruturas de manutenção das empresas ou centros regionais de uma mesma empresa. Destaca-se aqui o uso de modelos ao invés de indicadores.

### **4.2.1 - Função Confiabilidade**

No caso em que a função é exponencial, há apenas um parâmetro denominado de taxa de falhas.

O tratamento nesta abordagem é de naturezas interativa e não sistematizada, e requer o conhecimento de técnicas especializadas. Em função destes aspectos, não será descrito com nível detalhes, considerando também que para sua implementação não requer desenvolvimento de software, uma vez que podem ser usadas uma das ferramentas de software já disponíveis para esta finalidade.

Apresentamos a seguir os dados necessários. Há duas opções:

- Função discreta, utilizando os números de falhas em períodos consecutivos: exemplo o número de falhas mensais ao longo de 4 anos, correspondendo a uma amostra de 48 pontos.
- Função contínua, utilizando os tempos entre falhas (TEF) ao longo de um período de observação, na ordem de ocorrência. TEF 1, TEF 2, ...TEFn.

As seguintes informações básicas são obtidas para cada família de equipamento, ou itens, ou equipamento: função estimada, valores dos parâmetros e nível de significância.

Esta informação é utilizada como referencial para o acompanhamento periódico do sistema. Na análise ela permite comparar o desempenho de equipamentos diferentes, com uma noção clara do nível de precisão da informação. Através do tipo de função pode-se verificar algumas características do equipamento: a) se está sujeito a desgaste (Weibull, fator de forma  $\beta > 1$ ) ou não (exponencial, ou Weibull, com fator de forma  $\beta = 1$ ); b) se está sujeito a falhas precoces de fabricação/projeto (Weibull, fator de forma  $\beta < 1$ ). Outro resultado importante é o de subsídio para estudos de filosofias de manutenção diferenciadas decorrente do tipo de função confiabilidade.

No caso de função exponencial não se deve aplicar preventiva para prevenção de falhas, apenas para qualidade de serviço. No caso de função Weibull, com fator de forma  $\beta < 1$ , é interessante desenvolver um programa de prevenção de falhas, podendo-se obter a periodicidade a partir dos parâmetros.

#### **4.2.2 - Função Mantenedibilidade**

No caso em que a função é exponencial o parâmetro da mesma é a taxa de atendimento  $u$ , cujo inverso é o TMRP (parâmetro denominado tempo médio para reparo);  $u = \frac{1}{TMRP}$ .

Para cada tempo particular de interesse (tempo para reparo = TPR, TP, TD, TE, etc.), utiliza-se todos os valores observados num período agrupado seqüencialmente na ordem de sua ocorrência.  $XX_1, XX_2, XX_3, \dots, XX_n$ , onde  $XX = TPR$  (Tempo para Reparo) ou  $TP$  (Tempo de Preparação) ou  $TD$  (Tempo de Deslocamento) ou  $TE$  (Tempo de Eliminação).

O relatório é estruturado por centro de manutenção, ou grupo de serviço, ou usuário, ou subsistema, ou global, conforme seja o nível hierárquico de interesse. As funções são estimadas para cada tipo de tempo: TPR, TP, TD e TE. Esta informação é referencial para o acompanhamento periódico do sistema. Para análise é desenvolvida a comparação entre o estado de cada centro com respeito à estrutura de manutenção. Esta informação permite comparações devido à explicitação de seu nível de precisão. A comparação pode ser feita sobre dois aspectos: a) quantitativo, quanto maior o parâmetro menor o nível de desempenho, no caso de mesmo tipo de função; b) qualitativo, para funções diferentes, filosofias diferentes, a função exponencial pode indicar um desempenho melhor do que no caso da lognormal.

#### **4.2.3 - Disponibilidade**

A partir das duas funções anteriores é obtido o estimador da Disponibilidade. É importante destacar que este estimador muda quando muda a função confiabilidade ou manutenibilidade. O Estimador a seguir deverá ser aplicado apenas no caso em que a confiabilidade e a manutenibilidade são modelos exponenciais:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + TMPR}$$

### **5. Acompanhamento Periódico do Sistema**

A questão da periodicidade pode se tornar crítica nesta atividade da ADS. Esta deve ser determinada a partir da consideração de dois aspectos básicos: a necessidade do usuário e as restrições de amostragem. A primeira estabelece um limite superior, a partir do qual o acompanhamento feito pelo usuário começa a ficar crítico. A segunda estabelece o limite inferior, a partir do qual a amostra não tem representatividade.

## **5.1 - Abordagem Determinística**

Neste caso, os dados coletados em dado período são representados através dos índices, a partir da estatística descritiva (médias, medianas, desvio padrão, etc.), sem confirmação em testes estatísticos e desconhecendo-se o nível de precisão.

## **5.2 - abordagem probabilística**

Do ponto de vista do usuário, permite maior segurança/fidelidade de informação. Outro aspecto importante é não requerer conhecimento especializado. Possibilita uma abordagem gerencial mais objetiva.

Do ponto de vista técnico, apresenta mais segurança na informação apresentada a qual é tratada com métodos estatísticos apropriados. Através de Testes de Aderência pode-se verificar se dados observados em um período de acompanhamento pertencem a um modelo probabilístico. Estes modelos podem ser estabelecidos a partir do exposto no sub-item 4.2, ou adotando-se especificações de fabricante/projeto.

Outro procedimento a ser aplicado em casos especiais é o Teste de Hipótese.

Quanto aos relatórios as comparações podem ser estatisticamente feitas com o nível de precisão explicitados.

Os dados do período serão confrontados com referencial, de modo a acompanhar o comportamento do sistema. Este referencial poderá ser a função estimada pelos procedimentos do sub-item 4.2 ou metas a serem estabelecidas a partir da função estimada.

### **5.2.1 - Confiabilidade**

O modelo usado como referencial poderá ser o exponencial com MTBF especificado pelo fabricante. Este critério será sempre usado no caso de novos equipamentos. O Teste de Aderência

verifica se os dados observados em um curto período se ajustam ao modelo estabelecido. Estes dados podem ser apresentados como variável discreta (número de falhas-n) ou contínua (tempo entre falhas-TEF).

No caso de se utilizar o número de falhas o período de observação deve ser subdividido e a mostra consistente nos números de falhas (n) observados nestes subperíodos. Será considerado período de observação de um (01) ano, com 12 subperíodos (mês). Assim a mostra consiste de 12 observações.

Os relatórios apresentam informações de forma objetiva. São apresentados os itens cujos dados confirmam comportamento de acordo com referência e nível de significância do teste. Outra informação consiste na relação dos equipamentos/itens, cujos dados indicam comportamento diferente do referencial com nível de significância do teste.

A preocupação deverá se concentrar apenas nos equipamentos que apresentam comportamento diferente do modelo. Nestes casos será procedida investigação mais detalhada ou análise/justificativas do desvio.

### **5.2.2 - Mantabilidade**

O modelo usado como referencial poderá ser aquele estabelecido no projeto ou obtido por metas de desempenho. Será desenvolvido um Teste de Aderência, para verificar se os dados observados em um dado período, indicam que a estrutura de manutenção está se comportando regularmente conforme o modelo referencial ou se houve comportamento diferente. Um relatório gerencial indica os centros de manutenção que apresentam comportamento diferente, permitindo efetuar uma investigação dirigida. Não há portanto preocupação com os outros casos considerados dentro dos modelos pelos testes estatísticos, mesmo que os indicadores induzam a uma opinião diferente.

O Teste de Aderência aplicado pode ser baseado no teste de Kolgomorov-Smirnov.

Os relatórios apresentam as seguintes informações:

- relação dos grupos (centro de manutenção, grupo de serviço, equipe, etc.) cujos dados indicam que o comportamento da manutenção mudou, com nível de significância do teste.
- Nível de significância do teste para os grupos que continuam com o comportamento dentro do modelo.

A preocupação se concentra sobre os casos fora do modelo. Verifica-se as causas e conseqüências do desvio, para indicar ações necessárias.

## **6. Tratamento de Problemas Decisórios**

Corresponde à tomada de decisão (escolha de uma ação) diante de problemas no contexto de Avaliação de Desempenho de Sistemas. Essa atividade pode ser desenvolvida a partir da observação de resultados indesejados obtidos nas duas atividades anteriores ou para casos específicos. Desta forma a função Avaliação de Desempenho de Sistemas é desenvolvida num processo de transformação da informação em ação, de modo que a escolha de um determinado curso de ação acarrete um determinado nível de desempenho a ser obtido do sistema.

A parte quatro deste livro apresenta alguns capítulos sobre modelos de decisão para efeito de ilustração.

## **7. Conclusões**

A questão básica de estabelecimento, uso e análise de índices na manutenção é função dos critérios que se adotam. Tem havido muita dificuldade em várias organizações quanto ao procedimento e critérios adequados na realização desta missão, importante na gestão da manutenção.

O caminho adequado começa pela análise da manutenção enfocada por processo. O estudo dos processos é o ponto de partida. Estabelecidos os seus resultados, obtém-se os itens de controle adequados. A natureza do processo tem que ser considerada: se probabilística ou determinística.

A recomendação básica para o aprofundamento da questão passa pela formação adequada dos profissionais que atuam na área de qualidade.

Por fim é importante observar o alerta da referência (30), pelo editor de uma das principais revistas técnico-científicas da área de manutenção e confiabilidade. Tem se dado muita ênfase ao ato de medir e não ao de fazer. Isto não significa que não se deve medir. Na realidade, já há uma grande deficiência na maioria das organizações no Brasil quanto a medição. Pouco se mede sobre os processos, e é necessário medir. Entretanto, mesmo assim, o estudo alerta que muito se tem medido e pouco se faz. Observa-se que tem havido muita ênfase em se medir fatores que pouco representam e talvez por isto pouco se pode fazer. É necessário maior critério na forma de se estabelecer o que se vai medir. O estabelecimento dos índices tem que ser realizado adotando-se uma metodologia adequada, inclusive conectada com uma abordagem adequada para Sistemas de Informação.

## **Bibliografia**

- [1] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1985] – *Desenvolvimento de uma Metodologia de Avaliação de Desempenho de Sistemas de Telecomunicações*. III SNTTEE – Seminário Nacional de Telecomunicações das Empresas de Energia Elétrica; 22-24/out/1985; Curitiba-PR: 1-25
- [2] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] – *Pesquisa Operacional Aplicada na Avaliação de Desempenho*. VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica; Mai/1986; São Paulo-SP: SP/GTL/02

- [3] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] – *Bayes-Like Decisions in Reliability Engineering. International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*; June 30-July 4, 1986; Paris-France. Paris 87-90
- [4] Almeida, A. T., [1986] - *Avaliação de Desempenho de Sistemas*, Publicações Técnicas CHESF
- [5] Almeida, A. T., [1987] - *Aspectos Conceituais Considerados na Avaliação de Desempenho de Sistemas*, IX SNPTEE, Belo Horizonte, MG.
- [6] Almeida, A. T., [1987] - *Sistema de Informação para o Planejamento e Gerenciamento da Operação e Manutenção de Sistemas de Telecomunicações*, IX SNPTEE, Belo Horizonte, MG.
- [7] Almeida, A. T., [1989] - *Critérios para Estabelecimento de Índices e níveis de Desempenho Operacional*, X SNPTEE, Curitiba, PR
- [8] Almeida, A. T. ; Bohoris, G. A. e Souza, F. M. C. de, [1992] – *Management Information and Decision Support System in the Maintenance of a Telecommunication System*. European Safety & Reliability Conference; 10-12 June 1992; Copenhagen – Denmark. London: Elsevier Applied Science; 1992; pp. 23-31; ISBN: 1 85166 875 6.
- [9] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1993] – *Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System*. IEEE Trans. On Reliability; Sep 1993-42(3): 401-407.
- [10] Almeida, A. T. ; MENEZES, Hélio Burle e COSTA, Ana Paula C. S., [1995] - *Critérios para Estabelecimento, Uso e Análise de Índices na Manutenção sob a Ótica de Gestão de Qualidade Total* , XIV SNPTEE , Camboriú, SC
- [11] Almeida, A. T. e Bohoris, G. A., [1996] – *Decision Theory in the Maintenance Strategy of a Standby System with Gamma Distribution Repair Time*. IEEE Transaction on Reliability, June 1996, vol 45, n2, pp. 216-119

- [12] Anderson, H., [1996] - *Use of Preventive Maintenance and System Performance Data to Optimize Scheduled Maintenance Interval* , 49th Annual Conference for Protective Relay Engineers
- [13] Billinton, R., [1983] - *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, Pitman Advanced Publishing Program.
- [14] Carter, A. D. S., [1986] - *Mechanical Reliability* , MacMillan.
- [15] Chiavenato, Idalberto, [1987] - *Administração de Empresas*, McGraw-Hill
- [16] Davenport, Wilbur B., [1987] - *Probability and Random Process*, McGraw-Hill, Inc.
- [17] Garvin, D. A., [1995] - *Gerenciando a Qualidade*, Qualitymark Editora.
- [18] Goldman, A. S., [1977] - *Maintainability: A Major Element of System Effectivness*, Robert E. Krieger Publishing Program.
- [19] Ishikawa, Kaoru, [1993] - *Controle de Qualidade Total*, Editora Campos
- [20] Kapur, K. C., [1977] - *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Lapponi, Juan Carlos, [1997] - *Estatística usando Excel 5 e 7*, Lapponi Treinamento e Editora Ltda.
- [22] Melo, C. S. L.; Sousa, J. J. L. e Almeida, A. T. de, [1997] - *Uso de Conhecimento a Priori no Dimensionamento de Sobressalentes Baseado no Risco de Quebra de Estoques*; XXIX SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional; Salvador-BA, 22-24/Outubro/1997, pp. 58-59
- [23] O'Connor, P. D. T., [1985] - *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd.
- [24] Smith, A. M., [1992] - *Reliability-Centered Maintenance*, McGraw-Hill, Inc.

- [25] Sousa, J. J. L.; Almeida, A. T. e Melo, C. S. L., [1997] – *Procedimentos Estatísticos na Avaliação de Desempenho de sistemas na CHESF*; XXIX SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional; Salvador-BA, 22-24/Outubro/1997, pp. 116-117
- [26] Teboull, J., [1992] - *Gerenciando a Dinâmica da Qualidade*, Qualitymark Editora.
- [27] ALMEIDA, A. T. de; STEINBERG, H.; BOHORIS, G. A.; (1991) A Decision Support System in the Management of a Telecommunication Network. IFORS First Specialized Conference on Decision Support System. 27-29 March 1991; Bruges-Belgium; 4.F11.Cpp.67.
- [28] ALMEIDA, A. T. de; BOHORIS, G. A.; SOUZA, F. M. C. de; (1992) Management Information and Decision Support System in the Maintenance of a Telecommunication System. European Safety & Reliability Conference. Elsevier Applied Science, 10-12 June 1992; Copenhagen-Denmark; pp. 23-31. ISBN: 185166 875 6.
- [29] ALMEIDA, A. T. de; BOHORIS, G. A.; STEINBERG, H.; (1992) Management Information and Decision Support System of a Telecommunication Network. Journal of Decision Systems. 1 (2-3) pp. 213-241.
- [30] EVANS, R. A. ; (1993) Measure vs. Make. IEEE Trans. On Reliability. 42 (4) pp. 541.



**PARTE II**  
***MÉTODOS DE GESTÃO***

---

---



# PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS

*Joel de Jesus Lima Souza*  
*José Carlos da Silva*  
*Adiel Teixeira de Almeida*

## **1 - Introdução**

Em nenhuma época do Século XX a competição entre mercados - nacionais e internacionais - chegou a níveis tão extremos como na atualidade. Onde existem concorrentes, há competição propondo o ganho e a satisfação do cliente, ampliando assim a participação no mercado e garantindo a sobrevivência da empresa. Equipamentos parados em momentos inoportunos podem significar perdas irrecuperáveis perante um concorrente num momento em que o mercado procura o produto. Dentro deste contexto a manutenção deixou de ser uma atividade qualquer para se tornar uma autêntica ciência face à sofisticação de instalações, máquinas e equipamentos cada vez mais envolvidos por sistemas eletro-eletrônicos com grau de complexidade e exigências de qualidade crescentes. Gerenciar corretamente esses modernos meios de produção exige conhecimentos de métodos e sistemas de Programação, Controle e Execução tão ou mais eficientes que os próprios equipamentos sob verificação (Tavares, 1996).

## **2 - Histórico**

Controle de Qualidade nasceu da produção em massa de diferentes componentes de um produto e de sua montagem em linha, portanto, da necessidade de fabricar peças padronizadas e

intercambiáveis. No final do século passado Frederick W. Taylor (1856-1915), considerado o fundador da moderna Teoria da Administração, tinha como preocupação original tentar eliminar o fantasma do desperdício e das perdas sofridas pelas indústrias americanas e elevar os níveis de produtividade através da aplicação de métodos e técnicas da engenharia industrial. A técnica para se chegar ao método racional era o *estudo de tempos e movimentos* (MTS: *motion-time study*), onde as tarefas mais complexas eram subdivididas em atividades mais simples e estas em movimentos elementares para facilitar sua racionalização e padronização. Outras abordagens surgiram para enriquecer o taylorismo até se chegar ao *Controle de Qualidade* que incluiria instrumentos, aparelhos de medição e métodos estatísticos de amostragem com a finalidade de enfrentar uma produção cada vez maior, principalmente durante a Segunda Guerra Mundial, quando o exército americano desenvolveu o procedimento denominado “*military standard*” baseado no *Nível de Qualidade Aceitável*: tratava-se da percentagem máxima de elementos defeituosos que poderia ser considerada satisfatória, como característica média da qualidade apresentada. Com o surgimento do ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Action), que pode ser visto como uma forma de desenvolver a Avaliação de Desempenho de Sistemas, os procedimentos gerenciais tomaram novos rumos.

Segundo Ishikawa (1992) o ciclo PDCA de controle pode ser utilizado para manter as atuais conquistas (tido como cumprimento dos padrões já estabelecidos - *fase de manutenção*) ou para melhorar as “diretrizes de controle” de um processo. (tido como um salto de qualidade no processo onde o plano consta de uma meta que é um valor definido - *fase de melhorias*). O caminho do sucesso para obter melhorias contínuas nos processos é o de conjugar os dois tipos de gerenciamento: *manutenção e melhorias*. Equipes de manutenção, propriamente ditas, utilizam o ciclo PDCA mais ligado à *fase de*

*manutenção*, enquanto que a grande função gerencial é estabelecer novos níveis de controle que garantam a sobrevivência da empresa atuando no ciclo PDCA na *fase de melhorias*.

### **3 - Processo de Avaliação de Desempenho de Sistemas**

Segundo Almeida (1986) avaliação de desempenho é a função da Engenharia de Manutenção/Operação que permite, além da análise de dados do sistema e do estabelecimento de diagnósticos, a escolha de um curso de ação a ser adotado sobre este sistema de modo a otimizar o seu desempenho. Podemos encontrar outras terminologias para designar avaliação de desempenho, como sejam, Controle de Qualidade, Avaliação de Eficácia, etc. Tendo em mente alguns atributos de desempenho do sistema (Confiabilidade, Manutenibilidade, Qualidade de Serviço, Custo, Fatores Humanos), o processo de Avaliação de Desempenho de Sistemas deve ser iniciado com o estabelecimento de objetivos que dizem respeito ao serviço que será prestado pelo sistema, tendo em mente sempre a qualidade deste serviço e o custo envolvido para manter essa qualidade. Vemos assim, claramente, que o desempenho é tratado como uma relação custo/benefício e pode ser visto como um problema de decisão com um tratamento mais formal. Na ótica da Teoria da Decisão podemos dizer que uma boa decisão é uma função lógica de três elementos básicos: daquilo que “se quer”; daquilo que “se pode fazer” e daquilo que “se sabe”. Aquilo que “se quer” corresponde aos objetivos (Meta) e refere-se às preferências do decisor sobre as conseqüências que advirão da ação adotada, isto é, a desejabilidade com relação aos diversos níveis de desempenho que podem ser obtidos. Dessa forma, o Processo de Avaliação consiste em escolher um determinado curso de ação a ser adotado sobre o sistema de modo a se obter a melhor conseqüência, isto é, o melhor desempenho e, para isto, toma-se

proveito do conhecimento que se tem da incerteza existente sobre o estado da natureza, ou seja, sobre a verdadeira condição em que o sistema se encontra.

Na figura 1 temos uma representação da Avaliação de Desempenho de Sistemas com seus elementos básicos, onde se pode ver claramente cada fase do Ciclo PDCA.

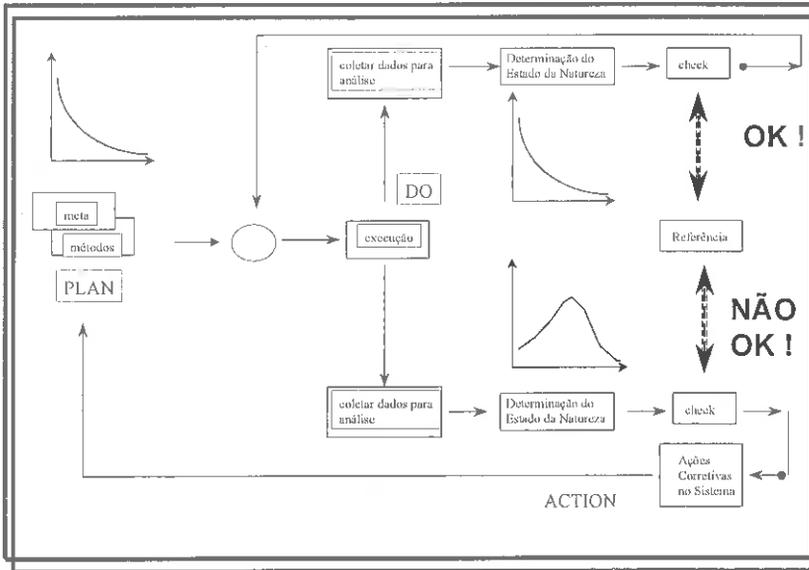


Fig. 1 - Representação ADS

#### 4 - Desenvolvimento da Avaliação de Desempenho de Sistemas

Para o desenvolvimento da Avaliação de Desempenho de Sistemas três atividades, em função do objetivo, podem ser efetuadas. As mesmas compõem um ciclo que permite um diagnóstico, verificação e ação contínua sobre o sistema. São elas:

#### **4.1. Determinação do Estado do Sistema**

Consiste no estabelecimento de valores que expressem o estado real do sistema, ou seja, a partir de dados históricos observados ao longo de um período representativo obtém-se valores estimados que se aproximam do estado real do sistema. O objetivo desta atividade é descrever o sistema, ou seja, estabelecer estimativas que representem o comportamento do sistema ao longo do tempo, assumindo condições de regime permanente.

#### **4.2. Acompanhamento Periódico do Sistema**

Consiste em saber como está o comportamento do sistema, em dado instante, com base em um período de observação anterior (referencial estabelecido na atividade de Determinação do Estado do Sistema). É desenvolvido de forma sistematizada e periódica. A figura 2 ilustra o ciclo PDCA adaptado ao contexto de Avaliação de Desempenho de Sistemas (Almeida et al, 1995).

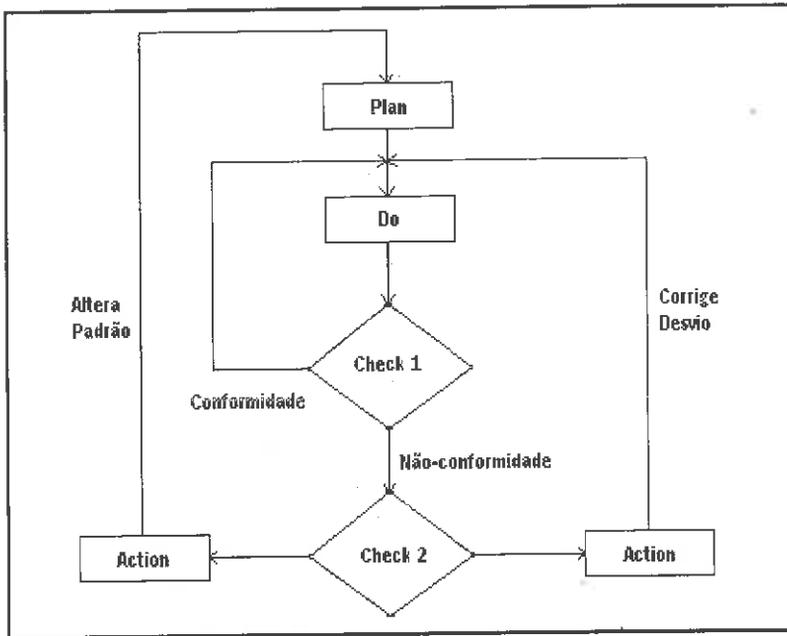


Fig. 2 - Ciclo PDCA adaptado à ADS

### 4.3 - Tratamento de Problemas Decisórios

Corresponde à tomada de decisão (escolha de uma ação) diante de problemas no contexto de Avaliação de Desempenho de Sistemas. Essa atividade pode ser desenvolvida a partir da observação de resultados indesejados obtidos nas duas atividades anteriores ou para casos específicos. Desta forma a função Avaliação de Desempenho de Sistemas é desenvolvida num processo de transformação da informação em ação, de modo que a escolha de um determinado curso de ação acarrete um determinado nível de desempenho a ser obtido do sistema.

#### 4.4 - Fluxograma das Atividades

Existe um relacionamento dinâmico envolvendo as atividades básicas que compõem a Avaliação de Desempenho de Sistemas. Este relacionamento é mostrado no fluxograma apresentado na figura 3.

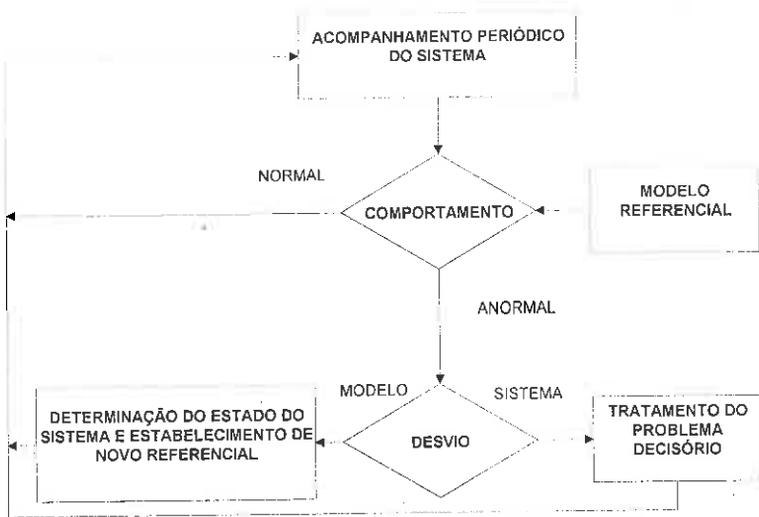


Figura 3 – Fluxo de Atividades na Avaliação de Desempenho de Sistemas

Cada uma das três atividades mencionadas pode ser tratada através de duas abordagens, as quais diferem entre si essencialmente na forma de tratamento dos dados:

- **Abordagem Determinística:** Neste caso são utilizados indicadores. Do ponto de vista do usuário, implica na utilização de índices numéricos representando as amostras de dados coletados em dado período. Na visão técnica, corresponde às estatísticas descritivas, que por não serem testadas em

significância e consistência podem ser tendenciosas. Por causa destas restrições não permitem um apoio mais consistente nas decisões, a não ser quando se trata de casos com grande volume de dados e onde a natureza do problema investigado indica tendência acentuada nos dados observados.

- **Abordagem Probabilística:** Neste caso não se utilizam indicadores; todo tratamento é desenvolvido sobre os dados, como coletados originalmente. Do ponto de vista do usuário a informação é apresentada de forma mais objetiva. Esta abordagem requer o emprego de métodos estatísticos e de otimização, envolvendo conhecimento especializado na execução e interpretação. Neste tipo de abordagem os problemas de interpretação incorreta são evitados, bem como a noção de precisão é introduzida, permitindo um processo decisório mais seguro.

## 5 - Confiabilidade

A confiabilidade está relacionada com as falhas nos equipamentos e expressa a probabilidade de que um determinado equipamento opere, com sucesso, por um período de tempo especificado e sob condições de operação também especificadas. Quantitativamente a confiabilidade pode ser especificada como sendo o número médio de falhas num dado período de tempo, ou como sendo o *tempo médio entre falhas* (MTBF), para itens que podem ser reparados e recolocados em operação, ou como o *tempo médio para falhar* (MTTF), para itens não reparáveis. Nos casos de equipamentos ou sistemas compostos de componentes eletrônicos freqüentemente assumimos que estas falhas ocorram em uma taxa constante denominada *taxa de falhas*, representada pela letra grega  $\lambda$ , onde  $\lambda=(\text{MTBF})^{-1}$ , quando o equipamento for reparável, ou  $\lambda=(\text{MTTF})^{-1}$ , quando o mesmo for descartável. Neste caso a

característica probabilística da confiabilidade pode ser representada pela distribuição de probabilidade exponencial com parâmetro  $\lambda$ .

A confiabilidade pode ser vista como uma função de *dependabilidade* - a certeza de que o sistema sempre operará quando solicitado - e *segurança* - a certeza de que o sistema nunca operará incorretamente para qualquer condição. Infelizmente, de acordo com Anderson (1996:p3), estes dois aspectos da confiabilidade não são compatíveis já que um acréscimo na segurança tende a um decréscimo na dependabilidade, e vice-versa.

Mesmo que as condições permaneçam constantes com o tempo, a *taxa de falhas*  $\lambda(t)$  muda durante a vida do equipamento. Desde os primeiros estudos sob confiabilidade, os quais envolveram componentes eletrônicos, foi constatado que o tempo de vida de muitos itens poderia ser subdividido em três períodos, sendo representado pelo gráfico denominado de “curva da banheira”.

## **6 - Confiabilidade versus Qualidade**

Freqüentemente ouvimos consumidores usando o termo *Qualidade* para referir-se a *Confiabilidade*. A qualidade de um serviço pode ser definida como a capacidade de garantir a completa satisfação do consumidor ou usuário. Todavia, a satisfação do consumidor ou usuário para com um determinado serviço será baseada em mais de uma característica do mesmo. Por conseguinte, *Qualidade é: a totalidade de características e fatores de um produto, processo ou serviço que sustenta a capacidade de satisfazer um estado ou uma necessidade subentendida*. Confiabilidade, por sua vez, pode ser entendido como a ausência de falhas de um equipamento ou sistema durante a execução de uma determinada missão, sendo definida como a probabilidade de que este equipamento ou sistema continue operando dentro de suas especificações, sobre um dado período de tempo, sujeito a determinadas condições ambientais. É comum encontrar-se na

literatura que “*a confiabilidade é a projeção da qualidade no tempo*”. Um equipamento somente tem alta qualidade se o mesmo apresentar alta confiabilidade. Todavia, o oposto não é verdadeiro; um equipamento com alta confiabilidade não significa, necessariamente, que tenha alta qualidade.

## **7 - Manutenibilidade**

A manutenibilidade está relacionada ao tempo para eliminar a falha, ou seja, à probabilidade de que um sistema volte à sua condição normal de operação dentro de um certo período de tempo e sob condições estipuladas de manutenção. Dada a sua natureza probabilística a manutenibilidade pode ser medida através de uma determinada distribuição de probabilidade. A manutenibilidade, assim como a confiabilidade, tem sua característica definida na fase de projeto e instalação, o que torna possível alcançar objetivos operacionais com o mínimo de desperdício de ações inerentes à manutenção, como homem-hora gasto, treinamento, tempo de preparação, tempo de deslocamento, tempo de localização, etc., tudo sob condições ambientais de operação na qual a manutenção, programada ou não, será realizada. Isto torna a manutenibilidade um pouco complexa para ser estudada como uma ciência, dada a variedade e quantidade de parâmetros envolvidos. A manutenibilidade pode ser quantificada, segundo O'Connor (1985), como o tempo médio para reparo (MTTR), sendo que este tempo para reparo inclui várias atividades, usualmente divididas em três grupos: **Tempo de Preparação** (tempo para selecionar equipe, ferramentas e equipamentos de teste, tempo de viagem, etc); **Tempo de Manutenção Ativa** (execução do trabalho propriamente dito) e **Tempo Logístico** (espera por sobressalentes, etc., após o início do trabalho). O tempo total de paralisação para manutenção de um equipamento, quando uma falha ocorre, varia estatisticamente e as distribuições mais comumente usadas para descrever este tempo são a exponencial negativa, a lognormal e Weibull. A distribuição gama

está recebendo crescente atenção como uma substituta para a lognormal por causa de sua simplicidade algébrica. Os dados de tempo de paralisação para a maioria dos equipamentos mais simples têm sido ajustados como exponencial, ou seja, a distribuição exponencial se ajusta ao tipo de equipamento que requer freqüentes regulagens de pouca duração ou que possa ser posto de volta ao serviço via rápida operação de remoção ou troca. Já a distribuição lognormal descreve o tempo de paralisação para uma grande variedade de equipamentos razoavelmente complexos. Esta distribuição é útil na descrição de situações onde há alguns tempos de paralisação de curta duração, um grande número de observações agrupados próximo de algum valor modal, e um número não insignificante de longos tempos de paralisação. A distribuição lognormal pode representar uma situação complexa de reparo melhor do que a distribuição exponencial negativa.

## 8 - Disponibilidade

A disponibilidade está associada ao estado de funcionamento do sistema visto como uma variável binária que pode ser encontrada em uma das duas combinações: Operação ou Falha, e refere-se à probabilidade de um sistema estar disponível para ser usado, ou seja, de que um sistema irá fornecer o serviço requisitado. Este atributo é composto de uma combinação de outros dois: *Confiabilidade* e *Mantenabilidade*; um sistema que falhe freqüentemente, mas que pode rapidamente ser restaurado terá baixa confiabilidade, mas pode ter uma alta disponibilidade. Muitas das técnicas usadas para a melhoria da confiabilidade também irão melhorar a disponibilidade. Em geral é mais fácil obter uma alta disponibilidade do que uma alta confiabilidade. Existem sistemas onde a disponibilidade é mais importante (central telefônica, por exemplo), enquanto para outros a confiabilidade é fundamental (computadores de bordo de avião). A partir da confiabilidade e da manutenibilidade é obtido o estimador da disponibilidade. É importante destacar que este estimador muda

quando muda a função confiabilidade ou manutenibilidade. O estimador “A”, a seguir, deverá ser aplicado apenas no caso em que a confiabilidade e a manutenibilidade são modelos exponenciais com parâmetros  $\lambda = \text{MTBF}^{-1}$  (taxa de falhas) e  $\mu = \text{MTTR}^{-1}$  (taxa de reparo):

$$A = \frac{\lambda^{-1}}{\lambda^{-1} + \mu^{-1}}$$

## 9 - Custo

É importante saber que a escolha de qualquer ação no Processo de Avaliação requer a determinação dos custos envolvidos. Isto implica, segundo Almeida (1987), na necessidade da explicitação clara da estrutura de custos. O custo na operação/manutenção de um sistema é função de pessoal, reserva técnica, equipamentos de suporte e ferramentas, apoio logístico, estrutura de planejamento, etc. Com o tempo o custo de manutenção se apresenta na forma de uma curva ascendente devido à redução da vida útil dos equipamentos, com conseqüente depreciação do ativo, perda de produção ou qualidade dos serviços, aumento de aquisição de peças de reposição, aumento do estoque de matéria-prima improdutiva, pagamento de horas extras ao pessoal executor da manutenção corretiva, perda de mercado, além do aumento de riscos de acidentes de trabalho. O *Custo Total* de uma parada de equipamento é a soma do *Custo de Manutenção* (custo de mão-de-obra, sobressalentes, etc) com o *Custo de Indisponibilidade* (custo de perda de produção, penalidades comerciais, imagem da empresa, etc.). Experiências de Avaliação de Desempenho de Sistemas mostram que o custo de indisponibilidade representa mais da metade do custo total da parada de um equipamento. Assim, ainda segundo Almeida (1987), deve ser possível responder a questões do tipo: qual o custo na atividade de manutenção corretiva de um determinado

equipamento, em dado período?. Um aspecto a ressaltar é a característica probabilística muitas vezes associada ao custo, quando tratado neste contexto, pois o mesmo depende do comportamento dos equipamentos e dos tempos relativos às tarefas de manutenção.

## **10 - Procedimentos Estatísticos Aplicáveis na Avaliação de Desempenho de Sistemas**

### **10.1 - Inferência Estatística**

A Inferência Estatística faz afirmações sobre as características de uma população baseando-se em resultados de uma amostra colhida dessa população. Dentro do plano probabilístico a seleção de uma amostra utiliza os mecanismos aleatórios, atribuindo a cada elemento da amostra uma probabilidade conhecida *à priori* de pertencer à amostra. Assim, o problema da Inferência Estatística é fazer uma afirmação sobre parâmetros da população (média, variância ou qualquer outra medida) utilizando como decisor uma estatística  $T = f ( X_1, X_2, \dots, X_n )$  que será função da amostra de tamanho  $n$ . Essa estatística tem uma distribuição chamada *Distribuição Amostral da Estatística T* e desempenha um importante papel na Inferência Estatística. As principais distribuições amostrais são:

### **10.2 - Teste de Hipóteses**

Os testes de hipótese são procedimentos para a tomada de decisões estatísticas sobre uma determinada característica de interesse de uma população cujo valor é estimado a partir de informações obtidas de amostras. O objetivo do teste estatístico de hipótese é fornecer ferramentas que nos permitam validar ou refutar uma hipótese (estatística) através dos resultados da amostra. A

construção de um teste de hipótese para um parâmetro populacional pode ser colocada do seguinte modo: existe uma variável aleatória  $X$  em uma dada população; tem-se uma hipótese sobre determinado parâmetro  $\theta$  dessa população - por exemplo, afirmamos que esse valor é um número  $\theta_0$ . Colhe-se uma amostra aleatória de elementos dessa população e, através dela, deseja-se comprovar ou refutar tal hipótese. A hipótese colocada à prova é chamada *hipótese nula*, representada por  $H_0$

A hipótese considerada aceitável caso a hipótese nula seja rejeitada, denominada *hipótese alternativa*, tem sua caracterização estatística dependente do grau de conhecimento que se tem do problema. As alternativas podem ser:  $H_1 : \theta \neq \theta_0$ , ou  $H_1 : \theta < \theta_0$ , ou  $H_1 : \theta > \theta_0$

É claro que erros podem ser cometidos ao aceitar uma hipótese e rejeitar a outra, já que existem incertezas na nossa análise. Quando tudo é conhecido não é necessário teste de hipótese. Em Guimarães (1997) vemos que em qualquer situação, seja  $H_0$  verdadeira ou falsa, procura-se tomar uma decisão correta tendo presente que isso não seja possível em 100% das vezes. Como a decisão é tomada com base em dados amostrais, não teremos certeza de qual das duas hipóteses é a hipótese realmente verdadeira, portanto, sempre que  $H_0$  for rejeitada, o teste de hipótese não afirma que  $H_0$  seja falsa; o teste de hipótese sugere que existem evidências de que  $H_0$  seja falsa. Adota-se, então, um *nível de significância*  $\alpha$  que define o erro tolerado pelo analista e esse erro é conhecido, também, como *nível de risco*, porque é o risco que o analista está aceitando no caso de rejeitar a hipótese nula quando ela for verdadeira. Diz-se, então, que ocorreu um *erro tipo I*. Por outro lado, um *erro tipo II* ocorre quando a hipótese nula é aceita sendo a mesma falsa, e a probabilidade de cometer-se este tipo de erro é denotado por  $\beta$ .

### 10.3 - Teste de Aderência

Por teste de aderência entende-se que é um método de testar se uma dada população se ajusta a uma variável aleatória particular, tal como exponencial, normal, lognormal, etc. Uma vez estabelecido que tipo de distribuição possui a população podemos aplicar um teste de aderência para fazer um julgamento probabilístico sobre essa escolha. Tal teste é uma particularidade do teste de hipótese na qual a hipótese nula é que a população seja uma determinada distribuição (normal, gama, etc.), enquanto a hipótese alternativa é que não seja. Infelizmente, quando um teste de aderência leva a uma rejeição da hipótese nula nenhuma conclusão pode ser tirada a respeito de qual distribuição melhor ela se ajusta. Os testes de aderência mais utilizados são: a) **Qui-quadrado** Versátil, fácil de utilizar e requerendo pouco cálculo o teste do Qui-quadrado permite avaliar a aderência entre uma distribuição amostral, - constituída por observações expressas numa escala qualquer -, e uma distribuição teórica. Os requisitos exigidos para a realização do teste são apenas os de que a amostra seja aleatória e tenha uma dimensão mínima adequada ( $N \geq 30$ ). Sendo  $H_0$  verdadeira a estatística Q (Qui-quadrado) terá uma distribuição tanto mais próxima da distribuição  $\chi^2_{(k-1-R)}$  (onde k representa o número de classes e R o número de parâmetros estimados a partir da amostra) quanto maior for a dimensão da amostra e maiores forem os números de observações esperadas nas diferentes classes; b) **EDF - ( Empirical Distribution Function )**. Dentre os testes EDF podemos citar a Estatística Quadrada ( $A^2$ ) e a Estatística Suprema (Kolmogorov-Smirnov) que foi utilizada neste trabalho por ser facilmente encontrada na literatura e atender às condições exigidas para a análise de confiabilidade e manutenibilidade. O teste K-S é baseado na comparação da distância vertical entre uma *função de distribuição empírica*  $F_n(x)$ , oriunda da amostra, com uma *função de distribuição hipotética*  $F(x)$ . Essa

distância é confrontada com valores críticos tabelados para o julgamento de rejeição ou não da hipótese nula. Em Guimarães (1997) podemos observar duas vantagens do teste K-S sobre o Qui-quadrado; em primeiro lugar, quando a distribuição populacional é contínua e se conhecem a forma e os parâmetros da sua função densidade de probabilidade, a distribuição da estatística do teste (representada por  $D_{max}$  ou  $D^*$ ) é definida rigorosamente (ao contrário do que sucede com a estatística  $Q$ , cuja distribuição é aproximada), sendo esta vantagem tanto mais nítida quanto menor for a dimensão da amostra; em segundo lugar o teste K-S é, na maioria das situações, mais potente do que o teste do Qui-quadrado. Em contrapartida, o teste K-S exige distribuições populacionais contínuas e completamente especificadas (o que não sucede com o teste do Qui-quadrado), bem como maior esforço computacional. Segundo Allen (1990:p526) uma desvantagem dos testes EDF comparado com os testes Qui-quadrado é que uma tabela de valores críticos é necessária para cada família de distribuição de probabilidade, sendo uma exceção o caso em que todos os parâmetros são completamente especificados. Na maioria dos casos os parâmetros devem ser estimados a partir da amostra sendo necessário uma tabela de valores críticos para cada distribuição. Felizmente os algoritmos utilizados para os testes de aderência já estão implementados em alguns softwares como MINITAB, STATISTICS, SPSS, SPLUS e outros.

#### **10.4 - Procedimento Bayesiano**

Tem havido, ao longo dos anos, considerável discussão filosófica na literatura estatística sobre a “validade” da Abordagem Bayesiana, conforme vemos em Davenport (1987), que afirma que esta regra tira conclusões perfeitamente válidas sobre os axiomas da probabilidade. Para alguns o Procedimento Bayesiano é aplicado

como medida de conhecimento subjetivo, ou grau de crença, ou seja, na maioria dos casos é possível obter-se informações probabilísticas baseadas no conhecimento a priori de especialista no assunto. Particularmente na área de confiabilidade tem havido um uso cada vez mais intenso deste procedimento (Almeida e Souza, 1993, Melo et al, 1997).

## **11 - Coletas de Dados**

O conhecimento sobre o comportamento probabilístico de equipamentos, sistemas e serviços é imprescindível nas decisões do homem de manutenção. Algumas das informações que compõem este conhecimento são, geralmente, dadas à priori, como é o caso do MTBF fornecido pelos fabricantes. As demais devem ser estimadas ou, em alguns casos, confirmadas através de testes específicos.

As variáveis mais importantes, em geral coletadas ou deduzidas das Ordens de Serviço da manutenção, são os tempos entre falhas (TBF) e os tempos para reparo (TTR). A primeira variável permite o levantamento das curvas de confiabilidade dos equipamentos e sistemas com a subsequente estimação do MTBF. A Segunda revela as características intrínsecas de uma determinada estrutura de manutenção, permitindo a construção das curvas de manutenibilidade e a estimação do MTTR.

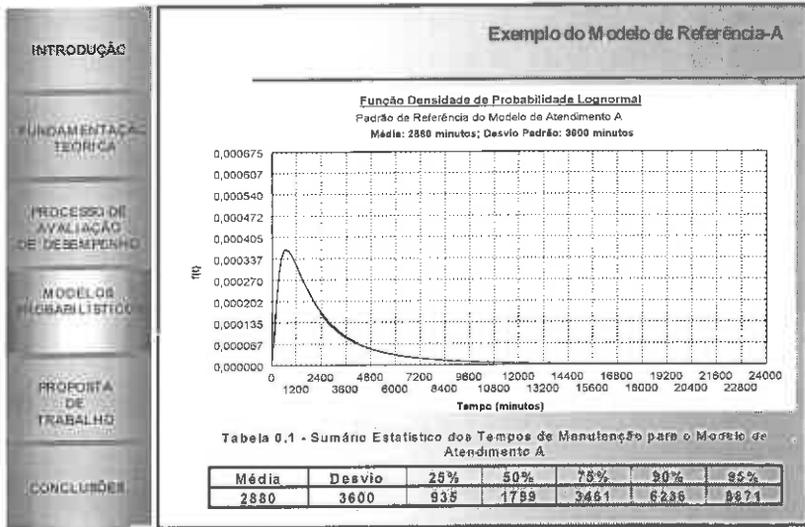
O processo de estimação sempre feito a partir dos dados coletados exigirá uma análise baseada em métodos estatísticos. É fundamental lembrar que a coleta de dados é a base para toda análise e acompanhamento de um equipamento, sendo, portanto, indispensável para uma boa gerência de manutenção, um sistema de informações ágil e confiável para este fim.

## 12 - Confiabilidade: Exemplo de Análise de dados

Para o estabelecimento de padrões de referência visando o desenvolvimento da Avaliação de Desempenho de Sistemas é fundamental uma análise nos dados históricos relativo ao comportamento do sistema. Para fins de priorização de estudo devem ser indicados, por especialistas, os equipamentos (ou família de equipamentos) a serem analisados. A avaliação de desempenho pode ser desenvolvida observando variações na *taxa de falhas* dos equipamentos ao longo do tempo. A partir destes estudos estatísticos pode-se determinar o comportamento atual de cada uma das famílias priorizadas para o estudo e este comportamento poderá ser adotado como modelo de referência, caso o mesmo não exista. A seguir um exemplo de modelo probabilístico de um Sistema de Telecomunicações.

Tabela 1-Tempos entre Falhas para Família 225 – Fonte Telefunken

Família	Média	Desvio	25%	50%	75%	90%	95%
225	877	877	252	608	1216	2020	2628



UFPE - Mestrado em Engenharia Elétrica

CHESF - Superintendência de Telecomunicações e Sistemas de Controle

Figura 4 - Padrão de Referência do Modelo Probabilístico para Família 225

Para a análise dos dados do Sistema de Telecomunicações, a metodologia aplicada foi a recomendada pelas bibliografias da área que analisa os equipamentos em termo de sistema, onde cada conjunto de equipamentos de uma mesma família é visto como um sistema. O desenvolvimento do trabalho dá-se na seguinte seqüência:

- 1 - A partir dos dados históricos dos tempos entre falhas das famílias em estudo obtém-se os valores estimados dos parâmetros do estado de cada sistema utilizando-se o teste K-S de aderência.
- 2 - Aplica-se o teste K-S de aderência ao modelo exponencial com o parâmetro  $\lambda$  estimado da amostra, obtendo-se o valor da estatística  $D$ , que é transformada para  $D^*$  (ver equação abaixo) e confrontada com o valor crítico  $D_c$  da Tabela 2 ao nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Se  $D^*$  for menor do que o  $D_c$  aceita-se a hipótese de que a amostra seja

proveniente da distribuição exponencial com o seu parâmetro  $\lambda$  estimado a partir desta amostra, sendo a mesma adotada como referência.

Tabela 2 - Valores de  $D_c$  para a estatística  $D^*$

Nível de Significância ( $\alpha$ )	0.10	0.05	0.025	0.01
Valor Crítico ( $D_c$ )	1.224	1.358	1.480	1.628

$$D^* = D \left( \sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}} \right)$$

3 - Para o caso de não haver aderência à distribuição exponencial aplica-se o teste K-S ao modelo Weibull, com parâmetros  $\beta$  e  $\eta$  estimados a partir da amostra. No caso de  $D^*$  ser menor do que o  $D_c$  aceita-se a hipótese de que a amostra seja proveniente da distribuição Weibull com os parâmetros estimados a partir da mesma, sendo adotada como referência; caso contrário rejeita-se esta hipótese e a análise é encerrada

Com os resultados obtidos neste exemplo verificou-se que a família 225 atende ao modelo probabilístico exponencial. Neste caso os novos modelos probabilísticos de referência a serem adotados pelo sistema devem considerar que a *taxa de falhas* é constante.

### 13 - Manutenibilidade: Exemplo de Análise de dados

O sistema analisado abrange uma ampla área geográfica com seis centros regionais de manutenção. Os equipamentos do Sistema de Telecomunicações encontram-se instalados nestas gerências, em localidades específicas. A manutenção destes equipamentos acontece de forma descentralizada, devendo cada gerência responder pelos equipamentos instalados nas localidades sob sua responsabilidade.

Foram estabelecidos modelos representados por distribuições de probabilidade para as prioridades de atendimento às manutenções corretivas no Sistema de Telecomunicações. Estes modelos foram estabelecidos com base no conhecimento do Estado do Sistema. O processo de construção dos modelos iniciou-se com o enfoque de fatores como o usuário, o serviço fornecido que foi indisponibilizado com a falha ou teve diminuído seu nível de qualidade e as conseqüências associadas à ocorrência da falha, considerando nesta primeira abordagem uma visão do sistema. Em seguida foram definidos os atributos que classificariam os modelos. Cada modelo de atendimento é representado por distribuições de probabilidade, com média e desvio padrão conhecidos conforme mostra a Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Parâmetros da distribuição lognormal referencial

MODELO	MÉDIA (min)	DESVIO (min)
URGENTE U	1800	2400
NECESSÁRIO A	2880	3600
NECESSÁRIO B	4320	4800
NECESSÁRIO C	6480	7200

O plano de amostragem utilizado para análise dos dados dos tempos para reparos (TTR) do sistema obedece à seguinte seqüência:

1. Obtêm-se os dados referentes as OSCA, no período 1994-1996.
2. Verifica-se se o sistema como um todo, bem como as regionais separadamente, apresenta índice satisfatório para aderência ao modelo padrão preestabelecido, através do teste de Kolmogorov-Smirnov. Aquelas regionais, bem como o próprio sistema, cujos dados apresentam aderência ao modelo padrão serão considerados em conformidade, não sendo mais necessária qualquer análise de aderência sobre seus respectivos dados.

3. Para as amostras que não puderem ser consideradas em conformidade na etapa anterior será verificado se as mesmas apresentam índice satisfatório de aderência, agora não ao modelo padrão preestabelecido, mas à função densidade de probabilidade lognormal, utilizando-se a estatística amostral, através do mesmo teste de Kolmogorov-Smirnov. Aquelas amostras cujos dados apresentam aderência à função densidade de probabilidade lognormal amostral serão consideradas em conformidade, não sendo mais necessária qualquer análise de aderência sobre seus respectivos dados.
4. Para as mostras que, após todas as etapas anteriores, não alcançarem seus respectivos índices satisfatórios de aderência, verifica-se se as mesmas apresentam índice satisfatório de aderência à função densidade de probabilidade exponencial com parâmetro da amostra ( $\lambda$ ) Nesta etapa, se nenhuma amostra aderir a este modelo, a sua análise é encerrada.

Numa visão global, a situação observada e os dados disponíveis indicam que o comportamento, em termos de manutenibilidade nos anos de 1994 a 1996, não seguiu o padrão estabelecido embora, em vários casos, tenha-se observado uma situação mais favorável em termos de duração de atendimento. Destaca-se, mais uma vez, que esta situação pode não ser favorável em termos de custo. Tudo isto deverá ser analisado em trabalhos futuros visando estabelecer novas metas de atendimento.

## REFERÊNCIAS

- Allen, Arnold O., [1990] - *Probability, Statistics and Queueing Theory*, Academic Press, Inc.
- Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1985] - *Desenvolvimento de uma Metodologia de Avaliação de Desempenho de Sistemas de Telecomunicações*. III SNTEEE - Seminário Nacional de Telecomunicações das Empresas de Energia Elétrica; 22-24/out/1985; Curitiba-PR: 1-25
- Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] - *Pesquisa Operacional Aplicada na Avaliação de Desempenho*. VIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica; Mai/1986; São Paulo-SP: SP/GTL/02
- Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] - *Bayes-Like Decisions in Reliability Engineering*. *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*; June 30-July 4, 1986; Paris-France. Paris 87-90
- Almeida, A. T., [1986] - *Avaliação de Desempenho de Sistemas*, Publicações Técnicas CHESF
- Almeida, A. T., [1987] - *Aspectos Conceituais Considerados na Avaliação de Desempenho de Sistemas*, IX SNPTEE, Belo Horizonte, MG.
- Almeida, A. T., [1987] - *Sistema de Informação para o Planejamento e Gerenciamento da Operação e Manutenção de Sistemas de Telecomunicações*, IX SNPTEE, Belo Horizonte, MG.
- Almeida, A. T., [1989] - *Crítérios para Estabelecimento de Índices e níveis de Desempenho Operacional*, X SNPTEE, Curitiba, PR
- Almeida, A. T. ; Bohoris, G. A. e Souza, F. M. C. de, [1992] - *Management Information and Decision Support System in the Maintenance of a Telecommunication System*. *European Safety & Reliability Conference*; 10-12 June 1992; Copenhagen -

- Denmark. London: Elsevier Applied Science; 1992; pp. 23-31; ISBN: 1 85166 875 6.
- Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1993] – *Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System*. IEEE Trans. On Reliability; Sep 1993- 42(3): 401-407.
- Almeida, A. T. ; MENEZES, Hélio Burle e COSTA, Ana Paula C. S., [1995] - *Crêterios para Estabelecimento, Uso e Análise de Índices na Manutenção sob a Ótica de Gestão de Qualidade Total* , XIV SNPTEE , Camboriú, SC
- Almeida, A. T. e Bohoris, G. A., [1996] – *Decision Theory in the Maintenance Strategy of a Standby System with Gamma Distribution Repair Time*. IEEE Transaction on Reliability, June 1996, vol 45, n2, pp. 216-119
- Almeida, A. T. de, [1997] – *Decision Analysis of Maintenance Contract Problem Considering Reliability, Maintainability and Cost Criteria*. EURO XV – INFORMS XXXIV Joint International Meeting; Barcelona, Spain, July 14-17, 1997
- Anderson, H., [1996] - *Use of Preventive Maintenance and System Performance Data to Optimize Scheduled Maintenance Interval* , 49th Annual Conference for Protective Relay Engineers
- Billinton, R., [1983] - *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, Pitman Advanced Publishing Program.
- Carter, A. D. S., [1986] - *Mechanical Reliability* , MacMillan.
- Chiavenato, Idalberto, [1987] - *Administração de Empresas*, McGraw-Hill
- Cordeiro, Gauss M., [1992] - *Introdução à Teoria de Verossimilhança* - 10º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística, UFRJ
- Davenport, Wilbur B.,[1987] – *Probability and Random Process*, McGraw-Hill, Inc.
- Garvin, D. A., [1995] - *Gerenciando a Qualidade*, Qualitymark Editora.

- Goldman, A. S., [1977] - *Maintainability: A Major Element of System Effectiveness*, Robert E. Krieger Publishing Program.
- GTOM/SCC/GCOI, [1988] - *Sistemática Unificada para Avaliação de Desempenho de Sistemas, Relatório SCC/GTOM - 04/88*
- GTOM/SCC/GCOI, [1989] - *Sistemática de Acompanhamento Periódico do Desempenho dos Elos de Interligação de Telecomunicações, Telemetria e Telecontrole, Relatório SCC/GTOM - 04/88*
- GTOM/SCC/GCOI, [1995] - *Nova Sistemática para Avaliação dos Elos de Interligação*
- Guimarães, R. C., [1997] – *Estatística, McGraw-Hill de Portugal*
- Ishikawa, Kaoru, [1993] - *Controle de Qualidade Total*, Editora Campos
- Kapur, K. C., [1977] - *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc.
- Lapponi, Juan Carlos, [1997] - *Estatística usando Excel 5 e 7*, Lapponi Treinamento e Editora Ltda.
- Melo, C. S. L.; Sousa, J. J. L. e Almeida, A. T. de, [1997] – *Uso de Conhecimento a Priori no Dimensionamento de Sobressalentes Baseado no Risco de Quebra de Estoques*; XXIX SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional; Salvador-BA, 22-24/Outubro/1997, pp. 58-59
- O'Connor, P. D. T., [1985] - *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Smith, A. M., [1992] - *Reliability-Centered Maintenance*, McGraw-Hill, Inc.
- Sousa, J. J. L.; Almeida, A. T. e Melo, C. S. L., [1997] – *Procedimentos Estatísticos na Avaliação de Desempenho de sistemas na CHESF*; XXIX SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional; Salvador-BA, 22-24/Outubro/1997, pp. 116-117
- Teboull, J., [1992] - *Gerenciando a Dinâmica da Qualidade*, Qualitymark Editora.



# TPM - MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL: DA CONCEPÇÃO CONCEITUAL À IMPLANTAÇÃO

*Hélio Burle de Menezes  
Adiel Teixeira de Almeida*

## 1. Da Manutenção por Quebra à TPM

A Função Manutenção tem sido historicamente considerada como um custo necessário inerente a uma atividade produtiva. Algumas novas técnicas e estratégias, entretanto, a estão colocando sob um novo enfoque, trazendo à luz o entendimento de considerá-la como parte integrante e indispensável ao negócio.

Desde o princípio dos tempos, e em particular a partir do início da era industrial, houve a necessidade de prover manutenção para equipamentos e ferramentas, mesmo quando estes eram rudimentares. A maioria das falhas eram resultado do abuso; da extrapolação dos esforços-limite suportados pelos equipamentos. Esta característica pode ser observada até os dias de hoje.

No final do século XIX, com a mecanização das indústrias, surgiu a necessidade de reparar as máquinas. Esta tarefa, a princípio, era executada pelo mesmo efetivo de pessoal utilizado na operação. A situação perdurou até 1914 quando, com a chegada da Primeira Guerra Mundial e a introdução, por Henry Ford, da produção em série sentiu-se a necessidade de formar equipes específicas para efetuar o reparo das máquinas, no menor tempo possível. As equipes de manutenção ficavam, em geral, subordinadas à área de operação. Durante todo este período de

tempo a atividade de manutenção teve um caráter puramente corretivo, reagindo somente quando da ocorrência de uma falha. Foi a fase da Manutenção por Quebra.

Com o advento da Segunda Guerra Mundial, face à necessidade de incrementar a velocidade de produção, o foco passou a ser, também, evitar que as falhas ocorressem, e não mais se limitando à simples correção de falhas. Passou-se a desenvolver um Programa de Prevenção de Falhas, juntamente com o processo de correção, propiciando a criação de uma estrutura tão importante quanto a operação. Durante a década de 50, a Manutenção Preventiva foi consolidada, a partir da criação da Engenharia de Manutenção, que ficou responsável pelo seu planejamento e controle e pela análise das causas e efeitos das falhas.

Ainda que tenha sido um avanço e contribuído para a redução das perdas dos recursos de produção, a Manutenção Preventiva era uma alternativa não otimizada e, por conseguinte, cara. Nesta estratégia, muitas partes dos equipamentos, substituídas apenas com base no tempo, ainda poderiam cumprir plenamente sua função por mais tempo. Por conta disto, muitas horas de trabalho também eram gastas inutilmente, alocadas à desnecessária tarefa de substituir peças em perfeito estado funcional. Para suplantar estas deficiências uma nova abordagem começou a ser moldada em meados da década de 1960. Contando, agora, com a possibilidade da utilização de computadores, apoiada pelo fortalecimento das Associações Nacionais de Manutenção e com o avanço tecnológico dos instrumentos de medição, a Engenharia de Manutenção passou a desenvolver critérios para a predição de falhas, visando a racionalização dos esforços das equipes e a otimização dos materiais de reposição envolvidos na tarefa de manutenção. A nova estratégia passou a ser conhecida por Manutenção Preditiva.

Durante a década de 1970, face aos avanços na área de Qualidade no Japão, resultado final dos esforços de recuperação após a segunda guerra mundial, surgiram novas demandas nas estratégias para a manutenção das suas plantas industriais. Como resposta veio a proposição da TPM – Total Productive Maintenance. A princípio, a mesma abordagem do TQM – Total Quality Management foi tentada para os problemas da manutenção de plantas industriais. As recomendações dos fabricantes, rigorosamente seguidas sem qualquer avaliação complementar para a real necessidade resultou em sobre-serviço nas máquinas, sempre que se tentou incrementar sua produtividade. Para contornar o problema de forma ainda aderente aos conceitos do TQM, algumas adaptações foram introduzidas, elevando a manutenção ao status de merecer ser uma parte específica nos programas de qualidade. Assim iniciou-se a forjar a TPM.

Uma forte tendência atual é a migração das estratégias baseadas no tempo, tal como a Manutenção Preventiva tradicional, para aquelas baseadas em condição, como, por exemplo, a Manutenção Preditiva e o Monitoramento em tempo real. Qualquer que seja a estratégia adotada, a TPM pode ser utilizada pois, como veremos a seguir, ela é, por concepção, um sistema de gestão de manutenção capaz de acomodar todas essas estratégias.

## **2. O que é TPM**

A sigla TPM vem do inglês: Total Productive Maintenance, que significa Manutenção Produtiva Total, abrangendo um vasto conjunto de atividades de manutenção que visam a melhorar o desempenho e a produtividade dos equipamentos de uma fábrica, atingindo o máximo rendimento global do parque instalado.

A origem do termo Total Productive Maintenance é alvo de discussão. Alguns defendem que ele nasceu nos Estados Unidos.

Outros atribuem a sua origem ao programa de manutenção da Nippondenso, uma fábrica japonesa de peças automotivas. É unânime, entretanto, o entendimento de que foi Seiichi Nakajima, do JIPM – Japan Institute of Plant Maintenance, que estabeleceu seus fundamentos, tais como são transmitidos hoje.

O conceito e a sigla TPM nos remete ao conceito, já bastante conhecido, de TQM – Total Quality Management. Em muitos aspectos estas estratégias de gestão têm muitos pontos em comum:

- Necessidade do completo envolvimento da alta gerência com o programa;
- A palavra “Total” significando que toda a fábrica está envolvida na cultura e nas atividades do TPM, desde a gerência até os operários da linha de produção;
- Um longo período de maturação deve ser previamente aceito, antes que os primeiros resultados relevantes apareçam. Este tempo é, também, avaliado como o necessário para que uma nova cultura, um novo padrão de comportamento, fiquem consolidados em toda a empresa. O período de maturação da TPM é, em média, de 3 anos.

Por sua vez, a TPM busca, mais especificamente, usufruir dos benefícios advindos dos *cinco Pontos-Chave* seguintes:

- Criar uma cultura coletiva ligada à obtenção da máxima eficiência em todo o processo produtivo;
- Estar presente em todos os aspectos da empresa, desde a Engenharia, passando pela Produção e Manutenção, até a integração, inclusive, da Administração e Vendas;
- Estabelecer um sistema para a detecção e a prevenção das perdas produtivas, de qualquer natureza, atingindo os patamares

de “nível zero de defeitos”, “nível zero de quebras” e “nível zero de acidentes”;

- Incentivar as atividades de pequenos grupos autônomos de trabalho, integrados ao sistema produtivo, que se responsabilizam pela análise e proposição de soluções para os problemas no seu ambiente de trabalho;
- Reforçar as atribuições e poderes do pessoal da produção, para que, de forma autônoma, iniciem as ações de manutenção, tendo em vista ser ele aquele com maior contato direto com as máquinas. Os funcionários assim envolvidos atuam como verdadeiros *sensores humanos*.

A TPM advoga o fim do entendimento de que a “manutenção é um mal necessário”, quando, justo ao contrário, é ela parte necessária e vital ao negócio. Todas as paradas para manutenção são programadas como parte do processo diário de manufatura e, em alguns casos, tais como as *mudanças de linha de produção*, fazem, necessariamente, parte deste processo. As atividades de manutenção não mais são relegadas apenas aos períodos nos quais há interrupção do fluxo de materiais da produção. A meta é ter as manutenções de emergência, não-programadas, em seu patamar mínimo.

A adoção da TPM não implica na necessidade de abandonar qualquer outro sistema de gestão que esteja sendo desenvolvido pela empresa. Todos podem, com algumas adaptações, serem acomodados dentro de um contexto abrangente. Assim, em sua definição atual, TPM está se transformando em “Gerenciamento Produtivo Total”: o método, inicialmente aplicado nas fábricas, passou a ser adotado para todos os processos da empresa, incluindo as atividades de melhoramento da Qualidade, segurança e cuidados ambientais, projetos de máquinas, trabalho de escritório e muitos outros. Por conta disto, muitos defendem que TPM é a estratégia mais adequada para se atingir competência de classe mundial.

### 2.1. Efeitos do TPM e resultados alcançados

Os exemplos de resultados alcançados que estão expostos abaixo referem-se a empresas que conquistaram o prêmio PM concedido pela JIPM, refletindo, portanto, pelo menos três anos de desenvolvimento do programa TPM. Resultados semelhantes têm sido alcançados, também, por empresas brasileiras.

Produtividade	Aumento em termos de valor agregado: 1,5 a 2 vezes Redução do número de quebras e falhas: 1/10 a 1/250
Qualidade	Redução do índice de defeitos: 1/10 Redução do número de reclamações: 1/5
Custos	Redução do custo de fabricação: 30% a 40%
Entrega	Redução do estoque de produtos acabados: 50%
Segurança	Acidente com afastamento: Zero Poluição e contaminação: Zero
Moral	Aumento da quantidade de sugestões para melhoria: 5 a 10 vezes

### 3. **Rendimento Operacional Global**

O método de cálculo do Índice de Rendimento Operacional, proposto por Seiichi Nakajima na época de concepção do TPM, foi um fator fundamental para despertar o interesse pela adoção desta estratégia de manutenção. Diversas fontes de perdas de eficiência nos processos industriais, em geral esquecidas, são consideradas na metodologia de cálculo. Além disto, uma vez que as fontes de perda estão identificadas, o TPM propõe medidas para avaliá-las e combatê-las.

A seguir, desenvolvemos o exemplo clássico do cálculo do Índice de Rendimento Operacional Global, tal como foi apresentado de forma pioneira por Seiichi Nakajima no livro *Introdução ao TPM*.

O produto de três parcelas compõe o Índice de Rendimento Operacional Global, incorporando as contribuições referentes à produtividade e à qualidade de um determinado processo produtivo. São elas:

- Índice do Tempo Operacional
- Índice de Desempenho Operacional
- Índice de Produtos Aprovados
- 

### **3.1. O Índice do Tempo Operacional**

É definido pela relação entre o *tempo em funcionamento* de máquina e o *tempo de carga*.

Índice do Tempo Operacional =  $\frac{\text{tempo em funcionamento}}{\text{tempo de carga}}$  onde,

tempo de carga = tempo total de observação – tempo das paradas programadas;

tempo de funcionamento = tempo de carga – tempo das paradas não-programadas.

Assim, temos:

Índice do Tempo Operacional =  $\frac{\text{tempo de carga} - \text{tempo de parada}}{\text{tempo de carga}}$

Para um turno diário de 8 horas, ou 480 minutos, caso haja 20 minutos de paradas programadas, teremos um *tempo de carga* de 460 minutos. Se em um determinado dia de observação existirem paradas não-programadas, sejam elas por conta de falhas, mudança de linha, regulagem ou qualquer outro problema não previsto, teremos um *tempo de parada* de 60 minutos. O Índice do Tempo Operacional será, então:

$$\text{Índice do Tempo Operacional} = \frac{400}{460} = 0,8696$$

### 3.2. O Índice de Desempenho Operacional

Por sua vez, este índice é composto pelo produto de duas parcelas:

- Índice de velocidade operacional = ciclo teórico / ciclo efetivo.  
Se o ciclo teórico é de, por exemplo, 0,5 min / unidade e o ciclo efetivo é 0,8 min / unidade, então:

$$\text{Índice de Velocidade Operacional} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625$$

- Índice do tempo efetivo de funcionamento  
$$= \frac{\text{tempo efetivo de trabalho}}{\text{tempo de funcionamento}} = \frac{\text{quantidade produzida} \times \text{ciclo efetivo}}{\text{tempo de funcionamento}}$$

Se em um dia de produção, no qual o tempo de funcionamento foi de 400 minutos, foram fabricadas 400 unidades com um ciclo efetivo de 0,8 min / unidade, então:

$$\text{Índice do tempo efetivo de funcionamento} = \frac{400 \times 0,8}{400} = 0,8$$

O Índice de Desempenho Operacional – IDO será, então:

$$\begin{aligned} \text{IDO} &= \frac{\text{ciclo teórico}}{\text{ciclo efetivo}} \times \frac{\text{quantidade produzida} \times \text{ciclo efetivo}}{\text{tempo de funcionamento}} \\ &= \frac{\text{quantidade produzida} \times \text{ciclo teórico}}{\text{tempo de funcionamento}} \end{aligned}$$

Utilizando os dados do exemplo temos:

$$\text{Índice de Desempenho Operacional} = \frac{400 \times 0,5}{400} = 0,5$$

### **O Índice de Produtos Aprovados**

É o índice de produtos aprovados pelo controle de qualidade final.

### **3.4. Cálculo do Índice de Rendimento Operacional**

Utilizando os dados do exemplo que trabalhamos nos itens anteriores temos:

$$\begin{aligned} \text{Índice de Rendimento Operacional} = \\ \text{Índice do Tempo Operacional} \times \\ \text{Índice de Desempenho Operacional} \times \\ \text{Índice de Produtos Aprovados} \end{aligned}$$

Admitindo o Índice de Produtos Aprovados como 0,98 pode-se calcular o Índice de Rendimento Operacional

$$\begin{aligned} &= 0,8696 \times 0,5 \times 0,98 = 0,4261 \\ &\text{ou } 42,61 \% , \text{ se expresso em termos percentuais.} \end{aligned}$$

Este valor, surpreendentemente baixo, é decorrente de levarmos em conta as diversas perdas que, em geral, não são computadas. Por isto, a adoção do TPM traz a promessa de ganhos significativos de produtividade, justamente pelo ataque a estes pontos de perdas. Segundo Seeichi Nakajima, para que se tenha um valor adequado do Índice de Rendimento Operacional Global, seus índices componentes devem atingir os seguintes patamares:

- Índice do Tempo Operacional superior a 90 %;
- Índice de Desempenho Operacional superior a 95 %;
- Índice de Produtos Aprovados superior a 99 %.

#### 4. OS Pilares da TPM

A filosofia TPM destaca algumas linhas mestras como principais agregadoras e direcionadoras para as suas ações. Estas linhas mestras de ação são denominadas de *pilares da TPM*.

Na proposição original da TPM foram estabelecidos cinco pilares:

- Pilar Educação e Treinamento
- Pilar Controle do Ciclo de Vida
- Pilar Melhorias Específicas
- Pilar da Manutenção Planejada
- Pilar de Manutenção Autônoma

Com o passar do tempo, na natural busca de aprimorar a metodologia, outros pilares foram acrescentados visando compatibilizar os preceitos da TPM com as demandas exigidas pela sociedade e pelos novos cenários da produção industrial. Assim, foram adicionados três novos pilares:

- Pilar Segurança e Meio Ambiente
- Pilar Manutenção de Qualidade
- Pilar Controle Administrativo

##### 4.1. Pilar Educação e Treinamento

Planos de treinamento e desenvolvimento estruturados existem na maioria das empresas. Porém, também em sua maioria, estes planos são direcionados apenas para os níveis hierárquicos

mais elevados, não prevendo treinamento formal, em nenhum aspecto, para o pessoal que trabalha no chão de fábrica. É comum ver casos onde operadores e mantenedores são contratados para trabalhar em equipamentos com os quais nunca tiveram contato. O treinamento é feito de modo informal, baseado na experiência e na boa vontade de um funcionário com mais tempo de casa.

Antes de ser exposto a ambientes, produtos e equipamentos, o funcionário tem a necessidade e, principalmente, o direito de adquirir os conhecimentos que lhe dêem condições de desempenhar de forma mais efetiva suas funções e lhe permitam adotar as atitudes e procedimentos que garantam a sua integridade física. A existência de um plano de capacitação ao trabalho é, então, obrigatório para capacitar as pessoas aos seus novos papéis. A decisão de adoção do TPM implica em investimentos concentrados na formação da força de trabalho. Nada acontece movido única e exclusivamente pela vontade. Não se pode cobrar das pessoas algo que elas não tenham a oferecer.

No contexto do TPM, o objetivo do Pilar Educação e Treinamento é estimular o desenvolvimento de três aspectos que têm uma implicação comportamental imediata:

Aspecto	Conhecimento	Habilidade	Atitude
Comportamento	Eu conheço!	Eu sei fazer!	Eu quero fazer!

## **4.2. Pilar Controle do Ciclo de Vida**

O controle dos equipamentos é necessário a partir do início do projeto de sua implantação. A maioria dos aspectos determinantes do desempenho futuro são estabelecidos, justamente, nesta fase. As decisões sobre as novas aquisições devem levar em

consideração todo o *Custo do Ciclo de Vida: Projeto, Implantação e Exploração*, buscando estabelecer o sistema que traga a melhor relação custo-benefício à empresa e não apenas aquele que tem o custo de aquisição mais baixo. O custo de aquisição mais baixo leva, via de regra, a selecionar o sistema de menor confiabilidade, ou pior desempenho operacional, ou de maior *custo de posse*, podendo agregar, inclusive, todas essas três características negativas. Em geral, essa prática conduz ao maior Custo do Ciclo de Vida.

Um outro aspecto do controle desde o início do projeto é o de preparar as condições para registrar todo o histórico de desempenho dos equipamentos adquiridos, ponto fundamental para os processos de identificação de problemas, proposição das melhorias específicas e fonte de informação da Engenharia para orientação nas aquisições de novos sistemas.

### **4.3. Pilar Melhorias Específicas**

É o conjunto de atividades que busca obter a eficiência máxima dos equipamentos pela utilização plena de suas respectivas funções e capacidades. É neste pilar que são combatidas as perdas de eficiência associadas a pequenas paradas, em geral não computadas, mas que têm um forte impacto no Índice de Rendimento Operacional Global. O aumento da eficiência é a consequência da eliminação criteriosa destas perdas, que podem ser entendidas como a diferença entre a eficiência alcançada e a máxima eficiência possível. A TPM classifica as perdas em 6 categorias, chamando-as de *as 6 grandes perdas*. São elas:

- Parada acidental por quebra
- Mudança de linha e ajustes de ferramentas
- Pequenas paradas e operação em vazio
- Redução da velocidade de trabalho
- Produção defeituosa e re-trabalho
- Defeitos do início de produção

#### **4.3.1. Parada acidental por quebra**

Essa perda está diretamente relacionada à perda da função estipulada do equipamento. Ocorre devido tanto a falhas crônicas quanto esporádicas e tem como consequência a perda de tempo e perda de produção pela ocorrência de defeitos.

#### **4.3.2. Mudança de linha e ajustes de ferramentas**

Esse tipo de perda refere-se à perda de tempo de troca e ajustes do fim de produção de um item até o momento em que a produção do item seguinte tenha alcançado nível satisfatório de produção e qualidade.

#### **4.3.3. Pequenas paradas e operação em vazio - Chokotei**

São as perdas cujo restabelecimento da condição normal é feita em menos de 10 minutos (muitas empresas adotam 5 minutos), por meio de medidas muito simples como pequenos ajustes e retirada de peças com pequenos defeitos. Muitas vezes não é considerada ou sequer percebida.

#### **4.3.4. Redução na velocidade de trabalho**

Ocorre quando há diferença entre a velocidade na qual o equipamento está operando e a velocidade de projeto - *velocidade padrão* -, ou quando a velocidade de projeto está abaixo dos condições desejáveis ou dos padrões tecnológicos atuais.

#### **4.3.5. Produção defeituosa e re-trabalho**

São as perdas de volume de produção devidas a defeitos e re-trabalhos, e perdas associadas ao tempo necessário para reparar produtos defeituosos. Algumas empresas vêem o re-trabalho como parte inerente do processo, não tomando nenhuma providência para sua redução ou eliminação.

#### 4.3.6. Defeitos do início de produção

São perdas resultantes do início de operação, após paradas para reparos periódicos, paradas prolongadas e refeições. A perda cessa quando o equipamento atinge níveis satisfatórios de produção e qualidade.

Além do controle geral das perdas, o Pilar de Melhorias Específicas é o responsável, também, pelo gerenciamento das modificações que ocorrem por conta das proposições de melhorias feitas pelos operadores, mantenedores e demais funcionários. As modificações propostas devem ser cuidadosamente estudadas, antes de sua implementação, garantido que não levem a resultados catastróficos que possam colocar em risco a integridade física das pessoas, equipamentos ou instalações.

#### 4.4. Manutenção Autônoma

Um dos aspectos mais importantes na TPM reside em estabelecer o processo de Manutenção Autônoma. O processo tem como foco o desenvolvimento das habilidades dos operadores, de forma que os mesmos tenham domínio sobre os seus equipamentos. O propósito disto é torná-los aptos a agir como *sensores humanos*, promovendo no seu ambiente de trabalho as mudanças que vão garantir altos níveis de produtividade.

Quebras e defeitos crônicos ocorrem devido a vários fatores, um deles é o fator humano. Os erros de operação e as quebras repetitivas são comuns no dia-a-dia, sendo encarados como ocorrências normais. O conceito de "eu opero, você conserta" tomou conta dos ambientes fabris e o pessoal da operação acredita que as falhas são de total responsabilidade do pessoal da manutenção. Muitas falhas poderiam ser evitadas se os operadores desempenhassem tarefas muito simples como limpeza, re-aperto de parafusos, lubrificação e detecção de anomalias. Assim, a manutenção autônoma vai consistir das seguintes atividades:

- Verificações diárias
- Lubrificação
- Troca de peças com baixa complexidade
- Pequenos reparos
- Verificação e garantia da precisão
- Detecção antecipada de condições anormais

Adicionalmente, a co-responsabilidade com a manutenção do equipamento, torna os operadores mais atentos para respeitar os limites de operação das máquinas, ponto fundamental para a conquista da *quebra zero*.

Na tabela a seguir listamos os sete passos para a implantação da Manutenção Autônoma, apresentando, ainda, as aquisições que os operadores deverão agregar ao longo do desenvolvimento das diversas etapas.

### ***Os 7 passos para a Manutenção Autônoma***

<b>Passo</b>	<b>Aquisições Básicas</b>	<b>Aquisições Avançadas</b>
Limpeza Inicial	Habilidade para determinar anomalias na máquina.	Desenvolver a habilidade de identificar as anomalias e as oportunidades, fazer melhorias e resolver as anomalias.
Eliminação das fontes de sujeira e locais de difícil acesso		
Elaboração de normas provisórias de limpeza, inspeção e lubrificação.	Habilidade para projetar e implantar melhorias.	Os operadores determinam por si mesmos o que têm de fazer.
Inspeção geral	Entendimento dos princípios de operação da máquina e cada um de seus sistemas.	Os operadores mais experientes e os técnicos de manutenção ensinam aos menos experientes.
Inspeção autônoma	Entendimento da relação entre as condições do equipamento e a qualidade do produto.	Organização da informação para descrever as condições ótimas e como mantê-las.
Padronização		
Gerenciamento autônomo		

Em suas etapas iniciais de desenvolvimento, a Manutenção Autônoma utiliza, como agente catalizador, a implantação do Programa 5 S, iniciais de cinco palavras em japonês, que têm o seguinte significado:

- Seiri ⇒ Seleção, Utilização: identificação do que é essencialmente necessário e utilizado no trabalho.
- Seiton ⇒ Organização, Arrumação: tudo deve ser disposto de modo a facilitar seu acesso, levando em conta a frequência de utilização, em uma seqüência lógica de fácil assimilação. Neste caso a máxima é: *“Um lugar para cada coisa e cada coisa em seu lugar”*
- Seiso ⇒ Limpeza, Zelo: a sujeira deve ser eliminada, facilitando a inspeção do ambiente na busca de problemas e não-conformidades.
- Seiketsu ⇒ Asseio, Padronização: na padronização de hábitos e procedimentos encontra-se a garantia de não retroceder nos benefícios alcançados nos três itens anteriores.
- Sitsuke ⇒ Disciplina: manter as conquistas, cumprindo com rigor as normas e respeitando os padrões estabelecidos. É, de longe, a etapa mais difícil de se observar.

#### **4.5. Pilar Manutenção Planejada**

Da mesma forma que a Manutenção Autônoma busca desenvolver o pessoal da operação para que este tenha domínio sobre o seu equipamento e possa operá-lo e mantê-lo da melhor forma possível, a Manutenção Planejada desenvolve os mantenedores de forma que os mesmos possam estabelecer um sistema de manutenção mais efetivo e, juntamente com o pessoal da operação, possam eliminar as perdas relativas às quebras e falhas, re-trabalhos de manutenção, falhas de operação, produtos defeituosos e pequenas paradas.

A Manutenção Planejada não é nenhuma novidade na maioria das empresas, pois os conceitos utilizados são os mesmos pregados desde a década de 50. O que o TPM traz de novo é o desenvolvimento das pessoas e as mudanças de papéis que ocorrem em função do próprio surgimento da manutenção autônoma.

A manutenção planejada deve ser desenvolvida em seis etapas, capacitando progressivamente as pessoas, para que essas tenham condições de melhorar seus métodos e equipamentos.

- Avaliação do equipamento e levantamento da situação atual
- Restauração das deteriorações e melhoria dos pontos deficientes
- Estruturação do controle de informação de dados
- Estruturação da Manutenção Preventiva
- Estruturação da Manutenção Preditiva
- Avaliação da Manutenção Planejada

O adequado desenvolvimento da Manutenção Planejada traz as condições para que se possa determinar, no tempo certo, a mais indicada estratégia de manutenção para cada equipamento.

#### **4.6. Pilar Segurança e Meio Ambiente**

As exigências da sociedade que resultaram em legislações específicas, com penalidades bastante severas no tocante à segurança de instalações e, principalmente, das pessoas e do meio ambiente, é uma força coercitiva para que as empresas tratem estas questões. Não explicitado na versão original da TPM, este pilar vem ao encontro a essas novas demandas.

#### **4.7. Pilar Manutenção Qualidade**

Também não explícito na primeira proposição dos pilares, vem expandir o foco original da TPM para uma abrangência maior, na direção da Terotecnologia, necessidade já preconizada pelo próprio Seiichi Nakajima ao estabelecer as bases iniciais da TPM.

Este pilar cuida da definição de parâmetros, métodos e ferramentas para avaliar a interferência que as condições operativas dos equipamentos têm na qualidade do produto ou serviço oferecido.

#### **4.8. Pilar Controle Administrativo**

Também voltado à expansão da abrangência da TPM, tem foco para os aspectos administrativos que mais interferem nas atividades de produção, tais como compras e materiais. Outros aspectos estritamente administrativos são considerados para que se possa transmutar a TPM – Manutenção Produtiva Total em Gerenciamento Produtivo Total.

### **5. Dificuldades na Implantação da TPM**

Desde o início da década de 90 foi crescente o número de empresas brasileiras que optaram pela adoção da TPM. A razão desta procura são as promessas de ganho de produtividade e a maximização do desempenho operacional global dos ativos industriais.

A conquista destas promessas, entretanto, não vêm efetivamente correspondendo na mesma proporção da demanda. De fato, a longo prazo, verifica-se que está entre 10 a 20 % o percentual de sucesso na implantação da TPM. Dentre as diversas causas possíveis para os problemas nas etapas de implantação, enumeramos as principais, mais frequentes, a seguir.

- Não há o efetivo apoio da alta gerência e a implantação não segue o sentido “*top-down*” recomendado. Este ponto é fatal para uma implantação de sucesso. Trata-se de mudar a cultura, adotar novas práticas, investir na implantação de alterações nos equipamentos visando facilitar a Manutenção Autônoma e a Manutenção Planejada. Sem o apoio da alta gerência, o

programa torna-se um risco, rapidamente percebido quando acontecerem os primeiros reveses, para todos os funcionários envolvidos na implantação.

- Não há a internalização efetiva da Manutenção Autônoma. As condições principais para isto não são garantidas e o que se vê é associado a este pilar são atividades de caráter mais estético do que técnico.
- Não se estrutura a sistemática para medir e acompanhar as perdas operacionais que comprometem o desempenho dos equipamentos. Sem informação adequada não é possível gerenciar o processo de melhorias.
- Não existe um bom e efetivo programa de Manutenção Planejada. Não há mudança de postura. Tudo é feito na da forma até então praticada, sem a necessária análise das necessidades de cada equipamento, mantendo as velhas práticas que resultam em um eterno “apagar de incêncios”.
- As práticas de aquisição dos novos sistemas e dos sobressalentes associados continuam sem alteração. Tudo é baseado apenas no custo imediato de aquisição e não na otimização do Custo Global do Ciclo de Vida.
- Não há constância de objetivos, perde-se o seguimento do processo e ele “sai de moda”.

Apesar dos problemas listados, a TPM, vem conseguindo garantir, quando adequadamente implantada com as salvaguardas contra as dificuldades listadas acima, os benefícios esperados para as empresas que acreditaram e persistiram incessantemente no seu objetivo até alcançar o patamar de sucesso.

## 6. Bibliografia

- Mora, Enrique - *Los Ingredientes Indicados para una Implementación Exitosa de TPM o Disciplina Esbelta.*
- Mora, Enrique - *¿Cómo Tener Éxito Implementando TPM?*
- Mora, Enrique - *Mantenimiento Autónomo*
- Nakajima, Seiichi - *Introdução Ao TPM* - IM&C Internacional Sistemas Educativos
- Nakajima, Seiichi - *TPM Development Program* -Productivity Press
- Osada, Takashi & Takahashi, Yoshikazu - *TPM/MPT Manutenção Produtiva Total* - IMAN
- Ribeiro, Haroldo - *Sua empresa tem TPM ou pensa que tem?.* Revista Manutenção - No. 82 - Julho/Agosto 2001.
- Roberts, Jack - *TPM: History and Basic Implementation Process.* Department of Industrial and Engineering Technology Texas A&M University-Commerce
- Shirose, Kunio - *TPM Team Guide* - Productivity Press
- Steinbacher, Herbert R. & Steinbacher, Norma L. - *TPM For America* - Productivity Press
- Tavares, Lourival Augusto - *Administração Moderna da Manutenção* - Novo Pólo Publicações.
- Tavares, Lourival Augusto - *Controle de Manutenção por Computador* - Editora Técnica Ltda.

### “Sites” Internet

- Advanced - <http://www.advanced-eng.com.br/tpmonline.htm>
- IM&C Internacional Sistemas Educativos- <http://www.imci.com.br>

- ☐ Maintenance Resources - <http://www.maintenanceresources.com>
- ☐ JIPM - <http://jipmgate.jipm.or.jp/en/service/index.html>
- Pirelli – [http://www.pirelli.com.br/html/body\\_tpm.htm](http://www.pirelli.com.br/html/body_tpm.htm)
- ☐ TPMonLine - <http://www.tpmonline.com>
- VTB – <http://www.vtb.br>



# SISTEMAS DE CUSTEIO PARA APOIO À GESTÃO DA MANUTENÇÃO

*Luiz Carlos Miranda*  
*Ângela Maria de Araújo Silva<sup>1</sup>*

## **Resumo:**

O objetivo deste capítulo é discutir os principais aspectos relacionados com custos de manutenção. O capítulo irá tratar da definição, identificação, classificação e análise dos custos de manutenção de sistemas produtivos, além de propor uma metodologia para determinar os custos dos serviços de manutenção. Serão considerados os aspectos tecnológicos (engenharia) e os aspectos financeiros (contabilidade de custos).

Será analisada a influência da definição da estrutura de manutenção na disponibilidade, bem como no custo do sistema de manutenção. Como resultado, apresenta-se uma proposta de sistema de custeio de manutenção para apoio ao processo decisório.

## **1. Introdução**

Uma das decisões mais importantes na definição de um sistema de manutenção é o dimensionamento da quantidade de recursos que deve ser alocado à unidade organizacional que irá realizar a manutenção. Até determinado ponto, os custos dos serviços de manutenção preventiva são mais do que compensados pelas reduções nos custos devidos à redução das falhas. Além desse

---

<sup>1</sup> Este capítulo teve a colaboração de Cláudio de Araújo Wanderley, aluno do Mestrado em Engenharia da Produção da UFPE e Juliana Matos de Meira, aluna do Mestrado em Ciências Contábeis da UFPE.

ponto, os custos de prover serviços adicionais de manutenção preventiva serão superiores aos benefícios gerados e o custo total aumenta (Usry, Hammer e Matz, 1988: p. 398).

Outro ponto importante, relacionado aos custos com manutenção, é o da definição da responsabilidade por esses custos. Os responsáveis pelo departamento de manutenção argumentam que não são responsáveis por nenhum custo de seu departamento, uma vez que os custos de manutenção ocorrem para o benefício e a pedido dos demais departamentos. Já os responsáveis pelos departamentos da área produtiva argumentam que eles não podem ser responsabilizados pelos custos de manutenção, pelo fato deles não terem nenhuma influência ou controle sobre os recursos consumidos (pessoal, materiais e equipamentos) na área de manutenção. Assim, como aponta Usry, Hammer e Matz (1988 p. 398), o problema está na necessidade de definir se o controle dos gastos de manutenção devem ser exercidos ao nível da fonte (o departamento de manutenção) ou ao nível dos receptores do serviço (os departamentos que usam os serviços de manutenção).

Atualmente, os custos com manutenção vêm ganhando importância maior em alguns segmentos de negócios. É que a sofisticação dos mercados fez surgir um grande número de organizações que exigem elevados níveis de disponibilidade de seus sistemas de produção. Como exemplo podemos citar empresas de transporte aéreo; empresas envolvidas na produção, transmissão e distribuição de energia elétrica; parques de diversão; transporte ferroviário e exploração de petróleo. Nessas e em outras empresas similares, os sistemas de manutenção assumem importância estratégica. A área de manutenção tem como responsabilidade manter o sistema com o máximo de disponibilidade possível, com o menor nível de falhas possíveis e ao menor custo possível. Assim, a gestão dos custos de manutenção pode tornar-se um diferencial competitivo para muitas empresas.

Usualmente, nas empresas que têm alta dependência da manutenção, a questão dos custos fica relegada a um segundo plano. Isto porque a ênfase é colocada na disponibilidade, a qualquer custo. Tais empresas têm uma área de manutenção que exige uma estrutura especializada na área tecnológica (hardware e software), dominada pela engenharia. Os engenheiros tendem, naturalmente, a enfatizar os aspectos de engenharia da atividade manutenção, relegando os aspectos financeiros. No entanto, a definição de sistemas de manutenção mais sofisticados requer decisões que levem em consideração, além das características técnicas dos sistemas produtivos, conhecimentos mais especializados sobre custos. Assim, torna fundamental o conhecimento dos custos de atividades de manutenção e de indicadores que permitam avaliar adequadamente essas atividades, não só do ponto de efetividade em termos de disponibilização do sistema mantido; como também da eficiência em termos da relação custo-benefício.

A literatura sobre custos dá pouca ênfase aos custos de manutenção. Em alguns casos são citados apenas ao nível de atividade (Berliner&Brimson;1992 p.69), em outros casos discute-se apenas sua relação com os aspectos de depreciação de ativos (Hendriksem;1999 p.321), ou com custos de qualidade. Com raras exceções, os custos de manutenção não têm despertado o interesse dos estudiosos de custos, deixando os responsáveis por manutenção com soluções muito simplistas para a apuração dos custos de manutenção.

Qual sistema de custeio é o mais adequado para apropriar os custos das ações de manutenção, de modo a permitir um efetivo controle e influenciar na sua minimização?

## **2. Tipos de manutenção**

Goldman e Slattery (1977, p.29) conceituam manutenção como o conjunto de ações ou atividades necessárias, desenvolvidas com o objetivo de manter um sistema em suas condições de serviço. Lyonell (1991, p.10) afirma que o objetivo da manutenção é manter, a um custo mínimo, o sistema em um estado de operação livre de falha. Esse custo mínimo está em torno de um ponto ótimo entre os custos crescentes em sofisticação da manutenção e os custos decrescentes da taxa de falha.

Lyonell (1991, p.1) afirma que para se obter o custo mínimo, o especialista em manutenção deve ter um sólido conhecimento dos diferentes tipos de manutenção e fazer uma seleção apropriada de qual aplicar em cada situação. Para tanto, é necessário conhecer os tipos de manutenção. Basicamente, existem dois tipos de manutenção:

- a) **Manutenção Corretiva:** processo de ações realizadas como resultado de uma falha ocorrida para fazer o equipamento ou sistema retornar às condições especificadas de funcionamento (O'Connor, 1989, p. xix). A manutenção corretiva é usada somente após a falha.
- b) **Manutenção Preventiva:** processo de tarefas realizadas com o objetivo de prevenir a ocorrência de falha em um equipamento ou sistema, antes que ele venha a falhar, uma vez definida a necessidade de intervenção (O'Connor;1989:xix). Segundo Lyonell (1991:1), a manutenção preventiva, tem o objetivo de reduzir a probabilidade de falha. Ela se divide em dois subtipos: (1) sistemática, em que os componentes especificados são substituídos, usualmente em intervalos regulares, quando começam a apresentar desgaste, e (2) baseada em condições, em que a decisão de substituir ou não é tomada de acordo com os resultados de um estudo de diagnose.

### 3. Custos em manutenção

Os custos totais CT de uma organização de forma geral podem ser expressos pela seguinte equação:

$$CT = \sum_{t=0}^n (Cmp_t + Cmo_t + Cub_t + Cf_t)$$

Onde:

Cmp são os custos com materiais,  
Cmo são os custos com mão-de-obra,  
Cub são os custos de uso dos bens e  
Cf são os custos da falha.

No caso da manutenção, seus custos estão inseridos no custo do uso do bem. O Cub pode ser expresso como:

$$Cub = \sum_{t=0}^n (Cdep + Cop + Cman - VR)$$

Onde:

Cdep são os custos da depreciação,  
Cop são os custos de oportunidade,  
Cman são os custos com manutenção, e  
VR é o valor residual do bem no final de sua vida útil.

Depreciação é o valor monetário que expressa o declínio do potencial de geração de serviços por ativos de longa duração. Esse declínio pode ser o resultado de deterioração física, desgaste com o uso, ou perda de valor econômico em decorrência de obsolescência ou mudanças de condições de demanda (Comitê de Conceitos e Padrões da Associação Americana de Contabilidade, 1957, p 4 e 6).

Custos de oportunidade referem-se aos custos da alternativa abandonada ao se decidir adquirir o bem. Ao se decidir pela compra de uma máquina, a empresa abandona, por exemplo, a

alternativa de aplicar o dinheiro no mercado financeiro. Usualmente, utiliza-se a taxa de juros de aplicação no mercado financeiro, para montante equivalente ao da compra do bem.

As implicações das decisões de manutenção sobre os custos totais podem gerar duas situações limites:

**a) Não fazer manutenção:**

Nesse caso,  $\Sigma C_{man} = 0$ , e  $VR = 0$ .

$$C_{ub} = \Sigma C_{dep} - VR$$

Neste caso, o desgaste do bem é máximo o que provoca um elevado custo de depreciação.

**b) Fazer manutenção perfeita:**

Considerando que a manutenção vai repor totalmente as condições originais e evitar falhas, então,  $\Sigma C_{dep} = 0$ , e o sistema vai estar em condições de produzir por um período de tempo igual ao da sua vida útil.

$$C_{ub} = \Sigma C_{man}$$

Dentro dessas duas condições extremas é que se situam as ocorrências observáveis na prática. Na realidade é muito difícil ou quase impossível observar um sistema que funciona sem falhas e em que se possa optar por depreciar ou efetivar gastos em manutenção. Normalmente os dois gastos ocorrem concomitantemente.

A figura 1 apresenta de forma gráfica essa situação explicada acima:

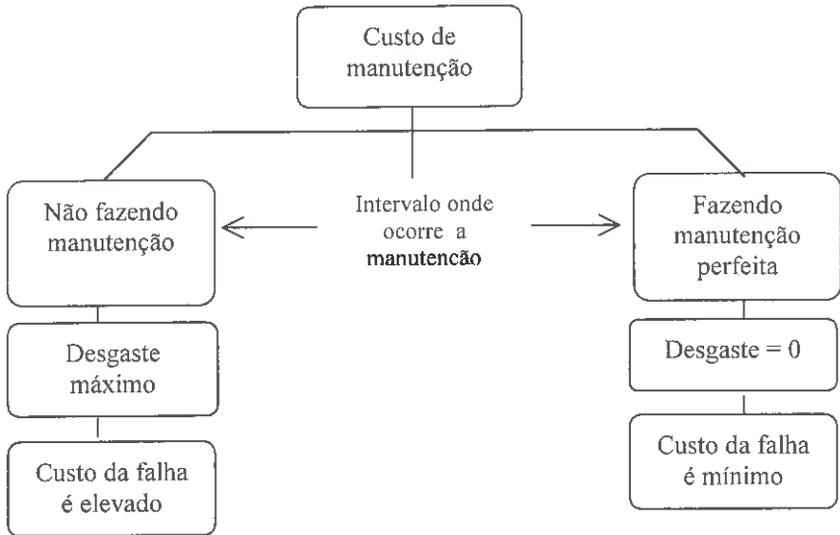


Figura 1. Tipos de Manutenção (Perfeita e Sem manutenção)

A função que calcula os custos de manter um sistema, sob o ponto de vista de uma unidade de negócio pode ser representada por:

$$C_{man} = CP + CC + Cf$$

Onde:

$C_{man}$  são os custos totais de manutenção,  
 $CP$  os custos com atividades de prevenção,  
 $CC$  os custos com atividades de correção, e  
 $Cf$  os custos das falhas de manutenção.

Uma investigação baseada nesse modelo indica o quanto o investimento em prevenção será necessário e quanto em correção terá que ser despendido para, a uma dada disponibilidade (produtividade), garantir o menor custo (Figura 2).

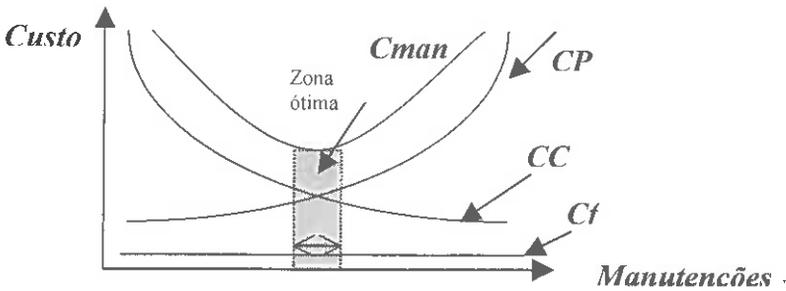


Figura 2. Custos de Prevenção versus Custos de Correção.

Como a prevenção busca a diminuição da taxa de falhas, cabe ao especialista monitorar a taxa de falhas do sistema e atuar no sentido de obter a sua redução com uma correspondente diminuição do custo de prevenção e correção. Aumentos na taxa de falha ou nos demais custos de manutenção devem alertar o sistema de manutenção para a busca de alternativas que revertam esse comportamento.

Minimizar tais custos de manutenção considera a minimização da expressão anterior sujeita as condições de receita  $R$ , ou seja, minimizar os custos de prevenção, correção e falhas sujeitos a um determinado nível de operação/produção.

Do ponto de vista da lógica de manutenibilidade, se  $CP$  aumenta,  $CC$  deve diminuir e se  $CP$  diminui,  $CC$  deve aumentar, onde os fatores que indicam o grau de correlação entre esses dois grupos dependem das características físicas dos equipamentos e sistemas instalados, ou seja, da taxa de falhas do sistema mantido, onde:

Custo de Prevenção -  $CP$  é o custo da estrutura inicial para atividades de prevenção (investimento inicial) mais o custo da operacionalização dessa estrutura com o fim de prevenir a falha.

Custo de Correção - CC é o custo da estrutura inicial para atividades de correção mais o custo da operacionalização dessa estrutura com o fim de repor o sistema produtivo a sua condição de normalidade.

Custo da falha – CF é o custo decorrente das falhas e inclui perda de receita (perda de faturamento, parada de produção), insatisfação do cliente e despesas (multas e dispêndios) presentes e futuras.

Portanto o sistema custeio adequado para apropriar os custos das ações de manutenção que influenciam na minimização de seus recursos de infra-estrutura deverá sempre e em todas as condições otimizar a expressão dada pela equação  $C_{man} = CP + CC + Cfa$ .

### **3.1 - Estrutura dos custos de manutenção**

São custos de prevenção: (a) pessoal (contratação e preparação); (b) locomoção (transporte de pessoal e objetos); (c) logística (disponibilização, preparação e manutenção da infra-estrutura e dos materiais de reposição); (d) taxas, impostos e seguros; (e) depreciação; (f) serviços externos; e (g) melhoramentos.

$$CP = CP_{pessoal} + CP_{logística} + CP_{taxas} + CP_{depreciação} + CP_{serviço\ externo} + CP_{melhoramentos}.$$

São custos de correção: (a) pessoal (contratação e preparação); (b) locomoção (transporte de pessoal e objetos); (c) logística (disponibilização, preparação e manutenção da infra-estrutura para reparos e materiais de reposição); (d) depreciação; (f) serviços externos; e (g) descarte.

$$CC = CC_{pessoal} + CC_{logística} + CC_{depreciação} + CC_{serviço\ externo} + CC_{descarte}.$$

Essa estrutura de custos pode ser apresentada como segue na Tabela 1:

<b>PREVENÇÃO</b>	<b>CORREÇÃO</b>
<b>Estrutura inicial</b>	<b>Estrutura inicial</b>
Investimentos em: Análise, projeto, especificação, aquisição e implantação das áreas físicas para laboratórios, oficinas, garagens, estudos, almoxarifados e escritórios; Seleção e capacitação de pessoal; Especificação e aquisição de instrumentação e ferramentaria, bancadas e componentes especiais para ensaios e simulações; Veículos para locomoção de pessoas e objetos; Sistemas de informação para dar suporte a todas as atividades meio e fim do SM; Equipamentos para uso em informática, comunicação de voz e dados, saúde, segurança do trabalho, higienização e escritórios; Especificação e aquisição de materiais de reposição; Taxas, seguros e impostos.	Investimentos em: Seleção e capacitação de pessoal na detecção e eliminação de falhas no sistema produtivo; Especificação e aquisição de instrumentação e ferramentaria para corretiva.

<b>Operacionalização</b>	<b>Operacionalização</b>
Gastos com: Sistemas de informação; Salários, encargos e abstenção remunerada; Desenvolvimento de pessoal (treinamentos, congressos e seminários); Materiais de reposição; Locação de bens; Contratação de serviços de terceiros; Seguros, taxas e impostos; Logística (água, energia, comunicações); Locomoção (passagens, hospedagens, taxis, alimentação,...); Depreciação; Melhoramentos.	Gastos com: Salários e encargos; Custo de parada da manutenção; Desenvolvimento de pessoal (treinamentos, congressos e seminários); Materiais de reposição; Contratação de serviços de terceiros; Logística (água, energia, comunicações); Locomoção (passagens, hospedagens, taxis, alimentação,...).

Tabela 1. Custos de Prevenção e Correção

O custo de todas as possibilidades de perdas decorrentes de cada configuração de falha  $Cfa$  será dado por:

$$Cfa = \sum_{fa=0}^n N_{fa} \cdot (Cpf_{fa} + Cic_{fa} + Cmu_{fa})$$

Onde:

$N_{fa}$  é o número de falhas do tipo  $fa$  possíveis de ocorrerem, num período de tempo  $T$ .

$Cic_{fa}$  são os custos decorrentes da insatisfação do cliente devido a falha do tipo  $fa$ ,

$Cpf_{fa}$  são as perdas de faturamento decorrentes da falta de fornecimento do produto ou serviço durante o período da falha do tipo  $fa$ , e

$Cmu_{fa}$  são os custos das multas e dispêndios decorrentes de legislações, contratos ou processos judiciais impostos em decorrência da falha do tipo  $fa$ .

No tocante ao gerenciamento dos custos das falhas, não é recomendável que a unidade de avaliação dos serviços seja o número de reparos realizados, uma vez que maximizar a disponibilidade exige minimizar a correção por paradas do sistema. Em geral um serviço é cobrado pela realização do mesmo, mas um serviço de manutenção não deve vender manutenção (reparos) e sim disponibilidade ou garantia de uso do bem. O contrato de manutenção deve firmar-se sobre valores, garantias e ganhos de disponibilidade.

Os custos de uma estrutura de manutenção, enquanto unidade de negócio, podem ser expressos como segue:

$$Cman = (CP + CC)_{pessoal} + (CP + CC)_{logística} + CP_{taxas} + (CP + CC)_{depreciação} + (CP + CC)_{serviço\ externo} + CP_{melhoramentos} + Cdescarte + Cfalha.$$

Minimizar os custos de uma estrutura de manutenção passa por minimizar tanto a estrutura no instante inicial  $t_i$  no qual deverá iniciar sua operação, como seus custos com a operação da unidade de negócio durante um tempo  $T$  que remunere o investimento realizado, garantindo a minimização dos ônus decorrentes da anormalidade operacional (falha), submetido a um definido fator de produção, portanto:

$$\text{Min. } C_{\text{man}} = \text{Min} [ CP(\text{investimento inicial} + \text{operacionalização}) + CC(\text{investimento inicial} + \text{operacionalização}) + C_{\text{falha}} ]$$

### **3.2 - Unidade de manutenção interna ou externa**

Uma unidade de manutenção vista como unidade de negócio pode apresentar duas configurações em relação ao sistema produtivo: interna ou externa. Na visão da unidade de negócio de manutenção interna à empresa produtiva, ao investimento na estrutura inicial acresce-se o investimento realizado em ganhos de confiabilidade do sistema produtivo, ou seja:

$$I_m = \text{ISP} + \text{IEI} + \text{IME}$$

Onde  $I_m$  é o investimento total de Manutenção; ISP é o investimento para a obtenção de ganhos de confiabilidade; IEI é o investimento na estrutura inicial do sistema de manutenção; e IME o investimento em melhoramentos na mesma estrutura de manutenção. Nesse caso, através do ISP há a possibilidade de que a equipe de manutenção acompanhe o sistema de produção desde o seu projeto, antes do início de seu ciclo de vida podendo interferir quanto à adequação do projeto aos requisitos de manutenção.

Uma forma resumida de apresentar simbolicamente essas duas condições da unidade de negócio é:

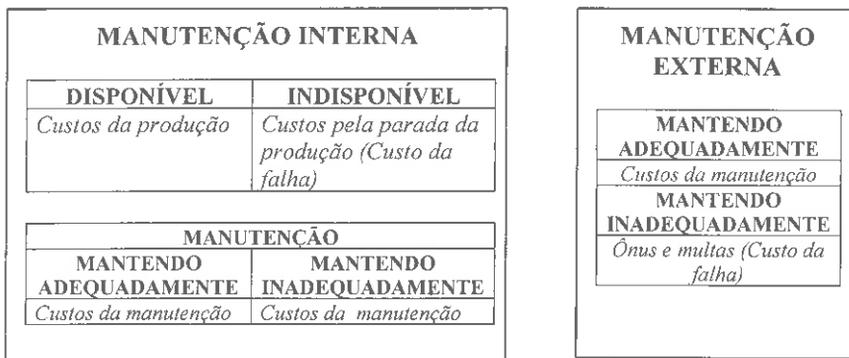


Figura 3 Unidades de Negócio em Manutenção.

Na possibilidade de que a unidade manutenção seja terceirizada e, portanto, externa à empresa produtiva, assume-se que o sistema produtivo encontra-se definido, ou pelo menos especificado. Este caso pode representar maiores limitações na especificação da qualidade do sistema de manutenção e maior necessidade de adequação aos limites impostos pelas condições financeiras do contrato. Ainda nessa condição, ao investimento na estrutura inicial realizado pelo sistema de manutenção acresce-se o investimento realizado unicamente pelo próprio sistema de manutenção e, desta feita, submetidos à condição de economia de gastos com manutenção. Nesse caso a expressão anterior passa a:

$$I = IEI + IME$$

Onde IEI é o investimento na estrutura inicial do sistema de manutenção e IME o investimento em melhoramentos na referida estrutura de manutenção.

Os custos de operacionalização da estrutura de manutenção, correspondem aos custos necessários para manter o sistema de manutenção atuando e atendendo aos seus clientes ao longo do tempo.

A estrutura de manutenção, no contexto de unidade de negócio, é composta de partes estruturais que devem funcionar integradas pelo objetivo de “manter o sistema sob sua responsabilidade”. A administração dessa estrutura de partes deve atender aos serviços técnico operacionais da especialidade manutenção, integrando-os às demais funções da unidade de negócios tais como: comercialização (marketing e vendas), gerais e administrativas, atuando como um todo funcional e estrutural.

Um impacto da decisão da unidade de manutenção ser interna ou externa à empresa na estrutura de custos da empresa é que quando a unidade de manutenção é interna é necessário um grande gasto estrutural o que caracteriza o custo como fixo. Já na unidade externa que funciona por contratos e necessidades específicas, esse custo se caracteriza como variável.

#### **4. Sistema de custeio e gestão da manutenção**

A seguir é apresentado um modelo proposto por SILVA (2000) que tem como objetivo a otimização de uma estrutura de manutenção (Tabela 2).

Objetos do Sistema de Informação/ Recursos	Atributos	Fatores de Otimização (indicadores)	
		Físicos	Monetários
<i>Pessoas</i>	<i>Identificação, capacitação, estado, e alocação.</i>	<i>Diminuição do tempo de ação por produto ou serviço. (Produtividade)</i>	<i>Salários diretos e indiretos; Incentivos a produtividade.</i>
<i>Instrumental / Ferramental, Transporte, Unidade de Manutenção.</i>	<i>Identificação, espécie, estado, aplicação, locação, MTTR, VU e MTBF e capacidade produtiva; Recurso primário; Configuração de confiabilidade com riscos e restrições.</i>	<i>Aumentos de confiabilidade e diminuição do MTTR. (Disponibilidade)</i>	<i>Gastos com aquisição, contratação, administração, manutenção, conservação, limpeza, depreciação, taxas, impostos e seguros; Custos da falha; Investimentos atuais e necessidades de investimento futuro em expansão e melhoramentos.</i>
<i>Materiais de reposição</i>	<i>Espécie, aplicação, quantidades e estado.</i>	<i>Aumentos dos MTBF e vida útil e diminuição do MTTR. Taxa de consumo</i>	<i>Gastos com aquisição, administração e manutenção; Custos da falha.</i>
<i>Prédios</i>	<i>Identificação, aplicação, tamanho da área e localização; Quantidade de pessoas, UM's, MR's, IF's e transportes; Configuração de confiabilidade com riscos e restrições; Padrões de ocupação mínima, recomendados.</i>	<i>Minimização das distâncias e áreas de ocupação. Facilidades da localidade.</i>	<i>Gastos com aquisição, locação, administração, manutenção, conservação, limpeza, depreciação, taxas, impostos e seguros; Custos da falha; Investimentos atuais e necessidades de investimento futuro em expansão e melhoramentos.</i>

<i>Planos de Ação</i>	<i>Identificação das atividades, quantidades realizadas, UM sobre a qual atua, recursos utilizados, periodicidade e tempos padrão, real e estimado; EM e deslocamentos envolvidos; Configuração de confiabilidade com riscos e restrições.</i>	<i>Diminuição dos tempos de preparação, deslocamento, ação e recursos de apoio; Métodos e processos de atendimento.</i>	<i>Custos por planos de ação; Custos da falha; Custos com prevenção e correção; Custos com deslocamentos; Custos com melhoramentos, reparo preditivos, preventivas e desativação.</i>
§	<i>Contratos com terceiros.</i>	<i>Exigências contratuais.</i>	<i>Gastos com concessão, serviços de terceiros, sistemas de informação, saúde e publicidade; Perdas com recebíveis.</i>
	<i>Consumos de água, energia e comunicação.</i>	<i>Diminuição dos kWh/kW, m<sup>3</sup> de água e impulsos de comunicação.</i>	<i>Gastos com água, luz, energia e comunicação.</i>

Tabela 2. Modelo do Sistema para Otimização de uma Estrutura de Manutenção.

Constata-se, pela análise do modelo apresentado, que o atendimento aos requisitos de custeio de manutenção exige um modelo próprio que agrega princípios, técnicas e métodos de diversos sistemas de custeio (ABC - Custeio Baseado em Atividades, TOC - Teoria das Restrições, Variável e outros), recompondo-os segundo cada objetivo específico do sistema de manutenção.

O modelo caracteriza-se por uma visão de previsão e planejamento, mas sua aplicação responde a avaliações de estruturas já montadas, indicando as alterações necessárias.

O modelo utiliza o sistema de custeio padrão, pois planeja que suas entradas sejam obtidas em laboratório sob condições ideais (padrões), reais (dados reais) ou estimadas por comparação com dados de outros sistemas semelhantes, permitindo antecipar os desempenhos esperados.

Os custos de oportunidade serão deduzidos a partir da análise das alternativas decorrentes das árvores de falhas e configurações de confiabilidade dos sistemas envolvidos.

O modelo possibilita a utilização dos conceitos de centro de custo funcional, estrutural, por objetivo ou por responsabilidade.

A linha “recurso - processo - atividade – custo” do critério ABC está implementada no modelo proposto. As atividades identificadas permitem a contextualização de seus recursos, produtos, serviços e clientes e a identificação de seu gerador de custo, complexidade e causa raiz. As transações estão identificadas de forma que o modelo apresentado está compatível com o método de custeio ABC. Os princípios do ABC foram aplicados no desenvolvimento do modelo. Características pertinentes a sistemas do quarto estágio estão incorporados ao modelo, tais como: planejamento dos recursos necessários, justificativa do investimento, melhorias de tempos do ciclo operacional, gerenciamento da atividade, gerenciamento do desempenho, análise de rentabilidade e estratégias de minimização de riscos. Há limitação na amplitude do modelo que se restringiu à avaliação da estrutura física e funcional com o objetivo de otimização de seus recursos, sem incorporar a visão ampla da gestão empresarial do sistema de manutenção.

O modelo proposto não se adequou ao método UEP – Unidade de Esforço de Produção. Para adequá-lo haverá necessidade de determinação dos postos operativos e seus

potenciais produtivos. Na fase de determinação da estrutura inicial tem relevância os dados de projeto, custos padrões e estimados. O modelo proposto dá condições de determinação das eficiência e eficácia exigidas pelo método das UEP's.

Métodos da filosofia japonesa como custo meta, "just in time" e "kaizen" podem ser implementados pelo modelo proposto, expandindo-o em aplicabilidade e possibilidades de resultados.

A gestão do ciclo de vida é processo inerente a função manutenção, no que se refere aos aspectos de engenharia. A agregação dos aspectos de custeio complementa o processo de análise da manutenção.

O método da contabilidade de ganhos apresenta grande aderência ao modelo nas decisões de aumento da confiabilidade dos processos e de otimização da estrutura pela identificação das possibilidades de restrições e correção antecipada dos fatores limitantes.

A metodologia de análise da cadeia de valor, análise de posicionamento estratégico e análise de direcionadores de custo pertinentes ao avanço desse trabalho ou a expansão do modelo além do objetivo de otimizar a infraestrutura, para a gestão da unidade de negócio manutenção como um todo com o fim de crescer vantagem competitiva.

## **5. Conclusão**

A otimização de uma estrutura de manutenção passa por otimizar conjuntamente os fatores técnicos ou de engenharia, operacionais e econômicos relacionados com prevenção, correção e confiabilidade.

O processo decisório em estruturas de manutenção caracteriza-se pela dificuldade de parametrização de seus fatores em sua etapa inicial, porém, uma vez que tais parâmetros estejam eficientemente disponibilizados, as condições nas questões de

avaliação e reformulação dessa mesma estrutura ficam simplificadas.

O modelo proposto por SILVA (2000), leva em consideração a formação de uma base de dados correlacionando critérios de engenharia e de custos, necessita da atuação coordenada dessas duas especialidades. É preciso que cada custo seja investigado quanto a sua relevância e características específicas tais como seus fatores de desempenho com relação a disponibilidade e rentabilidade, exigindo o domínio do conhecimento tecnológico em manutenção e em custos.

O processo de otimização da estrutura de manutenção está pautado basicamente sobre a configuração de confiabilidade do sistema produtivo. Como está montado sobre o pilar da disponibilidade máxima e esta é obtida com aumentos na confiabilidade do sistema que, por sua vez, é o resultado das confiabilidades do sistema produtivo mais a confiabilidade do sistema de prevenção de falhas, tanto mais eficiente será o sistema de manutenção, quanto menos for exigida a sua intervenção. Paradoxalmente, para estar em consonância com os objetivos da empresa produtora de bens ou serviços, e tendo a confiabilidade máxima como meta, o sistema de manutenção deve trabalhar tendo como ideal a sua extinção (não necessidade), ou então com altos custos de capacidade ociosa. A estratégia a ser seguida nesse sentido passa por priorizar primeiro, o investimento em ganhos de confiabilidade intrínseca do sistema produtivo; segundo, o investimento em ganhos de confiabilidade capazes de serem obtidos pelo sistema de prevenção e terceiro, o investimento em minimizar a indisponibilidade dos sistemas operativos. O mais difícil é comprovar até onde o investimento total está sendo menor do que os custos das falhas que não ocorreram ou que podem ter sido evitadas, e, de outra forma, também justificar as indisponibilidades ocorridas, que não foi capaz de evitar.

## 6. Bibliografia

- ALMEIDA, ROBERTO. *Gerência de Riscos*. Recife, Ed Universitária da UFPE, 1996.
- ANTUNES JÚNIOR, JOSÉ A. V. *Fundamentação do método das unidades de esforço de produção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Florianópolis: PPGEP/UFSC, 1988.
- BARROS FILHO, LUÍZ CORDEIRO. *Modelos de Decisão Aplicados à Avaliação da Manutenibilidade. O caso de Telecomunicações da CHESF*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Recife, PPGEP/UFPE, 1995.
- BERLINER, CALLIE & BRIMSON, JAMES. *Gerenciamento de Custos em Industrias Avançadas*. São Paulo, Ed TAQ, 1992.
- BORNIA, ANTONIO CEZAR. *Análise dos princípios do método das unidades de esforço de produção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Florianópolis, PPGEP/UFSC, 1988.
- BRIMSOM, JAMES A. *Contabilidade por Atividades - Uma Abordagem de Custeio Baseado em Atividades*. Rio de Janeiro, Ed. Campus, 1996.
- COGAN, SAMUEL. *Activity Based-Costing (ABC) - A Poderosa Estratégia Empresaria*. São Paulo, Ed. Pioneira, 1994.
- COOPER, ROBIN & KAPLAN, ROBERT. *Implementing Activity Based Cost Management*. EUA, Ed. IRWIN, 1992.
- COOPER, ROBIN & KAPLAN, ROBERT, *The Design of Cost Management Systems - Text, Cases and Readings*. New Jersey, Ed. Prentice Hall, 1991.

- GOLDMAN S. & SLATTERRY T. B. *Maintainability A Major Element of System Effectivness*. New York, Ed RKPC, 1977.
- GOLDRATT, E. M. & FOX, J. *A Meta*. São Paulo, IMAM, 1990.
- HANSEN, DON. & MOWEN, MARYANNE. *Management Accounting*. Ed South-Western College Publishing, Cincinnati, 1997.
- HENDRIKSEN, EDSON S. & VAN BREDA, MICHAEL F. *Teoria da Contabilidade*. São Paulo, Ed Atlas, 1999.
- LYONELL, P. *Maintenance Planing, Methods and Mathematics*. Paris, Ed Chapman & Hall, 1991.
- O'CONNOR, PATRICK D. T. *Practical Reliability Engineering*. London, Ed WIP, 1989.
- SAKURAY, MICHIHARU. *Gerenciamento Integrado de Custos*. São Paulo, Ed. Atlas, 1997.
- SHANK, JOHN K. & GOVINDARAJAN, VIJAY. *A Revolução dos Custos*. Rio de Janeiro, Ed. Campus, 1997.
- SILVA, Ângela M. de A.. *Sistema de custeio para apoio a gestão de manutenção: proposição de modelo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Recife, PPGE/UFPE, 2000.
- SLACK, NIGEL & CHAMBERS, STUART & HARLAND, CHRESTINE & HARIESON, ALAN & SOHNSTON, ROBERT. *Administração da Produção*. São Paulo, Ed. Atlas, 1997.
- TAKHASHI, YOSHIKAZY & OSADA, TAKASHI. *TPM / MTP - Manutenção Produtiva Total*. São Paulo, IMAN, 1993.



# O DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES

*Heldemarcio Leite Ferreira  
Cristiano Santos Lúcio de Melo  
Adiel Teixeira de Almeida*

## 1 - Introdução

Uma das questões mais importantes relacionadas à Gestão da Manutenção é, sem dúvida, o problema do dimensionamento de sobressalentes, tendo em vista as suas implicações sobre o desempenho da manutenção. O dimensionamento das peças de reposição da manutenção influencia fortemente os custos e a lucratividade da empresa. Por isso, o gerenciamento desse recurso é uma das tarefas mais críticas dos departamentos de manutenção. O dimensionamento incorreto pode acarretar grandes prejuízos. Juntamente com o gerenciamento dos recursos humanos, o planejamento das peças de reposição é essencial para garantir uma manutenção eficiente. Métodos quantitativos oriundos do contexto da Engenharia de Produção permitem um enriquecimento no processo decisório envolvendo a determinação do quantitativo de sobressalentes. Entretanto, o tratamento dado pelas empresas para esse assunto nem sempre incorpora um embasamento quantitativo adequado, muito embora existam disponíveis na literatura diversas contribuições nesse sentido.

O problema do dimensionamento de peças de reposição ocorre no planejamento de sistemas onde o ciclo de vida útil é focalizado. Existe uma abordagem de planejamento que enfoca a visualização de um sistema na fase de projeto, considerando aspectos de confiabilidade e custos, a qual é denominada de Terotecnologia.

Desse modo, o dimensionamento de sobressalentes é uma questão fundamental para a tomada de decisão no planejamento da manutenção, considerando que o número de sobressalentes afeta diretamente o tempo de parada ou de interrupção em um determinado processo. O dimensionamento deve então garantir que as peças necessárias estarão disponíveis na quantidade e hora certas. Assim como o excesso de peças resulta em prejuízos para a empresa, a falta de peças é igualmente negativa, resultando em perdas de produção pelo aumento do tempo de interrupção dos equipamentos. O gerenciamento do estoque de sobressalentes tem dois grandes objetivos que podem parecer conflitantes: contribuir para aumentar a disponibilidade dos equipamentos, através da aquisição de peças de reposição; ou seja, assegurar o fornecimento dos sobressalentes na quantidade adequada para reduzir o tempo de interrupção e; reduzir os custos de compra e armazenamento do estoque de peças.

Algumas técnicas de planejamento e controle de estoques foram desenvolvidas para o contexto de manufatura (sistemas de produção de bens), sendo estendidas para os sistemas de produção de serviços, como é o caso do *Just in Time*, que tem por objetivo atender a demanda instantânea, fornecendo apenas a quantidade necessária para o usuário. Essas técnicas são apropriadas para sistemas que possuem uma demanda previsível e determinada pelo usuário. Nos estudos de confiabilidade dos itens de manutenção, a demanda é um evento probabilístico, representada pela variável aleatória número de falhas. Por esse motivo, a literatura sobre dimensionamento de sobressalentes na área da manutenção aborda a questão de forma bem específica.

As peças de reposição da manutenção estão sujeitas a um sistema de gerenciamento que difere daquele aplicado aos materiais de produção. A principal diferença está na frequência de utilização, uma vez que as peças de reposição tendem a ser requisitadas de forma aleatória.

## 2 - O Dimensionamento

### 2.1 - *Classificação dos Sistemas quanto a Mantabilidade*

O tipo de sistema objeto do dimensionamento de sobressalentes é um outro aspecto a ser considerado, haja vista que o procedimento de cálculo apresenta diferenciação quanto à obtenção das variáveis, em especial o tempo T.

Para sistemas não reparáveis, deve ser considerado o tempo do ciclo de vida desejado para o sistema. Deve-se observar a questão de dificuldades posteriores de aquisição, além de aspectos gerais de estoque.

Para os sistemas reparáveis, a variável T é igual ao tempo em que o item será reparado. Nesse caso, o sistema é recuperado através da troca do item defeituoso por um outro já em estoque. A quantidade de sobressalentes em estoque será, portanto, igual ao quantitativo N mais uma unidade ( $QS=N+1$ ). Uma vez que o item defeituoso retorna ao estoque, após o reparo.

### 2.2 - *O comportamento da taxa de falhas com o tempo*

O dimensionamento de sobressalentes deve considerar que o quantitativo de peças de reposição é função da demanda do número de itens requisitados. Este número de itens, por sua vez, depende do número de falhas, ou seja, da confiabilidade do equipamento. Portanto, O problema a ser estudado está diretamente relacionado com o comportamento que a variável número de falhas apresenta em função do tempo. Deve-se considerar também a independência das falhas entre os itens que compõem o sistema.

A questão do dimensionamento de sobressalentes é tratada apenas no segundo período da vida de um equipamento que corresponde ao período de vida útil ou à fase operacional. Como no período de vida útil, admite-se que a taxa de falhas  $\lambda(t)$  apresenta

um comportamento constante em função do tempo, a função confiabilidade é representada pela função de probabilidade exponencial. Em sistemas constituídos de vários itens, o tempo entre falhas tende a uma distribuição exponencial à medida que a complexidade e o tempo de operação aumentam. Esta aproximação pode ser aplicada para um equipamento composto de vários componentes ou módulos, cada um seguindo padrões diferentes de falha. Porém, deve-se tomar alguns cuidados na aplicação desta aproximação; ou seja, quando um dos itens do sistema apresenta um padrão de falhas muito acentuado em relação aos demais, então o padrão coletivo tende a ser afetado principalmente por este item.

Segundo é mostrado pela análise da curva da banheira, para a primeira fase da vida, em que as falhas predominantes são classificadas como falhas precoces, os equipamentos estão acobertados pela garantia do fabricante, não existindo a necessidade do usuário direcionar esforços para solucionar esse problema na fase inicial da vida do item. Vale ressaltar que nesta fase a taxa de falhas  $\lambda(t)$  é decrescente com o tempo. As modernas técnicas de Gerência da Qualidade Total e os procedimentos ditados dentro das normas ISO 9000 estão fazendo com que esta fase de falhas iniciais seja reduzida ou até não mais exista. O período de mortalidade infantil tende a ser anulado ou reduzido a um mínimo, como consequência da redução do número de peças produzidas fora de especificação, defeituosas ou fracas.

Na terceira e última fase da vida do equipamento não existe sentido em se estudar o problema do dimensionamento de sobressalentes, pois nesta fase o tipo de falha que ocorre é devido ao desgaste que o mesmo apresenta com o tempo de utilização. É importante observar que nesta fase a taxa de falhas  $\lambda(t)$  é crescente com o tempo, de modo que a realização de reparos não é suficiente para modificar o comportamento degenerativo do equipamento. Nesta etapa, o equipamento atinge o seu limite de uso. A partir desse ponto, deve-se partir para uma política de substituição, de

reconstrução ou de revisão geral, não importa o nome que seja dado. Se economicamente conveniente, este período poderá ser retardado o necessário até que eventualmente chegue-se à obsolescência, onde então poderá ser descartado. Atualmente, as técnicas de manutenção preditiva, a detecção precoce de falhas potenciais e a substituição de peças e componentes dentro de um esquema racional e gradativo prolongará a vida do equipamento. Portanto, deve ser adotada a melhor combinação de instrumentação necessária para detecção precoce das falhas e as técnicas preventivas como a substituição regular de peças desgastadas, programação de lubrificação e limpeza.

Podem acontecer situações em que os equipamentos sejam descartados por se tornarem tecnicamente obsoletos ou pouco produtivos, dentro da nova realidade de mercado, apesar de que ainda estejam em condições de continuarem produzindo. A desatualização tecnológica será o novo limitante da vida do equipamento e não mais a expectativa de vida, conforme projetado.

### **2.3 - O modelo de Poisson**

No período de vida útil do equipamento, o comportamento da variável aleatória número de falhas é representado pela distribuição de probabilidade de Poisson. Observa-se uma relação entre a distribuição exponencial e o processo de Poisson. Isto é, se “ $t$ ” segue uma distribuição exponencial, então o número de falhas “ $x$ ” por período corresponde a um processo de Poisson.

O processo de Poisson tem muitas aplicações em confiabilidade, especialmente na formulação de modelos de estoque, de forma que a distribuição de Poisson é freqüentemente utilizada para determinação de quantitativo de sobressalentes. Quando o número de falhas  $x$  tem um comportamento assumido como processo de Poisson, as seguintes hipóteses são consideradas:

1. Independência entre o número de falhas em intervalos diferentes;
2. A probabilidade de ocorrer uma falha em um pequeno intervalo é aproximadamente proporcional ao intervalo;
3. A probabilidade de ocorrer mais de um evento num intervalo pequeno é desprezível comparada com a probabilidade de ocorrer um evento.

Com base nessas hipóteses, mostra-se que a probabilidade  $P(t, x|\lambda)$ , de ocorrer um número de falhas  $x$ , no tempo  $t$  para uma taxa de falhas (item reparável) ou de risco (item não reparável)  $\lambda$ , é dada pela função distribuição de probabilidade de Poisson:

$$P(X(t) = x | \lambda) = \frac{(\lambda t)^x \cdot e^{-\lambda t}}{x!}$$

A expressão para a distribuição acumulada de Poisson é apresentada a seguir:

$$P(x \leq N) = \sum_{x=0}^N \frac{m^x e^{-m}}{x!}$$

Onde,

$P(x \leq N)$  é a probabilidade de que o número de falhas  $x$ , no período de tempo  $t$  seja menor ou igual a  $N$ .

$m = n \cdot \lambda \cdot t$ , com  $\lambda$  sendo a taxa de falhas e  $n$  representando a quantidade de itens em exposição.

### **3 - Abordagens para o dimensionamento de sobressalentes**

Na literatura específica, as seguintes abordagens podem ser encontradas para o problema do dimensionamento de peças sobressalentes:

- Abordagem baseada no risco de quebra de estoque;
- Abordagem baseada no risco de quebra de estoque com o uso do conhecimento a priori;
- Abordagem segundo a restrição de custo;
- Abordagem segundo uma função utilidade Multiatributo

#### **3.1 - Abordagem Baseada no Risco de Quebra de Estoque**

O objetivo dessa abordagem consiste em determinar uma quantidade de sobressalentes  $N$ , para um dado risco de quebra de estoque  $\alpha$ , dentro de um determinado intervalo de tempo  $T$ . Desse modo, o custo é considerado de forma indireta, como consequência do cálculo. Pois, à medida que se deseja reduzir o risco  $\alpha$ , há um conseqüente aumento no custo e vice-versa. Portanto, o custo é obtido no instante em que se define qual será o risco a se correr.

O risco  $\alpha$  de quebra no estoque significa a probabilidade de que o número de sobressalentes em estoque seja menor do que o número de falhas  $x$ , ou seja,  $\Pr[x > N]$ .

Sendo definida a margem de segurança  $MS = 1 - \alpha$ , que significa a probabilidade de que o estoque não quebrará no intervalo considerado,  $MS = (1 - \alpha) = \Pr[x \leq N]$ , pois:

$$\text{Risco } \alpha = \Pr[x > N]$$

$$MS = 1 - \alpha = 1 - \Pr[x > N] = \Pr[x \leq N]$$

Onde,

$\alpha$  = risco de quebra de estoque

$x$  = número de falhas

$N$  = quantitativo de sobressalentes calculado

$MS$  = Margem de segurança

Portanto, a margem de segurança corresponde à distribuição acumulada do número de falhas. Admitindo-se o processo de Poisson, para um sistema composto de  $n$  itens, tem-se:

$$MS = \Pr[x \leq N] = \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!}$$

Chamando  $\lambda_S = n\lambda$ :

$$MS = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda_S T)^k e^{-\lambda_S T}}{k!}$$

Onde,

$n$  = quantidade de itens em exposição

$\lambda$  = taxa de falhas

$\lambda_S$  = taxa de falhas do sistema

$T$  = intervalo de tempo

O processo de cálculo desta abordagem consiste em se obter um quantitativo de sobressalentes  $N$ , para um certo risco  $\alpha$  de quebra no estoque ou para a margem de segurança, de forma que:  $\Pr[x > N] < \alpha$  ou  $\Pr[x \leq N] \geq MS$ .

Então, o procedimento dessa abordagem consiste em se verificar cada um dos possíveis valores de  $N$ , iniciando a partir de  $N = 0$  (ausência de sobressalentes) até que se encontre o primeiro valor de  $N$  que atenda a condição anteriormente estabelecida.

A aplicação dessa abordagem leva em consideração três aspectos: o contexto do problema no qual ela será aplicada, o tipo de sistema onde se aplicará o procedimento e, por fim, a definição de quais são cada um dos parâmetros da função probabilidade de Poisson, especialmente o intervalo de tempo considerado  $T$ .

### **3.2 - Abordagem Baseada no Risco de Quebra de Estoque com Uso de Conhecimento *a priori***

Existem situações práticas em que não é possível a obtenção dos valores relativos aos parâmetros de confiabilidade e/ou manutenibilidade de um sistema. Esta abordagem apresenta um procedimento para o dimensionamento de sobressalentes nos casos em que pelo menos um desses parâmetros não seja conhecido.

Nesses casos, utiliza-se o conhecimento *a priori* em relação à confiabilidade e/ou a manutenibilidade do sistema. Assim, uma probabilidade *a priori* é aplicada para obtenção de valores esperados de risco ou margem de segurança, de modo a determinar os quantitativos adequados de sobressalentes. Logo, na ausência de dados sobre os parâmetros considerados no procedimento anterior, pode-se obter uma distribuição de probabilidade *a priori* sobre estes. Para esse estudo, três situações são consideradas:

- a) Ausência de conhecimento sobre a taxa de falhas  $\lambda$ ;
- b) Ausência de conhecimento sobre o tempo médio de reparo MTTR (*Mean Time To Repair*);
- c) Ausência de conhecimento sobre  $\lambda$  e MTTR.

No primeiro caso, obtém-se uma probabilidade *a priori* sobre  $\lambda$ :  $\pi(\lambda)$ , no segundo caso, deve-se obter a probabilidade *a priori* sobre o MTTR:  $\pi(\text{MTTR})$ . Para o último caso, são necessárias as duas funções  $\pi(\lambda)$  e  $\pi(\text{MTTR})$ .

Para tratar o problema do dimensionamento de sobressalentes na ausência de dados, considera-se o valor esperado da margem de segurança (MS).

No primeiro caso, tem-se:

$$E_{\lambda}MS = \int_{\lambda} MS \pi(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} \left[ \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!} \right] \pi(\lambda) d\lambda$$

No segundo caso, tem-se que o valor esperado de MS:

$$\begin{aligned} E_{\text{MTTR}}MS &= \int_{\text{MTTR}} MS \pi(\text{MTTR}) d\text{MTTR} \\ &= \int_{\text{MTTR}} \left[ \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda \text{MTTR})^k e^{-n\lambda \text{MTTR}}}{k!} \right] \pi(\text{MTTR}) d\text{MTTR} \end{aligned}$$

$$E_{\lambda, \text{MTTR}}MS = \int_{\text{MTTR}} \left[ \int_{\lambda} MS \pi(\lambda) d\lambda \right] \pi(\text{MTTR}) d\text{MTTR}$$

No terceiro caso, tem-se:

Dentre os procedimentos utilizados para a elicitação do conhecimento *a priori* sobre os parâmetros de interesse, o método baseado nos intervalos equiprováveis de Raiffa constitui uma alternativa viável para aplicação no meio empresarial.

Esse método é baseado na avaliação de percentis, mediante uma entrevista realizada com um especialista na qual, por subdivisões sucessivas, são obtidos os intervalos para os quais a chance de encontrar o valor do parâmetro de interesse é a mesma.

### **3.3 - Abordagem Segundo a Restrição do Custo**

Nesta abordagem, o atributo custo é tratado de forma direta, não sendo apenas uma consequência do resultado obtido. O critério custo é visto como um fator limitante nesse procedimento, pois para um determinado limite de custo, tenta-se minimizar o risco de quebra do estoque. Assim, o processo de decisão consiste em se determinar o valor limite de custo, dependendo da disponibilidade de recursos que se possua, para o qual o quantitativo de sobressalentes  $N$  minimiza o risco de quebra do estoque. O processo de cálculo consiste em se obter um quantitativo  $N$  de sobressalentes, de forma que  $C_T \leq C_0$ , em outras palavras, consiste em garantir que o custo total final  $C_T$  para a aquisição de sobressalentes seja menor ou igual aos recursos disponíveis  $C_0$ .

$$C_T = N.C$$

Onde,  $N$  é o quantitativo de sobressalentes e  $C$  o custo individual de cada item. O procedimento consiste em encontrar o valor de  $N$ , iniciando a partir do quantitativo  $N=0$  (ausência de sobressalentes) que minimize o risco e que atenda a condição previamente estabelecida pela restrição orçamentária.

Em situação mais complexa, como é o caso de sistema que possui equipamento modularizado, com uma quantidade de  $J$  tipos de módulos diferentes, cada módulo com a sua respectiva taxa de falhas  $\lambda_i$ , o quantitativo  $N$  de sobressalentes é obtido por um vetor com a quantidade de sobressalentes para cada um dos módulos:

$$N = [N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_J]$$

Para essa situação, o objetivo é obter o vetor  $N$ , formado pela combinação das quantidades individuais de cada um dos módulos, que minimiza o risco ou que maximiza a margem de segurança do sistema e que o custo total para a aquisição dos sobressalentes satisfaça a restrição inicial de custo  $C_0$ , ou seja:

$$C_T = N_1.C_1 + N_2.C_2 + \dots + N_j.C_j + \dots + N_j.C_j$$

$$C_T = \sum_{j=0}^J N_j \cdot C_j$$

Onde,

$C_j$  - É o custo individual do módulo do tipo  $j$ ;

$N_j$  - É a quantidade de módulos do tipo  $j$ .

Para esta abordagem, tem-se que a margem de segurança do lote  $N = [N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_j]$  é a probabilidade de que nenhum dos subestoques quebrem, ou seja, o produtório entre as margens de segurança dos módulos:

$$MS[N] = MS_1[N_1] \cdot MS_2[N_2] \cdot \dots \cdot MS_j[N_j] \cdot \dots \cdot MS_j[N_j]$$

$$MS[N] = \prod_{j=0}^J MS_j[N_j]$$

Portanto, a solução consiste em maximizar  $MS[N]$ , de forma que o custo total seja menor ou igual ao custo inicial imposto como restrição,  $C_T[N] \leq C_0$ . A expressão final obtida para  $MS[N]$  é uma função exponencial, o que determina que a obtenção do resultado seja feita por meio de técnicas de programação não linear.

### 3.4 - Abordagem Segundo uma Função Utilidade Multiatributo

O modelo consiste de uma função utilidade multiatributo composta por dois atributos que são o custo e o risco de quebra do estoque. Como resultado da combinação de ambos os atributos, têm-se a função utilidade da consequência expressa por  $u(p)$ . A decisão a ser adotada nesse procedimento consiste em determinar valores para os atributos custo  $C$  e risco  $\alpha$ , de modo a se obter a maximização da função utilidade multiatributo da consequência que é também expressa por  $u(\alpha, C)$ . A solução é obtida através da escolha de um quantitativo de sobressalentes a ser adquirido.

Para o uso de técnicas da Teoria da Decisão na formulação do problema de decisão multicritério no dimensionamento de sobressalentes, é necessária a definição dos elementos básicos da teoria no contexto deste problema.

Com respeito ao espaço de ação, este é composto pelas possíveis quantidades de sobressalentes  $N$ , sendo este o elemento sobre o qual o decisor pode atuar de forma a alcançar o objetivo desejado que é o da maximização da função utilidade multicritério  $u(\alpha, C)$ . O segundo elemento, que é o estado da Natureza, consiste na confiabilidade do sistema e na manutenibilidade da estrutura de manutenção, podendo os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade ser obtidos através de um procedimento de elicitación do conhecimento *a priori* que o especialista apresenta a respeito dos referidos parâmetros. A observação dos dados referentes à confiabilidade e manutenibilidade do sistema que se pretende estudar permite algumas considerações a respeito do comportamento do estado da Natureza através da análise estatística, salientando-se que tal comportamento apresenta influência sobre as consequências da decisão tomada pelo decisor, porém o mesmo não tem qualquer controle ou influência sobre o referido elemento.

O espaço de consequência, que é expresso em função da utilidade multiatributo  $u(\theta, a)$  é igual a  $E\{u(\alpha, C)\}$ , segundo um dos axiomas da Teoria da Utilidade em que a utilidade da ação é igual a utilidade esperada da consequência. A função  $u(\alpha, C)$  é obtida através de um *Procedimento de Elicitação da Função Utilidade Multiatributo* que permite que seja elicitada toda a estrutura de preferência do decisor com respeito aos valores do estado da Natureza, ou seja, com respeito ao risco da quebra do estoque, cujo comportamento é obtido a partir do conhecimento *a priori* introduzido no modelo.

Desse modo, após a definição de cada um dos elementos da Teoria da Decisão, o problema de decisão consiste em determinar a quantidade de sobressalentes  $N$ , que maximiza  $u(\alpha, C)$ .

A elaboração matemática do modelo de decisão multicritério proposto é formalizada a partir do axioma da continuidade da Teoria da Utilidade que afirma que a utilidade de uma ação é igual à utilidade esperada das possíveis consequências provenientes dessa ação, podendo ser expressa matematicamente como segue:

$$u(\theta, a) = E_{p|\theta, a} \{u(p)\}$$

$$E_{p|\theta, a} \{u(p)\} = \int u(p) \Pr(p|\theta, a) dp$$

A função utilidade de consequências  $u(p)$  é a função utilidade a ser elicitada junto ao decisor, a partir do espaço de consequências apresentado por ele. O componente  $\Pr(p|\theta, a)$  é a função consequência da ação adotada pelo decisor, que também pode ser escrita como  $\Pr(\alpha, C|\theta, a)$ . Esta nova forma de expressar a função consequência só é possível porque a função utilidade de consequência elicitada  $u(p)$  está em função dos atributos risco  $\alpha$  e custo  $C$ , ou seja,  $u(p) = u(\alpha, C)$ .

A partir das definições apresentadas a respeito dos atributos que compõem a função consequência, tem-se que:  $C = C_u \cdot N$  e risco  $\alpha = 1 - MS$ . Onde  $N$  corresponde a ação da Teoria da Utilidade que, dentre todas as existentes no espaço de ações, maximiza a função utilidade de consequência.

O atributo risco de quebra do estoque é a probabilidade de que o número de itens que falham seja superior à quantidade de sobressalentes no estoque; esta ausência de sobressalentes no estoque é que se define como quebra no estoque. Esse atributo é definido a partir da Margem de Segurança e, considerando o processo de Poisson, tem-se que:

$$MS = \Pr[x \leq N] = \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!}$$

$$Risco \alpha = 1 - MS = 1 - \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!}$$

Portanto, a partir das definições do Risco  $\alpha$  e do custo  $C$ , é possível o desenvolvimento da função consequência  $\Pr(\alpha, C | \theta, a)$ . O custo do sobressalente depende exclusivamente da ação da teoria da utilidade escolhida para maximizar a utilidade, não existindo, para esse caso, dependência do estado da Natureza  $(\lambda, T)$ .

Por outro lado, o risco  $\alpha$  depende do estado da Natureza e da ação a ser adotada pelo decisor, não havendo, portanto, dependência entre os atributos, o que permite que a probabilidade condicional  $\Pr(p | \theta, a)$  possa ser escrita da seguinte forma:

$$\Pr(p | \theta, a) = \Pr(\alpha, C | \theta, a) = \Pr(\alpha | \theta, a) \cdot \Pr(C | \theta, a)$$

O desenvolvimento da  $\Pr(C|\theta, a)$  é realizado a partir da definição de que  $C_i = a_i \cdot C_u$ , ou seja, para cada ação determinada pelo decisor tem-se um custo respectivo, o que possibilita apenas a existência de duas probabilidades, a saber:

$$\begin{aligned} \Pr(C_i|\theta, a) &= 1 && \text{se, e somente se, } a = a_i \\ \Pr(C_i|\theta, a) &= 0 && \text{se, e somente se, } a \neq a_i \end{aligned}$$

Como  $C_i$  sempre será igual ao produto entre  $a_i$  e  $C_u$ , a  $\Pr(C|\theta, a)$  é igual a 1. Logo:

$$\Pr(p|\theta, a) = \Pr(\alpha, C|\theta, a) = \Pr(\alpha|\theta, a) \cdot 1 = \Pr(\alpha|\theta, a)$$

Para a  $\Pr(\alpha|\theta, a)$  tem-se que o Risco  $\alpha = 1 - \Pr(\lambda, N, T)$ ; portanto, com os valores de  $\lambda$ ,  $N$  e  $T$ , facilmente o risco pode ser determinado. Assim sendo, de forma análoga a apresentada para o custo, tem-se que:

$$\Pr(\alpha = 1 - MS|\theta, a) = 1 \quad \text{se, e somente se, } MS = \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!}$$

$$\Pr(\alpha = 1 - MS|\theta, a) = 0 \quad \text{se, e somente se, } MS \neq \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!}$$

O comportamento da variável aleatória número de falhas de um sistema é representado pela distribuição de Probabilidades de Poisson, devido ao fato de que o parâmetro taxa de falhas apresenta um comportamento constante em função do tempo, haja vista que a função confiabilidade é representada pela função de probabilidade exponencial. A probabilidade  $\Pr(\alpha = 1 - MS|\theta, a)$  deve ser igual a 1, o que simplifica a função consequência em:

$$\Pr(p|\theta, a) = \Pr(\alpha, C|\theta, a) = \Pr(\alpha|\theta, a) \cdot \Pr(C|\theta, a)$$

A partir desse desenvolvimento, é conclusivo que a maximização de  $u(\alpha, C)$  é obtida através de uma abordagem determinística, onde  $u(\theta, a_i) = u(p | \theta, a_i)$  que consiste em determinar a quantidade de sobressalentes  $N$ .

A consequência custo é função de  $N$ , a consequência risco é função de  $\lambda$ ,  $T$  e  $N$ ; os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade são incertezas; o risco é função de  $\pi(\lambda)$ ,  $\pi(T)$  e  $N$ .

Dentre os critérios utilizados para a maximização de uma função utilidade  $u(\theta, a_i)$ , destaca-se o método Bayesiano que consiste em escolher a ação  $a_i$ , a quantidade de sobressalentes, de forma a se maximizar a utilidade esperada  $u(\theta, a_i)$ , em função da probabilidade *a priori*  $\pi(\theta)$ , segundo a seguinte formulação:

$$\text{Max}_{a_i} \int_{\theta} u(a_i, \theta) \pi(\theta) d\theta$$

O estado da Natureza tem duas dimensões, uma que corresponde à confiabilidade dos equipamentos que compõem o sistema, sendo representada pela taxa de falhas do sistema  $\lambda$ s. A outra dimensão é a manutenibilidade do sistema, que por definição é reparável, sendo representada pelo tempo médio de reparo, MTTR. Portanto, o estado da Natureza  $\pi(\theta)$  pode ser definido como sendo  $\pi(\lambda, \text{MTTR})$ , para  $\theta = (\lambda, \text{MTTR})$ . De modo que a utilidade esperada pode ser expressa como segue:

$$E_{\alpha, C | \lambda, T, N} \{u(\alpha, C)\} = \int_{T_0}^{T_m} \int_{\lambda_0}^{\lambda_m} u(\lambda, T; N) \pi(\lambda) \pi(T) d\lambda dT$$

Portanto, a maximização da função utilidade multiatributo  $u(\theta, a)$  é obtida pela maximização da utilidade esperada, em função do número de sobressalentes, ou seja:

$$\text{Max}_N E_{\lambda, T} \{u(\lambda, T; N)\}$$

Podendo ser formulado matematicamente como:

$$\text{Max}_N \int_{T_0}^{T_m} \int_{\lambda_0}^{\lambda_m} u(\lambda, T; N) \pi(\lambda) \pi(T) d\lambda dT$$

Se, e somente se, o atributo risco  $\alpha$  for igual a:

$$1 - \sum_{k=0}^N \frac{(n\lambda T)^k e^{-n\lambda T}}{k!} \text{ e o atributo custo } C \text{ igual a: } a_j \cdot C_u.$$

No caso em que o parâmetro de confiabilidade taxa de falhas  $\lambda$  é conhecido, devido à existência de dados referentes aos tempos entre falhas, é possível expressar a utilidade esperada da consequência através da nova forma a seguir:

$$E_{\beta, C | \lambda, T; N} \{u(\alpha, C)\} = \int_{T_0}^{T_m} u(\lambda, T; N) \pi(T) dT$$

A maximização da função utilidade multiatributo  $u(\theta, a)$  é obtida também pela maximização da utilidade esperada, em função da quantidade  $N$  de sobressalentes. Sendo formulada como:

$$\text{Max}_N \int_{T_0}^{T_m} u(\lambda, T; N) \pi(T) dT$$

No caso em que o parâmetro Tempo Médio Para Reparo  $T$  é conhecido, pelo fato da existência de dados referentes aos tempos para suprimento, é possível que a utilidade esperada seja escrita através da nova forma a seguir:

$$E_{\alpha, C | \lambda, T; N} \{u(\alpha, C)\} = \int_{\lambda_0}^{\lambda_m} u(\lambda, T; N) \pi(\lambda) d\lambda$$

A maximização da função utilidade multiatributo  $u(\theta, a)$  é obtida através da maximização da utilidade esperada, em função da quantidade  $N$  de sobressalentes. Sendo formulada como:

$$\text{Max}_N \int_{\lambda_0}^{\lambda_m} u(\lambda, T; N) \pi(\lambda) d\lambda$$

#### 4 - Considerações Finais

Neste trabalho procurou-se enfatizar a importância do dimensionamento de sobressalentes para o planejamento da manutenção, considerando o seu impacto sobre a disponibilidade do sistema envolvido. Portanto, o assunto requer um tratamento quantitativo adequado que incorpore o aspecto da incerteza associada, através da utilização de modelos apropriados para a determinação do quantitativo de peças de reposição. Nesse sentido, algumas abordagens existentes na literatura específica sobre o tema foram apresentadas para dar suporte ao problema:

- Abordagem baseada no risco de quebra de estoque;
- Abordagem baseada no risco de quebra de estoque com o uso de conhecimento a priori;
- Abordagem segundo a restrição de custo e
- Abordagem segundo uma função de utilidade multiatributo.

Estudos complementares poderão abordar aspectos específicos não abrangidos por este trabalho, de modo a subsidiar a solução deste problema típico da área de Engenharia de Manutenção.

Como resultado dos estudos desenvolvidos alguns softwares têm sido desenvolvidos para dar suporte a decisão em problemas de decisão (Almeida, Cavalcante & Ferreira, 2001). Dentre estes (demo disponível Internet: [www.ufpe.br.gpsid](http://www.ufpe.br.gpsid)) podem ser citados:

- DIMSOB-R-v3.1 Dimensionamento de Sobressalentes Baseado em Risco. 2001.
- QUESTPRI-v2.1 Questionário de Conhecimento a Priori sobre Confiabilidade e Manutenibilidade.

## Bibliografia

- ALMEIDA, A. T. de. Multicriteria Decision Making on Maintenance: Spares and Contracts Planning. *European Journal of Operational Research*, Holanda, v.129, n.2, p.235-241, 2001.
- ALMEIDA, A. T. de (2000) Decisão Multicritério na Engenharia de Manutenção – Modelos de Decisão e Aplicações In: Almeida A. T. de & Souza, F.M.C., *Produtividade e competitividade: aplicações e inovações*. Editora Universitária, p255-299.
- ALMEIDA, A. T. de (1988) *Dimensionamento de sobressalentes de equipamentos eletrônicos*. III Congresso Brasileiro de Manutenção. Salvador, BA, 1988, p184-197.
- ALMEIDA, A. T. de & Albuquerque, A. G. R. (1987) *Critérios para dimensionamento de sobressalentes de equipamentos de telecomunicações*. IX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia. Belo Horizonte, MG, BH/GTL/01, p01-04.
- ALMEIDA, A. T. de (1996) Multicriteria for spares provisioning using additive utility function. *International Conference on Operational Research for Development*, II. Rio de Janeiro, RJ, p1414-1418.

- BARLOW, R. E. & PROSCHAN, F. (1967) *mathematical Theory of Reliability*. John Willey & Sons, Inc.
- FERREIRA, Heldemárcio Leite, ALMEIDA, A. T. de,. (2001) Aplicação do modelo de risco de quebra do estoque para o dimensionamento de sobressalentes de manutenção, considerando o uso do conhecimento a priori - um estudo de caso na Celpe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 2001, Rio de Janeiro. Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO. Rio de Janeiro: ABRAMAN, v.1. p.1-19.
- GOLDMAN, A. S. & SLATTERY, T. B. (1977) *Maintanability: A Major Element of System Effectiveness*. Robert E. Krieger Publishing Company
- MELO, C. S. L. de ; SOUZA, J. d. J. L.; ALMEIDA, A. T. de (1997) *Conhecimento a priori no Dimensionamento de Sobressalentes Baseado no Risco de Quebra de Estoque*. Anais XXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 1, p58-59.
- ALMEIDA, A. T. de, CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio, FERREIRA, Heldemárcio Leite. DIMSOB-R-v3.1 Dimensionamento de Sobressalentes Baseado em Risco. 2001.
- ALMEIDA, A. T. de, CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio, FERREIRA, Heldemárcio Leite. QUESTPRI-v2.1 Questionário de Conhecimento a Priori sobre Confiabilidade e Manutenibilidade. 2001.



# TERCEIRIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO

*Adiel Teixeira de Almeida  
Rogério Augusto Coêlho Fernandes*

## **1 - Introdução**

A redução de custos em busca de maiores lucros associada a melhoria da qualidade dos produtos estão entre os objetivos principais de empresas globais inseridas em um ambiente competitivo. Dentro deste contexto a terceirização de serviços tem ocupado um papel importante na estratégia das empresas, no que se refere a orientação da empresa para o seu negócio principal. Assim diversas atividades incluindo manutenção, projeto de engenharia serviços contábeis, frota de carros, entre outros, que anteriormente ocupavam um contingente de funcionários dentro da própria empresa passaram a ser contratados no mercado através de empresas prestadoras de serviço.

Neste capítulo iremos nos ater ao problema de terceirização de serviços de manutenção, em uma abordagem voltada para os aspectos de engenharia de manutenção e teoria da decisão.

A relação entre a empresa contratante e a contratada é regida através de um contrato em que as partes envolvidas definem as regras do serviço a ser executado, por um período previamente acordado.

## **2 - O Problema**

Os contratos de serviços na área de manutenção normalmente enfatizam os aspectos legais através de cláusulas que tratam sobre preço, forma de reajuste, forma de pagamento,

garantias, aspectos técnicos, cessão, retenção/multas/danos, rescisão, prazo, foro e outras.

Uma nova modalidade de contrato tem sido praticada na área de manutenção, onde já se constata a inclusão de aspectos de *engenharia de manutenção* com o objetivo de assegurar a disponibilidade dos sistemas envolvidos. Neste tipo de contrato ressaltamos empresas de prestação de serviços que mencionam dados de MTBF e MTTR de sistemas, e que incluem em suas propostas o apoio de Sistema de Informação de Manutenção.

A engenharia de confiabilidade,(1),(2) inicia-se desde a fase de projeto, momento em que é definida a disponibilidade requerida pelo sistema. Neste aspecto a associação de equipamentos em redundância e ainda o MTBF de cada equipamento irá garantir a confiabilidade requerida.

A manutenibilidade (1), estaria relacionada com o tempo de atendimento e com o tempo de reparo, que é função do treinamento da equipe de manutenção, habilidade dos técnicos e da estrutura de sobressalentes.

Portanto, a contratação de serviços prescinde da engenharia de manutenção a fim de assegurar níveis de disponibilidade adequados aos sistemas objeto do contrato. Partindo do pressuposto de que os aspectos de confiabilidade foram corretamente tratados na fase de projeto, restaria o estudo da manutenibilidade a ser contemplado nos contratos de manutenção. Neste aspecto estariam relacionados os tempos de atendimento, os tempo de reparo, sobressalentes necessários e o nível de capacitação das equipes de manutenção.

A estrutura de manutenção da empresa prestadora de serviço é preparada para atender a mais de uma empresa, através de uma equipe de técnicos devidamente treinados pronto para responder as chamadas dos clientes que lhe são comunicadas.

O tempo em que o técnico recebe a chamada e se desloca ao cliente é denominado de *tempo de atendimento*. As empresas prestadora de serviço procuram manter a ociosidade de suas equipes dentro de determinados padrões, a partir do controle do número de técnicos que serão colocados à disposição das empresas. Desta forma o tempo de atendimento a ser negociado com a empresa contratante será função da estrutura organizacional da empresa prestadora de serviço. Além do tempo de atendimento um outro fator exerce influência no tempo de interrupção de um sistema.

O tempo em que a equipe de manutenção inicia o reparo e devolve o sistema ao seu estado normal de operação é denominado de *tempo de reparo*. Este tempo é função do treinamento, da habilidade técnica da equipe e da disponibilidade de sobressalentes no local de reparo.

Neste contexto o custo de um contrato de manutenção formulado por uma prestadora de serviços busca remunerar adequadamente o custo da sua estrutura de manutenção que estará a disposição da empresa contratante.

Embora no passado a estrutura de manutenção mantivesse um contingente elevado de técnicos a disposição da produção, como forma de garantir um adequado nível de disponibilidade do sistema, este modelo tornou-se bastante dispendioso e não se ajusta a estratégia atual de produção. A estratégia de produção em vigor nas empresas requer da manutenção um compromisso entre a garantia da disponibilidade dos equipamentos e o custo do serviço prestado. Os contratos de manutenção, por sua vez, estariam inseridos dentro desta estratégia a partir da inclusão em suas cláusulas, de aspectos relacionados com a mantenedibilidade do sistema e através de uma remuneração de seus serviços compatível com o mercado.

Em um ambiente competitivo é provável que mais de uma empresa se proponha a fornecer o serviço de manutenção com

propostas diferentes em relação ao custo do contrato e o tempo de interrupção.

O problema de contratação de manutenção surge a partir do momento em que a contratante dispõe de diversas alternativas de contrato e necessita efetivar um processo de escolha entre as opções existentes. O decisor irá se deparar com várias alternativas de contrato com preços e tempo de interrupção distintos. O contrato a ser escolhido irá variar entre uma faixa de custo reduzido com tempo de atendimento elevado até um custo elevado com tempo de atendimento reduzido.

Desta forma o problema a ser enfrentado pelo gerente ou decisor passa a ser: Como proceder um processo de escolha que permita minimizar o custo e o tempo de interrupção? A resposta a esta questão envolve inicialmente uma análise mais profunda sobre as variáveis do problema, onde os aspectos de incerteza e risco devem ser observados. O tempo de interrupção não se comporta como um todo de forma determinística, mas sobretudo como uma variável aleatória. Decisores por sua vez apresentam comportamentos distintos em relação ao risco (5).

Nesta abordagem propõe-se novas formas de tratar as cláusulas técnicas dos contratos de manutenção, ao inserir o tempo de interrupção como o ponto de partida para a formulação de um contrato de manutenção. É importante observar que ao se colocar o tempo de interrupção como critério de escolha, estaremos diretamente forçando a empresa contratada a adequar seus processos, dentro do contexto da teoria de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. De uma certa forma os contratos seriam focados por um dos aspectos mais enfatizados no setor elétrico que é a garantia da disponibilidade de seus sistemas. Por outro lado, manter um sistema em níveis elevados de disponibilidade requer uma estrutura de manutenção adequada que pode ser limitada pelo alto custo envolvido. Os setores de manutenção das empresas normalmente procuram comparar os

prejuízos decorrente de uma falha com o custo da política de manutenção a ser adotada. Em relação a área de produção de bens, esta comparação parece ser adequada. Entretanto na área de produção de serviços, como o setor elétrico, os prejuízos decorrentes de uma falha para a própria empresa são pequenos quando comparados aos prejuízos acarretados a terceiros. Além deste fato deve ser levado em consideração as multas contratuais previstas pelo órgão legislador, que em casos extremos poderá redundar na perda da concessão do serviço.

Uma forma de se contornar este problema consiste em tratar o problema da terceirização de manutenção como um problema de decisão. A escolha do melhor contrato se daria através de um modelo de preferências do decisor, representada pela função utilidade dos atributos custo e tempo de interrupção e da modelagem probabilística da mantenedibilidade do sistema.

Dentro do contexto da teoria da decisão, os contratos de manutenção que serão submetidos ao decisor correspondem as ações ( $a_1, a_2, a_3, \dots$ ). O decisor deverá escolher entre as diversas ações aquela que apresenta, através dos atributos, custo  $C$  e tempo de interrupção  $TI$ , o maior retorno para a empresa.

A análise direta destes atributos não permite ao decisor estabelecer um processo de escolha que trate com segurança as incertezas existentes nos atributos dos contratos (custo e tempo de interrupção). Como forma de contornar esta limitação, torna-se necessário empregar a teoria da utilidade multiatributo, que permite inserir no modelo de decisão uma abordagem voltada para os aspectos de incerteza.

A introdução da teoria da utilidade na contratação de serviços trará ainda ao decisor o conhecimento da estrutura de risco dos atributos do contrato, e possibilitará o tratamento dos múltiplos objetivos e incertezas existentes.

Será obtido a partir da aplicação da teoria da utilidade, a função utilidade  $u(TI, C)$ , que estabelece uma nova escala para o

tratamento destes atributos, em que os aspectos relativos ao risco como, propensão, aversão ao risco e indiferença ao risco do decisor estarão agregados à esta função.

A incerteza das ações está relacionado com o estado da natureza  $\theta$ , que no problema em estudo está associada a mantabilidade da empresa contratante e com a confiabilidade do sistema. A mantabilidade, está relacionada com o MTTR (tempo médio para reparo), podendo ser representada pela função densidade de probabilidade exponencial, em que o parâmetro  $\mu$ , será elicitado a partir do conhecimento a priori do especialista. Desta forma será obtida a probabilidade a priori  $\pi(\mu)$ , onde  $\mu = 1/\text{MTTR}$  (1),(2),(3).

As conseqüências do problema de decisão relativas a situação em estudo estão relacionadas com a escolha de um das ações, e será expressa a partir da função utilidade  $u(TI,C)$ . A função utilidade do decisor é obtida através de um procedimento de elicitación que permite determinar a estrutura de preferência do decisor em relação aos atributos do problema.

A empresa contratante deseja obter da contratada uma prestação de serviço que garanta um tempo de interrupção  $TI$ , compatível com a disponibilidade determinada no projeto. A teoria da mantabilidade, estabelece que o tempo de interrupção  $TI$  é composto de duas parcelas : uma parcela denominada  $Ta$  – Tempo de atendimento, e outra parcela variável denominada de  $TTR$  (tempo efetivo para reparo).

O  $TTR$ , é basicamente um tempo definido durante a fase de projeto, sendo função dos aspectos de construção do equipamento como modularidade, acessibilidade, sistema de diagnóstico, natureza do equipamento (eletrônico ou mecânico), treinamento e capacidade das equipes de manutenção, curva de aprendizagem e outras variáveis. Este tempo segue uma distribuição de probabilidade exponencial com parâmetro  $\mu$ .

O tempo de atendimento  $T_a$ , também denominado de tempo de preparação ou tempo logístico, pode ser estratificado nos seguintes tempos :

- tempo gasto na escolha do técnico que irá executar o reparo
- tempo gasto para providenciar o instrumental necessário e numerário para as despesas.
- tempo de deslocamento entre a empresa prestadora de serviço e o local de instalação do equipamento a ser reparado.

A estrutura básica do problema de decisão para contratos de manutenção implica em conseqüências do problema que correspondem a valores específicos de TI e C para cada alternativa de contrato.

O critério de escolha será baseado na maximização das alternativas existentes, calculado a partir do valor esperado de cada uma das ações, através da integral do produto da função utilidade  $u(TI,C)$  pela função densidade de probabilidade dos atributos  $f(t)$ . O produto destas duas funções tem como resultado a utilidade esperada  $U(\theta, a)$ . Assim,

$$U(\theta, a_i) = \int u(TI_i, C_i) f(TI) dt_i \quad (1.1)$$

Uma solução mais elaborada do problema deve inserir no modelo de decisão aspectos relativos a incerteza do parâmetro  $\mu$ , representada pela probabilidade a priori  $\pi(\mu)$ . Desta forma podemos obter a partir da expressão abaixo, a maximização da utilidade esperada representada pela integral do produto da utilidade esperada  $U(\theta, a_i)$  pela probabilidade a priori  $\pi(\mu)$ . Assim, o modelo de decisão seria representado pela integral da expressão.

$$\text{Max a } \int U(\theta, a_i) \pi(\mu) d\mu \quad (1.2)$$

### 3 - Utilidade Multiatributo em Problemas de Decisão

As decisões fazem parte do cotidiano dos indivíduos de uma empresa, ou de uma sociedade que buscam através de diversos métodos resolver problemas que apresentam mais de uma alternativa. De uma forma resumida podemos descrever a estrutura de um processo de decisão como uma seqüência de etapas em que o decisor identifica as alternativas existentes, suas respectivas conseqüências e em seguida escolhe a alternativa que apresenta o maior retorno ou vantagem para si (4).

Entretanto, as decisões mais complexas podem envolver um número maior de alternativas que não permitem ao decisor a avaliação direta das conseqüências. Este tipo de decisão exige uma estruturação mais rígida, que permita a quantificação das conseqüências das alternativas (5,14).

A teoria da decisão é uma das alternativas no meio acadêmico que apresenta uma metodologia voltada para o auxílio ao decisor neste tipo de problema. A metodologia consiste em se maximizar o valor monetário esperado das alternativas ou minimizar as perdas monetárias das alternativas.

Porém no dia a dia das pessoas, esta teoria não justifica o processo pelo qual pessoas escolhem entre as alternativas existentes aquela que apresenta um valor esperado inferior as demais. Tomemos como exemplo o caso de um seguro de carro que apresenta um valor esperado bastante pequeno, mas que mesmo assim muitas pessoas renovam o seguro de seus carros ano a ano. Uma outra teoria que procura investigar e propor uma metodologia para o processo individual de escolha é denominada de teoria da utilidade. Nesta teoria, indivíduos fazem seu processo de escolha

baseado não apenas no valor esperado, proposto pela teoria da decisão, mas sobretudo no risco associado a cada alternativa.

Assim decisões distintas para um mesmo problema são tomadas por pessoas conforme a sua disposição em assumir riscos. Estas pessoas seriam então classificadas em três categorias quanto a disposição em assumir riscos : averso ao risco, propenso ao risco e neutro ao risco (5).

A teoria da utilidade multiatributo é bastante empregada para casos que envolvem incerteza, necessitando de probabilidade para representar a falta de precisão e incerteza que possa aparecer em um problema de decisão.

A idéia básica da teoria da utilidade em um problema de decisão consiste em associar a cada conseqüência uma medida de utilidade. A partir da utilidade das conseqüências e da probabilidade de ocorrência, é calculada a utilidade esperada de cada uma das alternativas, sendo escolhida aquela de maior utilidade esperada. Este valor de utilidade esta implicitamente associado a um valor de risco, que varia conforme a categoria do decisor

Um problema em que os atributos identificados sejam  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$  e sendo  $y_i$  um determinado nível do atributo  $Y_i$ , então, o objetivo do analista de decisão consiste em determinar a função utilidade  $u(y) = u(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$  dos  $n$  atributos.

De posse da função utilidade é possível aplicar o critério da utilidade esperada para a escolha da melhor alternativa.

A independência em utilidade é uma propriedade que permite simplificar a determinação da função utilidade multiatributo, e possibilita uma melhor estruturação do problema.

A aplicação da teoria anteriormente vista pressupõe um processo de entrevista entre o analista de decisão e o decisor como forma de permitir o levantamento das preferências do decisor em relação aos atributos do problema. O processo de entrevista deve

permitir que o decisor expresse suas preferências de forma mais real possível, de modo que a função utilidade obtida represente uma medida das atitudes do decisor em relação ao risco e situações de incerteza.

O decisor deve estar consciente dos objetivos do processo de entrevista e suficiente motivado para responder e colaborar com os propósitos do trabalho associado ao problema de decisão.

Em um problema de decisão quando procuramos estabelecer um processo de escolha entre mais de uma alternativa, normalmente estaremos em busca de maximizar um objetivo ou determinar uma medida de efetividade.

A escolha da alternativa que irá solucionar o problema, pressupõe inicialmente a determinação de um atributo que descreva as conseqüências dos atos do decisor.

A teoria da utilidade (5,14) permite avaliar estas conseqüências através de um processo de elicitação de preferências que busca incorporar ao problema o comportamento do decisor em relação ao risco. Este processo permite criar uma nova escala denominada de escala de utilidade que estabelece para cada conseqüência um valor de utilidade. O processo de escolha será então realizado a partir desta nova escala que agrega os aspectos de incerteza inerente ao problema de decisão.

Diversos tipos de atributos podem ser empregados com esta finalidade, e a escolha de um deles irá depender do tipo de problema. Podemos por exemplo empregar o atributo risco alfa de quebra de estoque para auxiliar o decisor na determinação do número de sobressalentes para um determinado equipamento (7).

Neste caso a teoria da utilidade irá permitir a modelagem do comportamento do decisor em relação às incertezas existentes nos atributos envolvidos no problema. Esta modelagem irá resultar na determinação da função utilidade do atributo em estudo.

A solução do problema de decisão não se resume a determinação da função utilidade, ainda que esta etapa permita uma boa estruturação do problema na mente do decisor. A seqüência da solução do problema envolve a maximização do valor esperado da função utilidade.

A função utilidade pode envolver um ou mais atributos, sendo denominada de Função Utilidade Unidimensional quando esta relacionada a apenas um atributo e Função Utilidade Multiatributo quando envolve mais de um atributo.

Normalmente costuma-se empregar uma metodologia que permite a determinação da função utilidade através de um processo composto de cinco etapas. Estas etapas proporcionam a intensificação de aspectos importante do problema, e permitem uma discussão mais profunda entre o analista e o decisor sobre as variáveis que compõem a estrutura do problema.

#### **4 – Modelos de Decisão para Contratos de Manutenção**

Vários problemas de contratação de manutenção podem ser analisados na abordagem desenvolvida. Assim, alguns problemas básicos são apresentados.

O tempo de atendimento  $T_a$  está relacionado ao tempo de interrupção no sistema.  $T_I$  também está relacionado ao tempo para reparo  $T_{TR}$ , que segue uma distribuição de probabilidade de acordo com a manutenibilidade do fornecedor do serviço. Ou seja:

$$T_I = T_a + T_{TR}.$$

No processo decisório um elemento fundamental é a modelagem de preferências, donde se obtém a função utilidade  $U(T_I, C)$ . A função  $U(T_I, C)$  agrega as utilidades unidimensionais para os dois atributos:  $U(T_I)$  e  $U(C)$ .

Através da associação probabilística entre a combinação de  $(\theta, a)$  e as variáveis conseqüências TI e C, considerando o modelo probabilístico exponencial para manutenibilidade, obtém-se a função utilidade  $U(\theta, a)$ . No caso,  $\theta$  representa os dois aspectos do estado da natureza:  $\lambda$  e  $u$ .

Vários problemas podem ser analisados na abordagem desenvolvida (9,10,11,12,13). Três tipos básicos de problemas foram encontrados, em função de praticidade ou exigências de implementação. Estes problemas foram classificados em função da forma como o estado da natureza relativo a manutenibilidade é tratado, considerando também o tempo de atendimento  $T_a$ , também chamado de tempo de atraso. A seguir a classificação e as características dos problemas analisados:

- Tempo de atraso  $T_a$  fixo; neste caso  $TI = T_a + TTR$ , sendo que  $T_a$  é considerado fixo.
- Tempo de atraso  $T_a$  aleatório; neste caso  $TI = T_a + TTR$ , sendo que  $T_a$  é considerado uma variável aleatória, seguindo o modelo exponencial com parâmetro  $w$ .
- Tempo de atraso implícito, neste caso  $T_a$  é considerado parte integrante de TTR, de modo que  $TI = TTR$ .

Cada um destes problemas pode ser analisado a partir de duas considerações para a função utilidade multiatributo relativa a  $(TI, C)$ : função aditiva e multilinear.

A seguir é apresentada a formulação para o modelo decisão com tempo de atraso fixo (10,12). Neste modelo de decisão considera-se a seguinte hipótese: para cada contrato de manutenção será admitido um tempo de atendimento ( $T_A$ ) fixo, e será estabelecido um custo ( $C_i$ ) para cada ação ( $a_i$ ) adotada.

$$U(\theta, a_i) = \frac{\mu K_{Ti} e^{-A_1 T A}}{(A_1 + \mu)} + K_{Ci} e^{-A_2 C_i}$$

## 5 - Conclusão

A importância de introduzir aspectos de engenharia de manutenção em estudos sobre manutenção de sistemas foi enfatizada, especificamente quando a disponibilidade de um sistema é influenciada pelos aspectos da confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos.

Discutimos o problema de terceirização de serviços na área de manutenção, mostrando importância de se empregar ferramentas que permitam a escolha assistida de contratos.

Mostramos que este problema deve enfatizar aspectos relacionados com a disponibilidade do sistema e ao custo do contrato. Foi acrescentada a discussão, os aspectos de incerteza que envolvem os atributos do problema e a conclusão final da necessidade de uma abordagem voltada para a teoria da utilidade multiatributo.

Ao colocarmos o tempo de interrupção em conjunto com o custo como critério de escolha de um contrato, estaremos diretamente forçando a contratada a adequar seus processos, dentro do contexto da engenharia de manutenção. De uma certa forma os contratos seriam focados por um dos aspectos mais desejados pela empresas que é a garantia da disponibilidade de seus sistemas. Por fim, deve-se salientar a importância do uso de métodos multicritério de apoio a decisão (14) na área de manutenção.

Como resultado dos estudos desenvolvidos na área de terceirização alguns softwares têm sido desenvolvidos para dar suporte a decisão em problemas de decisão ([www.ufpe.br.gpsid](http://www.ufpe.br.gpsid)) de modo que o gerente pode avaliar qual a melhor alternativa para as condições de seu sistema.

## Bibliografia

- (1) GOLDMAN, A S. & SLATTERY, T. B. *Maintenability: A major Element of System Effectiveness*. Robert E. Krieger Publishing Company, 1977.
- (2) O'CONNOR, P. D. T.; (1985) *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, pp.398p. ISBN: 0-471-90551-8.
- (3) Carter, A. D. S; (1986) *Mechanical Reliability*. MacMillan
- (4) BEKMAN, O R. & OLIVEIRA P. L. *Análise Estatística da Decisão*. Edgar Blucher, 1980.
- (4) KEENEY, R.L & RAIFFA. H . *Decision with Multiple Objectives : Preferences and Value Trade-offs*. John Wiley & Sons, 1976.
- (5) RAIFFA, H. *Decision Analysis*. Addison – Wesley, 1970.
- (7) ALMEIDA A. T. de & BOHORIS, G. A. *Decision Theory in Maintenance Decision Making*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1985.
- (8) Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C.de; (1993) *Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System*. IEEE Trans. Reliability. 42(3)pp.401-407.
- (9) ALMEIDA, A. T. de. *Multicriteria Decision Making on Maintenance: Spares and Contracts Planning*. European Journal of Operational Research, Holanda, v.129, n.2, p.235-241, 2001.
- (10) ALMEIDA, A. T. de (2000) *Decisão Multicritério na Engenharia de Manutenção – Modelos de Decisão e Aplicações* In: Almeida A. T. de & Souza, F.M.C., *Produtividade e competitividade: aplicações e inovações*. Editora Universitária, p255-299.
- (11) ALMEIDA, A T. de. *Repair Contract Decision Model Trough Additive Utility Function*. Journal Of Quality In Maintenance Engineering, Londres, v.7, n.1, p.42-48, 2001.

- (12) ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Combinando Teoria da Utilidade e Método ELECTRE na Seleção de Contratos de Manutenção. Organizado por MEDEIROS, Denise Dumke de, RAMOS, Francisco de Souza. *Gestão Industrial*. Recife, 2000, v.1, p.117-133.
- (13) BOHORIS, G. A., ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Decision Theory In Maintenance Decision Making. Organizado por Martin, H. *NEW DEVELOPMENTS IN MAINTENANCE - AN INTERNATIONAL VIEW*. AMSTERDAM, HOLANDA, 1995, v.1, p.265-275.
- (14) GOMES, Luiz Flávio Autran Monteiro, GOMES, Carlos Francisco Simões, ALMEIDA, Adiel Teixeira de. *TOMADA DE DECISÃO GERENCIAL: O Enfoque Multicritério* (no prelo). Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2002.



# TESTE DE CONFIABILIDADE DE EQUIPAMENTOS

*Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando Menezes Campello de Souza  
André Marques Cavalcanti*

## 1. Introdução

Este artigo apresenta um procedimento de teste desenvolvido dentro do contexto da terotecnologia, onde a Combinação de Métodos Estatísticos e técnicas de confiabilidade permitem a verificação de especificações empregadas no planejamento para reduzir custos no ciclo de vida econômica.

Assim, o planejamento/projeto de sistemas não pode visualizar apenas o custo de investimento, mas deve incluir o custo operacional no ciclo de vida. Desta forma, como parte deste planejamento tem sido efetuado o dimensionamento de sobressalentes e de equipes de manutenção, a estimativa de custos operacionais, etc. Para isto, informações sobre confiabilidade destes equipamentos (MTBF ou taxa de falhas), fazem parte das especificações dos fornecedores de equipamentos, sendo, em si atributos de qualificação.

Tem havido uma preocupação crescente quanto à credibilidade nestes dados, e a necessidade de prever, em contrato, um teste de aceitação de confiabilidade, demanda um estudo mais profundo sobre o assunto.

O procedimento consiste na aplicação de métodos estatísticos, mais especificamente Teste de Hipótese, para decidir se a verdadeira taxa de falhas do equipamento é menor ou se é maior do que a especificada. No primeiro caso os equipamentos são

aceitos. No segundo tem-se a indicação de rejeição, onde medidas compensatórias são adotadas junto ao fornecedor.

Neste teste são assumidos dois riscos, sobre os quais se procura uma solução de compromisso. O primeiro refere-se ao risco de se rejeitar os equipamentos estando eles em boas condições, é denominado erro do tipo I. O segundo risco refere-se a possibilidade de se aceitar os equipamentos no caso em que estão fora das especificações, refere-se ao erro do tipo II. O procedimento estabelece uma regra de decisão de modo a otimizar os riscos envolvidos.

## **2. Especificação da Confiabilidade**

O projeto de sistemas, dentro do contexto mencionado anteriormente, incluindo o ciclo operacional, considera dentre outras características a disponibilidade, a qual está relacionada ao estado de funcionamento do sistema em dado instante, sendo definida como a probabilidade de que o mesmo esteja disponível (operando em condições de atender ao usuário) em dado instante de tempo [1].

Esta característica é composta basicamente de dois atributos: Confiabilidade e Manutenibilidade, para os quais podem ser desenvolvidos trade-offs na obtenção de um valor de disponibilidade [2]. Assim, para que este valor seja atendido, deverão ser estabelecidos requisitos de manutenibilidade pela estrutura de manutenção, e de confiabilidade pelos equipamentos. A preocupação neste trabalho é com a Confiabilidade.

A confiabilidade é definida como a probabilidade de que não haverá falhas no período de tempo  $t$ , e muito freqüentemente é especificada pelo parâmetro MTBF (Mean Time Between Failures), que corresponde ao inverso da taxa de falhas ( $\lambda$ ), quando o modelo é exponencial [1].

### 3. Condições de Teste

O caso numérico a ser explanado corresponde a um conjunto de equipamentos, para o qual após todos os testes de funcionamento e verificação de características elétricas, o sistema entra numa fase de operação experimental (FOE), período no qual se desenvolve o teste de confiabilidade.

Assim, no caso específico colocado para ilustração pretende-se observar o número de falhas ( $x$ ) na população de 36 equipamentos, durante um período de FOE de 3 meses, sob uma ótica probabilística.

Este número de falhas  $x$  tem um comportamento assumido como Processo de Poisson, o qual, atende às seguintes hipóteses:

- número de eventos ocorridos em diferentes intervalos de tempo são independentes.
- A probabilidade de ocorrer um evento em um pequeno intervalo é aproximadamente proporcional a este intervalo.
- A probabilidade de ocorrer mais de um evento num intervalo pequeno é desprezível, comparada com a probabilidade de ocorrer um evento.

A partir das hipóteses acima, mostra-se (1) que a probabilidade  $P(t, x | \lambda)$  de ocorrer  $x$  eventos no tempo  $t$ , quando a taxa de ocorrência dos eventos é  $\lambda$ , é igual a:

$$P(x(t) = x | \lambda) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}$$

Quanto ao valor especificado pelo fabricante dos equipamentos, temos o seguinte:

- É especificado o MTBF=170.000 horas,
- Para a população de  $N=36$  equipamentos, no período de observação  $T=2160$  horas, temos a taxa de falha  $\lambda_0 = \lambda \cdot N \cdot T = 0,457$ .

A questão é: que número de panes pode ocorrer na população de 36 equipamentos, durante o período de observação, de modo que a taxa de falhas real  $\lambda$  esteja compatível com a especificada  $\lambda_0$  (ou aceitável diante da especificação)?

Um problema amplamente discutido com o fabricante foi a consideração de que os equipamentos recebidos já haviam passado por um controle de qualidade (em fábrica) eficiente, com testes de Burn-in e Debugging, de modo a quase eliminar o problema de “mortalidade infantil”. Assim, a hipótese de taxa de falhas constante permitiu tratar o número de falhas  $x$  como um processo de Poisson. No caso de tipo de falhas “prematura”, devido à mortalidade infantil (causada por erros no projeto ou no processo de fabricação), ser considerada como significativamente presente no período de observação, então, devemos acrescenta-la ao modelo, com a correspondente distribuição e parâmetros a serem fornecidos pelo fabricante. Em nosso caso específico, foi encontrado um caminho mais fácil: uso do modelo de Poisson e análise de cada falha ocorrida para detectar as causas; sendo considerada “aleatória pura” ou “casual”, então é computada para efeito de avaliação; sendo considerada como oriunda de problemas de projeto ou de processo de fabricação (mortalidade infantil), então não é computada para efeito da avaliação, sendo outro problema a ser resolvido pelo fornecedor.

## 4. Metodologia

A análise deste problema foi desenvolvida basicamente através de Teste de Hipótese em Estatística Clássica. .

Esta abordagem foi empregada nas tratativas entre a Empresa e o fabricante dos equipamentos, que aceitou o procedimento de teste estabelecido para avaliação de confiabilidade dos equipamentos, devido a maior difusão e utilização do método de Teste de Hipótese, inclusive para formulação de problemas clássicos de Controle Estatístico de Qualidade.

### 4.1 - Teste de Hipótese

Este é o procedimento da Estatística Clássica, onde é testada se a hipótese de que a taxa de falhas real está dentro do especificado é verdadeira ou falsa.

Se a hipótese for rejeitada sendo verdadeira, incorre-se no Erro do Tipo I, para o qual é considerado o risco ALFA, risco do fornecedor. O Erro de Tipo II corresponde a aceitação da hipótese, sendo falsa; o risco desta possibilidade é denotado por BETA, e trata-se do risco do cliente (pois implica na possibilidade de aceitar os equipamentos com o MTBF abaixo do especificado).

O estado na Natureza aqui, é a condição da taxa de falhas dos equipamentos, onde identificamos um conjunto discreto  $\theta = (\theta_0, \theta_1)$ ;  $\theta = \theta_0$  quando  $\lambda < \lambda_0$ , e  $\theta = \theta_1$ , quando  $\lambda > \lambda_0$ . Admitimos que não há conhecimento inicial sobre o estado da natureza  $\lambda$ , e aplicamos o enfoque NEYMAN-PEARSON.

O problema neste enfoque consiste em escolher a melhor regra de decisão  $b$  que minimize o risco  $R_b$  para um dado  $\theta$ , sujeito a restrição de que o Risco  $R_b$  para o outro  $\theta$  seja menor ou igual a um nível pré-estabelecido ALFA. Temos:

$$\text{Min } R_b(\theta_1)$$

$$\text{Sujeito a } R_b(\theta_0) \leq \text{Alfa}$$

Esta formulação corresponde a testar a hipótese nula ( $H_0$ ) de que os equipamentos tenham taxa de falhas menor ou igual a especificada, contra a hipótese alternativa  $H_1$ :  $H_0: \lambda \leq \lambda_0$

$$H_1: \lambda > \lambda_0$$

Vemos que  $H_0$  e  $H_1$  são hipóteses compostas, cuja solução pode ser desenvolvida através de um problema de hipótese simples, mantendo a relação de desigualdade na hipótese  $H_0$ , e na alternativa  $H_1$ . A solução deste problema atende à hipótese composta (3\_); assim temos a hipótese simples:

$$H'_0: \lambda = \lambda_0 = 0,457$$

$$H'_1: \lambda = \lambda_1 = 1 > \lambda_0$$

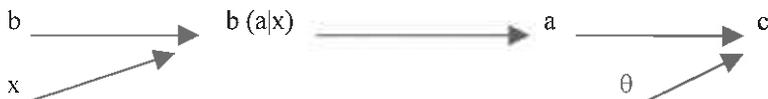
Devemos então, considerar o risco ALFA =  $R_b(\theta_0)$  de se rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira e o risco BETA =  $R_b(\theta_1)$  de se aceitar sendo ela falsa.

Voltando a Regra de Decisão, devemos verificar que o espaço de ações é discreto com dois elementos: Ao aceitar  $H_0$ , e A1: rejeitar  $H_0$ . A regra de decisão é randomizada e requererá o uso de um dispositivo aleatório para a escolha de ação. A referência [5] apresenta vários meios de se construir estes dispositivos.

As regras de decisão randomizadas, empregadas no enfoque Neyman-Pearson, são regras de comportamento:  $b(a|x)$ ; ou seja, a probabilidade de se adotar a ação  $a$ , dado que foi observado  $x$ .

O emprego da regra de comportamento implica no processo ilustrado a seguir onde escolhe-se a regra  $b$ , depois observa-se o dado  $x$  e randomizando com a probabilidade  $b(a|x)$ , encontra-se a

ação  $a$ , e, sendo  $\theta$  o verdadeiro estado da natureza, tem-se a consequência:



No item 5 é apresentada a solução deste problema.

#### 4.2 - Aplicação do Procedimento

Este procedimento foi aplicado no teste de equipamentos em dois casos, com fornecedores distintos. Posteriormente foi introduzido na Especificação Técnica para aquisição de sistema de comunicação via cabo óptico [6].

Na primeira aplicação o procedimento foi aceito pelo fornecedor, havendo, entretanto, dificuldades para estabelecer as penalidades no caso de rejeição. Isto ocorreu em função de não haver cláusula contratual estabelecendo o procedimento, sendo o mesmo desenvolvido posteriormente na ocasião da instalação dos equipamentos.

A segunda aplicação se desenvolveu na mesma situação anterior, sem respaldo contratual quanto ao procedimento, ou seja, sem que houvesse um procedimento explicitado. Neste caso houve um maior desenvolvimento, sendo estabelecidas as seguintes penalidades para o caso de rejeição: prorrogação por mais um ano no período de garantia e redimensionamento no lote de sobressalentes sem ônus para a empresa.

### 4.3 - Comentários Gerais Sobre a Aplicação da Metodologia

Este procedimento resolve o problema, minimizando o risco BETA a partir de um nível para o risco ALFA, aplicando a regra b (a|x).

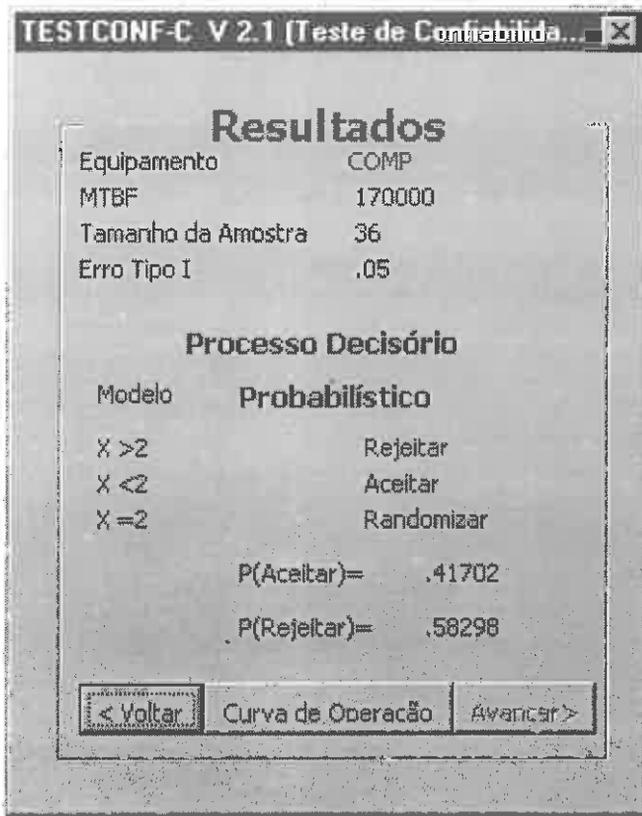
Uma questão que surge é como determinar o nível ALFA: o cliente prefere aumentar para minimizar o risco BETA e o fornecedor pretende reduzi-lo, pois se trata de seu risco. Há casos onde o decisor tem dificuldade para escolher o nível ALFA, e tem-se adotado a convenção de quase sempre escolher o valor de 0,05 para este erro (4).

Quanto ao uso de regras randomizadas no caso da solução no item 5 (alínea a), para ALFA=0,05, temos a regra randomizada b (a|2)=0,548. Isto significa que ocorrendo duas falhas, devemos utilizar um dispositivo aleatório (mecânico ou eletrônico) que apresente dois estados possíveis na saída (ao, al), sendo al com probabilidade 0,5484, e ao com probabilidade 0,416. Há situações em que as pessoas têm dificuldades em entender o uso destas regras de decisão, e preferem ajustar o nível ALFA de modo a aplicar uma regra determinística. Poderia se aceitar (ao) se  $x \leq 2$ , e rejeitar (al) se  $x > 2$ ; neste caso ALFA seria menor que 0,05 e BETA aumentaria um pouco.

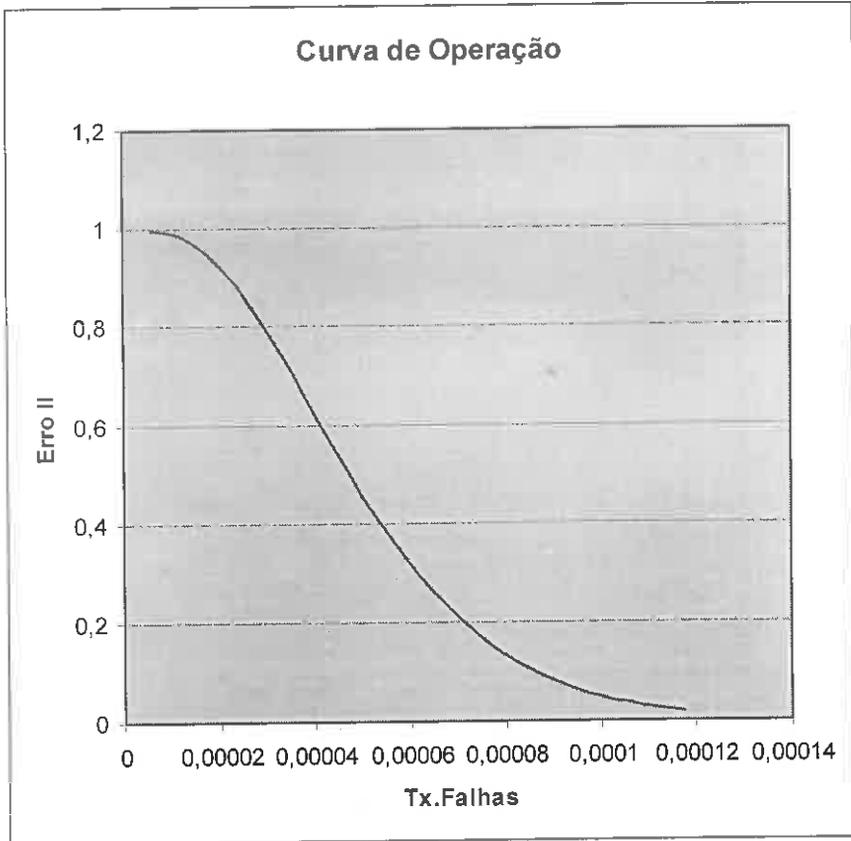
## 5. Ferramenta de Apoio a Decisão

Foi elaborado um Sistema de apoio a Decisão para o desenvolvimento do teste de confiabilidade [12] estes (demo disponível Internet: [www.ufpe.br.gpsid](http://www.ufpe.br.gpsid)).

O resultado é apresentado conforme figura a seguir:



O erro do tipo II, ou risco BETA é apresentado pelo Sistema, conforme ilustrado na figura a seguir:



Assim, pode-se ver que o sistema apresenta a regra de decisão, ou seja, o número admissível de falhas, minimizando o risco  $R_b(\theta_1)$ , sujeito à restrição do risco  $R_b(\theta_0)=ALFA$ .

Assim, apresentamos a aplicação do teste para o valor de  $ALFA = 0,05$ :

O programa apresenta a saída correspondente à ilustração, onde se obtém o resultado:

Se  $x > 2$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x < 2$ , aceita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x = 2$ , randomiza-se para encontrar a solução com:

Pr (rejeitar) = 0,548

Pr (aceitar) = 0,416

A afirmação “aceitar” ou “rejeitar”  $H_0$ , é apresentada aqui no sentido de Teoria da Decisão (Espaço de Ações ao e al) e não no sentido de Estatística Clássica.

## **6. Conclusões**

O desenvolvimento deste teste de confiabilidade estabelece um elo importante na interação entre o projeto e a manutenção. Pois os valores especificados para a confiabilidade e empregados no projeto, quando devidamente ratificados, asseguram um desempenho satisfatório no ciclo operacional do sistema.

A aceitação deste procedimento junto aos fornecedores de equipamentos tem sido boa no que se refere à metodologia. Entretanto, a aplicação de penalidades, nos casos em que a confiabilidade está fora da especificação, ocasiona reações por parte dos fornecedores devido à ausência de um instrumento normativo que regulamente o assunto.

Como resultado dos estudos desenvolvidos alguns softwares têm sido desenvolvidos para dar suporte a decisão em problemas de decisão [11,12]. Dentre estes (demo disponível Internet: [www.ufpe.br.gpsid](http://www.ufpe.br.gpsid)) podem ser citados:

- TESTCONF-v2.1 - Teste de Confiabilidade para aceitação de equipamentos.
- QUESTPRI-v2.1 Questionário de Conhecimento a Priori sobre Confiabilidade e Manutenibilidade.

## Bibliografia

- [1] BARLOW, R. E. & Proschan, F. Atatistical Theory of Reliability and Life Testing. New York, Halt Rinehart and Winston, Inc, 1975.
- [2] GOLDMAN, A. S. & Slatery, T. B. Maintainability: A Major Element of System Effectiveness. New York, Krieger Publishing Company, 1977.
- [3] Almeida, A. T., [1986] - *Avaliação de Desempenho de Sistemas*, Publicações Técnicas CHESF
- [4] HOEL, P. G. Estatística Matemática. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 1980 (tradução).
- [5] LINDGREN, B. W. Elements of Decision Theory. New York, The Macmillan Company, 1971.
- [6] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] – *Pesquisa Operacional Aplicada na Avaliação de Desempenho*. VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica; Mai/1986; São Paulo-SP: SP/GTL/02
- [7] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] – *Bayes-Like Decisions in Reliability Engineering*. *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*; June 30-July 4, 1986; Paris-France. Paris 87-90
- [8] Carter, A. D. S., [1986] - *Mechanical Reliability* , MacMillan.
- [9] Kapur, K. C., [1977] - *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc.
- [10] O'Connor, P. D. T., [1985] - *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd.

- [11] ALMEIDA, A. T. de, CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio, FERREIRA, Heldemárcio Leite. QUESTPRI-v2.1 Questionário de Conhecimento a Priori sobre Confiabilidade e Manutenibilidade. 2001.
- [12] ALMEIDA, Adiel Teixeira de, CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio, CAVALCANTI, André Marques. TESTCONF-v2.1 - Teste de Confiabilidade para aceitação de equipamentos. 2001.



# MODELOS DE MANUTENÇÃO ÊNFASE NA CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE

*Cícero Mariano Pires dos Santos*

## 1.0 - Introdução

As despesas anuais com manutenção na maioria das empresas brasileiras estão em torno de 3,5% em relação ao seu patrimônio. A análise destes custos, porém, não pode se restringir aos gastos decorridos com a manutenção. Deve-se considerar, além disso, as conseqüências sobre a produção, o repasse dessas despesas para o preço do produto e as contingências de mercado. Essa correlação, no atual contexto econômico, evidencia a necessidade de adoção de metodologias que aproveitem as vantagens resultantes das modernas técnicas de gestão de manutenção, consubstanciando a manutenção como uma vantagem competitiva.

O modelo de gestão comumente adotado está baseado na coordenação de atividades sustentadas nas ações de manutenções corretivas, preventivas e preditivas. O que está colocado no presente momento é como se fará a adoção das novas práticas de gestão baseada na confiabilidade (RCM - Reliability Centered Maintenance = Manutenção Centrada na Confiabilidade) e baseada na produção (TPM – Total Productive Maintenance = Manutenção Produtiva Total). A partir desse contexto, apresentam-se aqui, dados, argumentos e orientações sobre a implementação dos métodos de gestão, fundamentado em uma discussão teórica, com recomendações quanto à adoção dessas práticas por parte das empresas do setor produtivo de transformação de insumos e

tendo-se como foco principal o produto final. Citações serão feitas ao longo do capítulo com destaque para componentes do setor elétrico de potência brasileiro e tomando como referência o atual cenário industrial.

## **2.0 – A Visão de Planejamento**

O planejamento inicial de uma instalação de produção considera normalmente a atratividade econômica da mesma, que é geralmente avaliada em cima de uma expectativa de vida pré-determinada dos itens que irão processar os insumos para gerar o produto final. Esta expectativa em geral não está relacionada com a expectativa física da instalação, que pode diferir de caso para caso e algumas vezes de item para item em uma mesma instalação.

O ciclo de vida de qualquer projeto ou instalação é determinado pelo ciclo de vida de seus componentes e sistemas, bem como pelas necessidades do sistema consumidor (a solicitação). Por outro lado, a vida útil dos componentes depende de ações que envolvem as fases de projeto, operação e manutenção. Quando a instalação é efetivamente entregue para entrar na fase de produção, as ações associadas às atividades de operação e manutenção deverão estabelecer os caminhos para a exploração mais adequada dos recursos disponíveis, internalizados no projeto da instalação, e promover o retorno desejado para a empresa.

Verifica-se que, em conformidade com as circunstâncias determinadas por um ambiente cada vez mais competitivo, o gerenciamento da organização como um todo, envolvendo as diversas segmentações existentes, irá determinar de forma mais efetiva o valor agregado ao produto final, para tanto deve-se considerar, entre outros, fatores estratégicos como:

- Mercado competitivo;
- Aspectos ambientais;

- Retorno do investimento;
- Produtividade;
- Qualidade;
- Segurança.

## **2.1 – Políticas de Manutenção**

Em conformidade com a literatura existente sobre o assunto seria possível relacionar um conjunto bastante significativo de tipos de manutenção, baseado nos mais diferentes propósitos. Contudo, há atualmente duas políticas de manutenção que agregam o novo paradigma, focalizado no aproveitamento de oportunidades e dentro de uma visão que o cliente é o centro; portanto, **uma visão holística**. Ambas políticas são bastante aceitas mundialmente, abrangendo os comportamentos e tendências modernas, quais sejam: Manutenção Produtiva Total – MPT (Total Productive Maintenance – TPM) [5] e Manutenção Centrada na Confiabilidade – MCC (Reliability-Centered Maintenance – RCM) [4] e [8], ou também é denominada de: Manutenção Baseada na Confiabilidade – MBC. No presente texto serão adotadas apenas as primeiras denominações, ou sejam, MPT e MCC, quando se referindo ao idioma Português.

Uma terceira política agregando fundamentalmente o velho paradigma, focalizado em resolver problemas e dentro de uma visão em que a produção é o centro, é aqui denominada “Manutenção Centrada no Reparo” – MCR. É conveniente salientar que o novo paradigma não exclui o velho, mas o incorpora e estabelece uma visão mais abrangente.

A Gerência do Sistema de Manutenção – GSM fundamentada nos princípios da MPT, ou seja, Manutenção Produtiva Total, incorpora o sentido principal explicitado nos

relacionamentos e ações requeridos para o atendimento aos fatores acima destacados.

Destacam-se, a seguir, princípios básicos da MPT [5] e [3] para se atingir o resultado desejado, em conformidade com os parâmetros convenientemente escolhidos dentro de todo processo produtivo:

- promover ações na busca da maximização do rendimento operacional global dos equipamentos;
- buscar o enfoque sistêmico e integrado, onde se considera o ciclo de vida do próprio equipamento, através de um programa de prevenção de manutenção (incorporar no projeto a não-necessidade de manutenção), manutenção com introdução de melhorias e manutenção preventiva, o que proporciona, em síntese, um incremento na produtividade operacional;
- promover o envolvimento e a participação de todos;
- melhorar a estrutura orgânica da empresa, através da melhoria das pessoas e dos equipamentos;
- eliminar as perdas (devido à quebra, parada temporária, retrabalho...).

Por outro lado, em conformidade com [8], a MCC pode ser descrita pela consideração dos seguintes princípios:

- preservar a função do sistema;
- identificar os modos de falha que trazem prejuízo para as funções do sistema;
- priorizar as funções necessárias através dos modos de falha;

- enfatizar apenas a aplicação das atividades de manutenção preventiva que efetivamente reduzam a possibilidade de falha ou perda da função.

Relativamente à MCR, aqui conceituada como incorporando o velho paradigma, têm-se os seguintes princípios para serem destacados:

- reduzir ao mínimo possível os tempos de reparos dos equipamentos;
- reduzir os custos;
- consertar quando der problemas
- elevar a disponibilidade.

### **3.0 - Fase de Produção e Controle da Vida Útil**

Considere-se inicialmente uma gerência que enfatiza os quatro últimos fatores estratégicos anteriormente citados.

Na fase de produção tem-se a considerar as atividades atreladas às funções operação e manutenção, que poderão ser acompanhadas através da disponibilidade (D) do item sob foco.

A disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de suas confiabilidade, manutenibilidade e suporte à manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (item 2.2.5 da NBR 5462/1994).

Sabendo-se que:

$$D = \frac{\text{período de tempo disponível}}{\text{período de tempo sob observação}}$$

Lembre-se que o período de tempo sob observação é uma amostra convenientemente selecionada do universo de dados disponíveis, sendo, portanto, aleatória as demais grandezas envolvidas na equação acima.

Conforme destacado na Figura 1 a disponibilidade é um resultado das correlações entre confiabilidade e manutenibilidade. A Figura 1 aplica-se a todo sistema reparável, onde as diversas ações de manutenção têm aplicação na administração da vida do item ao longo do tempo “t”.

Sabendo-se que:

Confiabilidade – C: “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (item 2.2.6 da NBR 5462/1994).

Matematicamente a confiabilidade pode ser representada, simplesmente, como:

$$C(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$$

Sendo  $C(t)$  a confiabilidade e  $f(t)$  a função da densidade de probabilidade de falha e  $(t)$  a variável aleatória.

A confiabilidade expressa de certa forma, no projeto, uma incerteza da engenharia.

Sabendo-se ainda que:

$$C = \frac{\text{tempo de operação sem falhas}}{\text{período total de tempo de observação}}$$

Mantenabilidade - M: “Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos” (item 2.2.7 da NBR 5462/994).

A manutenibilidade é uma característica do projeto, a qual pode ser expressa em termos de frequência de manutenção, tempos de manutenção e horas de trabalho para realizar uma determinada manutenção, e também como custo de manutenção.

Observe-se que o diagrama da Figura 1 ressalta a importância da interação entre as fases de produção (operação e manutenção) com a de projeto, onde se darão as melhorias, baseadas nas ocorrências verificadas ou simplesmente no gerenciamento da vida útil. Melhorias estas que se darão através de componentes redundantes, sistemas de monitoração / supervisão etc. Isto sugere uma adequada proximidade entre fabricantes e compradores (usuário dos equipamentos / sistemas).

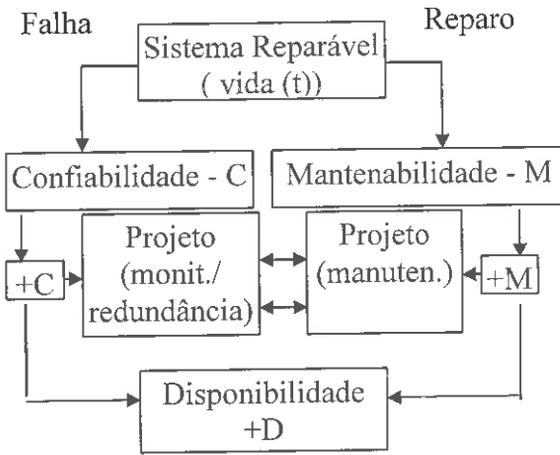


Figura 1 - Diagrama de correlações entre confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade [7].

Na Figura 1 falha representa o término da capacidade de um item desempenhar a função para a qual foi projetado, e o reparo representa parte da manutenção corretiva na qual são efetuadas ações de manutenção efetiva sobre o item, excluindo-se os eventuais atrasos técnicos.

Fica evidente que nas ações a serem desenvolvidas os ambientes: interno e externo à empresa, têm influência destacada na busca para se atingir a meta desejada, e considerando-se, ainda mais, todos os fatores estratégicos inicialmente citados.

Uma medição quantitativa da C e M pode ser obtida de forma simplificada conforme abaixo, onde:

= Manutenibilidade (M):

$$MTTR = TTR / N$$

▣ Confiabilidade (C):

$$MTBF = TBF / N$$

sendo:

- ▣ MTTR = Tempo Médio para Reparo;
- TTR = Tempo Total de Recuperação;
- MTBF = Tempo Médio Entre Falhas;
- TBF = Tempo Entre Falhas;
- N = Total de Ocorrências Consideradas.

Apesar de na pratica boa parte das empresas adotarem uma conceituação que pode apresentar pequenas diferenças entre si as ações de manutenção podem e devem ser estabelecidas em três grupos conforme a seguinte conceituação [1]:

#### Manutenção Preventiva

Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou da degradação do funcionamento de um item.

#### Manutenção Preditiva

Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

#### Manutenção Corretiva

Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

Estudos e pesquisas realizadas tem evidenciado que em geral uma empresa de padrão mundial deve apresentar o índice de

Produtividade Total dos Equipamentos - PTE [6] acima dos 85%, que é função da disponibilidade, qualidade e desempenho (rendimento) do equipamento/instalação. Lembre-se que o ser humano pode ser devidamente considerado no processo de apuração desse cálculo. No caso, por exemplo, de uma instalação de geração hidroelétrica, o índice PTE deve situar-se, nos padrões tecnológicos atuais, acima de 90%. Observe que, a qualidade representa o quociente da produção efetiva especificada pela produção total.

Sabendo-se que:

$$PTE = D \eta v$$

sendo:

- disponibilidade: D;
- qualidade: v;
- desempenho (rendimento):  $\eta$ .

Sabe-se que a eficiência de equipamentos e instalações projetados dentro de tecnologias já ultrapassadas, aliadas ao seu envelhecimento e desgaste, comprometem as suas confiabilidade e disponibilidade, além de coloca-los em condições de custo operacionalmente desvantajosas, determinando que tais elementos passem a ser considerados quando das análises das atratividades dos novos investimentos.

As melhorias sugeridas através das correlações estabelecidas no diagrama da Figura 1 não se darão apenas como resultados de medições desenvolvidas na manutenção, outros fatores deverão estar presentes, tais como: treinamento dos atores, envolvimento das equipes com os objetivos da empresa, etc. Devem haver, portanto, ações e condições que possibilitem a

necessária harmonia entre: produto, processo e atores, nos ambientes envolventes, daí a importância das políticas MPT e MCC.

É possível também medir a disponibilidade através da seguinte equação, que pode ser visualizada no diagrama da Figura 1:

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

A expressão acima é bastante adotada nos diversos segmentos de engenharia elétrica de potência onde o tempo médio para falhar (MTTF) é praticamente o mesmo que o tempo médio de entre falhas (MTBF), e em outros ramos onde tal observação se verifique.

#### **4.0 - Modelo de Gerenciamento Centrado na Disponibilidade GCD**

Dentre as alternativas gerenciais disponíveis, para o adequado controle e acompanhamento das ações de manutenção em uma instalação de produção, pode-se destacar as seguintes:

- Manter
- Modernizar
- Redesenhar
- Desativar

Considerando-se os seguintes conteúdos:

Manter, estabelece uma estratégia que consiste em manter a Instalação/unidade em operação nas condições previstas no projeto original, através de inspeções, reparos ou substituições de

componentes, que garantam as características originalmente previstas.

Modernizar, estabelece uma estratégia em que componentes /itens antigos possam se tornar mais produtivos e eficientes, através de ações de recondiçãoamento, atualizações tecnológicas e, onde aplicável, elevação da capacidade nominal de componentes com idade avançada assim como a garantia da extensão de vida útil.

Redesenvolver, estabelece uma estratégia que envolve a implantação de um novo projeto, associado às facilidades de expandir ou substituir um projeto antigo.

Desativar, estabelece uma estratégia que envolve as possibilidades de retirada do projeto de serviço, objetivando ações que previnam futuros e elevados custos de manutenção.

Apresenta-se na Figura 2 um modelo desenvolvido objetivando um gerenciamento centrado na disponibilidade da instalação. O diagrama apresentado tem embutido no seu conteúdo a participação de atores diversos da organização, que atuam com visões complementares. Dessa forma, o diagrama traçado apresentará resultados que serão, entre outros fatores, função, também, do ambiente que existe dentro da organização.

Cabe aqui ressaltar que as alternativas gerenciais explicitadas na Figura 2 serão diretamente afetadas pelas estratégias e políticas presentes na organização, e devidamente escolhida entre as acima citadas ou como combinação das mesmas, quais sejam: MPT, MCC e MCR, baseadas respectivamente na produtividade total, na confiabilidade e no reparo.

O diagrama da GCD apresentado na Figura 2 procura ressaltar que a estratégia gerencial é mantida desde que a disponibilidade obtida " $D_0$ ", na medição de desempenho, apresente

um resultado melhor (maior) ou igual à disponibilidade desejada "D<sub>d</sub>". Caso isto não ocorra, deve-se, então, buscar uma alternativa gerencial dentro do elenco apresentado, no quadro denominado ALTERNATIVAS. Observe que a alternativa Manter considera, inclusive, a possibilidade de ser mantida a política que vinha sendo adotada, com alguns ajustes.

A organização de um Sistema de Engenharia – SE [2] numa organização de produção deve estar estruturada e habilitada no sentido de planejar adequadamente as ações que se fazem necessárias para atingir as metas estratégicas, previamente definidas. Evidentemente que a situação específica da empresa e o ambiente em que está inserida devem estar razoavelmente compreendidos pelos atores internos à organização. Isto, no sentido de que se torne mais eficaz e eficiente a tarefa de encontrar a solução de manutenção mais apropriada, ou de elevação de produtividade para a organização. Dessa forma, cabe à empresa determinar que parâmetros são no momento os mais relevantes na busca da trajetória mais adequada para atingir suas metas, com o foco principal centrado na unidade/installação. Alguns parâmetros podem ser destacados, considerando os fatores acima relacionados, entre os quais estão:

- qualidade na demanda;
- continuidade no atendimento ao cliente;
- integração organizacional;
- produtividade;
- aspectos ambientais;
- retorno do investimento.

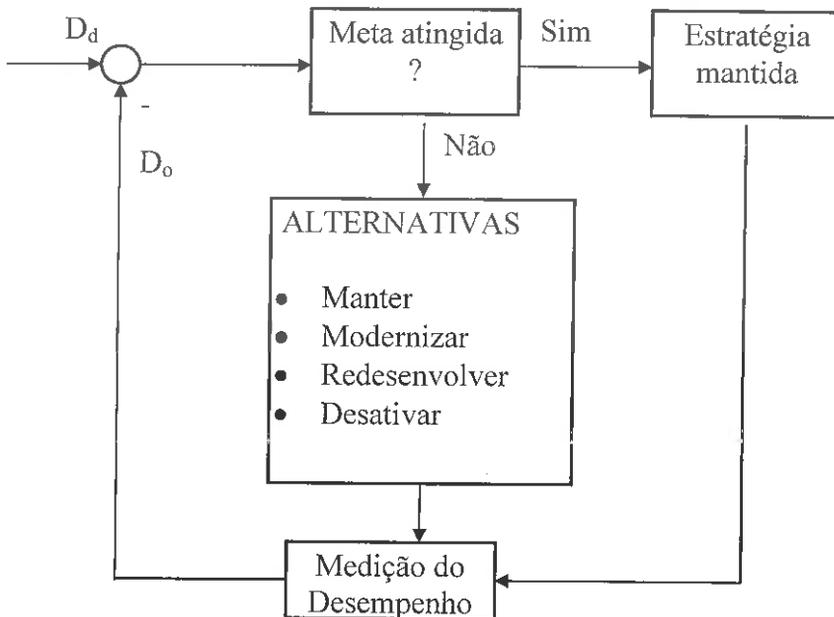


Figura 2- Diagrama da Gerência Centrada na Disponibilidade – GCD, onde  $D_o$  é a Disponibilidade obtida e  $D_d$  é a Disponibilidade desejada.

#### 4.1 – Os Fatores de Contorno

Objetivando ressaltar as pressões exercidas por fatores, aqui denominados como de contorno, durante o gerenciamento do ciclo de vida da unidade/installação, apresenta-se na Figura 3 um ajuste no diagrama de gerenciamento apresentado na Figura 2, no sentido de explicitar a presença destes fatores, que carregam consigo a importância dos ambientes interno e externo à empresa. Tendo sido mantida as alternativas gerenciais já destacadas anteriormente, que terão seus conteúdos/estratégias avaliados em função de uma possível perda de desempenho da unidade/installação geradora, relativamente a um padrão referencial de disponibilidade.

No caso de uma instalação elétrica de potência, deve-se considerar os seguintes conteúdos para os fatores de contorno [7]:

a – Histórico do Equipamento/Sistema:

- flexibilidade operacional;
- rendimento;
- ruído/vibração;
- temperatura;
- estado do isolamento;
- períodos de tempo (MTTR, MTBF).

b – Fatores Econômicos:

- situação econômica da empresa;
- custos de operação e manutenção;
- atendimento ao crescimento do mercado/sistema.

c – Condicionantes do Sistema Consumidor:

- elevado índice de disponibilidade (ou elevado índice de PTE);
- elevada qualidade no fornecimento da energia;
- respeito ao meio ambiente.

d – Estado da Arte:

- ganhos em rendimento;
- redução das faixas proibitivas de operação;
- ganhos em flexibilidade operacional;

- sistemas especialistas/supervisão (ou seja o tratamento e suprimento da informação);
- projeto e materiais com características e recursos mais avançados.

A inter-relação dos fatores de contorno, que representam a influência dos ambientes externo e interno na Gerência da vida útil da unidade de produção, pode ser esquematizada conforme a Figura 3.

Observe-se que no diagrama da Figura 3 pode-se trabalhar, alternativamente, com outro parâmetro de performance, diferente da disponibilidade, como, por exemplo, produtividade (PTE). Para tanto se pode eventualmente fazer uso de ferramentas que possibilitem a quantificação das subjetividades presentes no ambiente envolvente, podendo-se, por exemplo, citar a construção dos mapas cognitivos, que devem explicitar com clareza o conhecimento presente no ambiente.

Dentro de uma gerência que busca a otimização de resultados deve-se procurar contemplar adequadamente todos os fatores e aspectos aqui apresentados, com ênfase para a disponibilidade ou índice de produtividade total, tendo como meta neste último caso o valor superior a 85%, o que colocará a empresa dentro de elevados padrões mundiais, em termos de lucro da empresa, ciclo de vida de equipamentos / processos e competitividade, objetivando alcançar os valores máximos possíveis de desempenho, para a organização como um todo. Neste sentido é vital o envolvimento pró-ativo de todos os indivíduos da organização, nas suas diversas dimensões. Isto deverá ser facilitado através de uma estruturação organizacional onde se verifique a adequada capacitação dos atores, a informação seja de fácil acesso e circule de forma clara e objetiva.

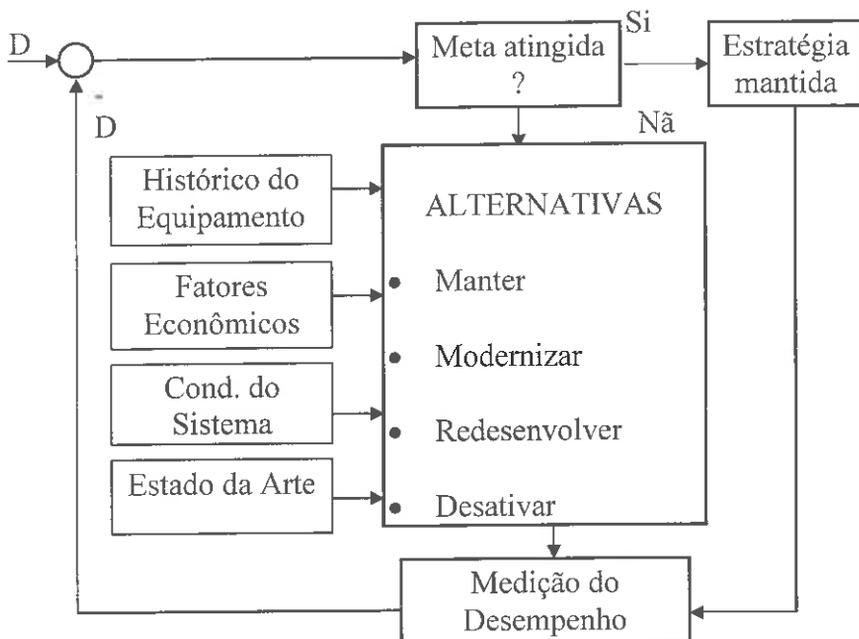


Figura 3- Presença dos fatores de contorno e operativo na gerência da vida útil da unidade de produção, onde  $D_o$  é a Disponibilidade obtida e  $D_d$  é a Disponibilidade desejada.

## 5.0 – Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1994) Confiabilidade e Manutenibilidade. NBR - 5462, novembro;
- [2] BLANCHARD, Benjamin S. and FABRYCKY, Wolter J. (1990) System Engineering and Analysis (Second Edition);
- [3] DIAS, Acires e SANTOS, Cícero Mariano Pires dos (1999) O Desenvolvimento Tecnológico e a Gestão da Manutenção. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - Organizado pela Faculdade de Engenharia Mecânica/Universidade de Campinas - São Paulo, 22 a 26/Nov;

- [4] MOUBRAY, John (1997) RCM II - Reliability-Centered Maintenance. Industrial Press Inc. Second Edition.
- [5] ORGANIZATION, ASIAN PRODUCTIVITY (1990) Total Productive Maintenance – TPM. 4-14 Akasaka 8-chome Minatu-ku, Tokyo 107 Japan (or: Quality Resources – A Division of The Kraus Organization Limited - One Water Street – White Plains , NY 10601);
- [6] RIIS, Jens O. and LUXHOJ, James T. and THORSTEINSSON, Uffe (1997) A Situational Maintenance Model. International Journal of Quality & Reliability Management. Vol. 14 No. 4 p. 349-366.
- [7] Santos, Cícero M. P. dos (1999) Um Modelo para o Aumento de Produtividade do Conjunto Turbina – Gerador em Instalações Hidrelétricas, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC;
- [8] SMITH, Anthony M. (1993) Reliability Centered Maintenance. McGraw-Hill. Inc.

## 6.0 – Questões

- (a) Qual política de manutenção você entende ser mais adequada para determinar as necessidades de manutenção dos bens físicos? Porque?
- (b) Qual política de manutenção você entende ser mais adequada para assegurar que as necessidades de manutenção sejam as mais fáceis de atender, de menor custo e efetivas possíveis? Porque?
- (c) No texto acima foram apresentadas duas equações para o cálculo da disponibilidade, existe alguma diferença entre as mesmas?
- (d) O modelo de organização tem influência sobre os resultados da manutenção ou estes dependem apenas de políticas adotadas?
- (e) Como a manutenção preditiva pode reduzir a preventiva bem como a corretiva?

- (f) Seria possível dizer que a manutenção preditiva é um tipo de manutenção preventiva?
- (g) Procure estabelecer graus de importância distintos aos fatores de contorno, bem como aos seus detalhamentos (faça em conformidade com o componente específico que você atua ou use os dados do texto acima).
- (h) Descreva como a confiabilidade esta relacionada com o projeto do item ou componente.
- (i) Descreva como a manutenibilidade esta relacionada com o projeto do item ou componente.
- (j) Identifique e comente sobre os elementos mais importantes na definição da confiabilidade.
- (k) Relacione em adição ao texto as grandezas que no seu entender podem ser adotadas para uma medida quantitativa da manutenibilidade.
- (l) No seu entender a MCC e a MPT, enquanto políticas, são conflitantes ou não? Justifique.
- (m) Considerando a questão anterior a MCC e MPT podem ser combinadas? Neste caso qual poderá ser um possível resultado desta combinação?
- (n) Durante o texto acima foram fornecidas duas expressões para o cálculo da confiabilidade, tais equações são totalmente idênticas ou apresentam alguma diferença entre si? Qual?



**PARTE III**  
***SUBSTITUIÇÃO E MANUTENÇÃO***  
***DE PREVENÇÃO***

---

---



# GERENCIAMENTO DA SUBSTITUIÇÃO E MANUTENÇÃO PROGRAMADA DE EQUIPAMENTOS NA INDÚSTRIA

*Adiel Teixeira de Almeida*

## **1. Introdução**

O problema de substituição de equipamentos é largamente abordado na literatura enfocando aspectos de matemática financeira, onde a preocupação principal se concentra no valor de dinheiro no tempo. Estes modelos consideram o valor presente e futuro do dinheiro para avaliar a substituição de equipamentos. A questão pode também ser visualizada como um problema de análise de investimento, envolvendo o equipamento como capital no sistema de produção.

A questão de substituição é também analisada como um problema de manutenção programada, onde se pretende prevenir um nível indesejado de incidência de falhas comprometa o desempenho do sistema. Este nível está associado a probabilidade alta de falhas que pode ocorrer em determinados momentos da vida do equipamento.

A seguir é apresentada uma resumida visão deste problema, incluindo abordagens simples e estrutura básica para abordagens mais complexas, envolvendo avaliação multicritério.

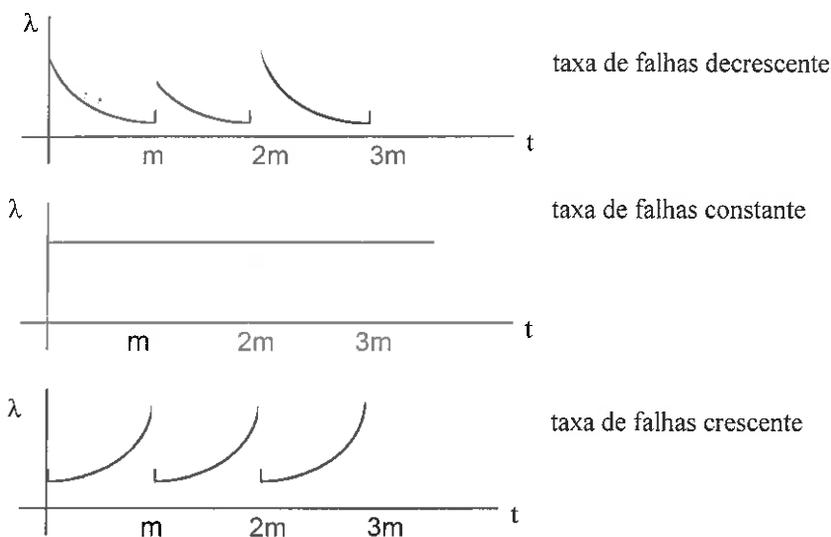
## 2. Visão Geral do Problema de Manutenção Programada

A atividade de manutenção é fundamental quando se visualiza o sistema dentro de seu ciclo de vida útil. Dentro deste tópico podemos destacar a manutenção preventiva e a preditiva. A primeira procura "prevenir" a ocorrência de falhas se antecipando pela substituição de partes do sistema que apresentam grande probabilidade de falha. Tem similaridade com a questão de substituição de equipamentos ou sistemas. A manutenção preditiva tem natureza similar. Entretanto, se destaca pela realização de inspeções ou monitoração para "predizer" o estado do sistema e indicar ações preventivas.

A seguir são apresentadas algumas considerações envolvendo a manutenção preventiva ou substituição. Há vários modelos complexos de substituição de equipamentos já desenvolvidos onde a consideração de custos é fundamental. A substituição de um item tem justificativa quando o custo de mantê-lo em operação é elevado. Outro aspecto que justifica a substituição é o nível de confiabilidade baixo o que também acarreta elevados custos operacionais. Além disso o fator obsolescência deve também ser levado em conta.

A atividade de manutenção preventiva pode ser analisada considerando-se o comportamento da taxa de falhas. Toma-se por base a curva da banheira para efeito ilustrativo. A questão então é observar a tendência de  $\lambda$  no tempo. Os seguintes pontos podem ser observados, associados a figura que se segue:

- $\lambda$  decrescente: a substituição aumenta a probabilidade de falha;
- $\lambda$  constante: a substituição não faz nenhuma diferença, pois a probabilidade de falha é a mesma;
- $\lambda$  crescente: a substituição aumenta a confiabilidade.



Desta forma, se verifica que não há sentido em se efetuar a substituição ou manutenção preventiva (como descrita acima) na fase operacional de um item, quando a  $\lambda$  é constante.

A manutenção preventiva, neste caso mais simples, consiste em se antecipar ao início da fase III e substituir as partes cuja  $\lambda$  tende a aumentar. A idéia é efetuar a substituição estimando-se o momento apropriado através da distribuição de probabilidade relativa a falhas por desgaste.

Considerando apenas este aspecto abordado acima, tem-se o seguinte problema:

- O amortecedor de um carro tem características tais que ao final de sua vida útil, a kilometragem até falhar por desgaste segue a lei de falhas Normal  $N(u, \sigma)$ , de modo que  $u = 70.000$  km e  $\sigma = 10.000$  km. Se o fabricante recomendar substituir o amortecedor com 50.000 km de uso, então: a) qual é a chance de

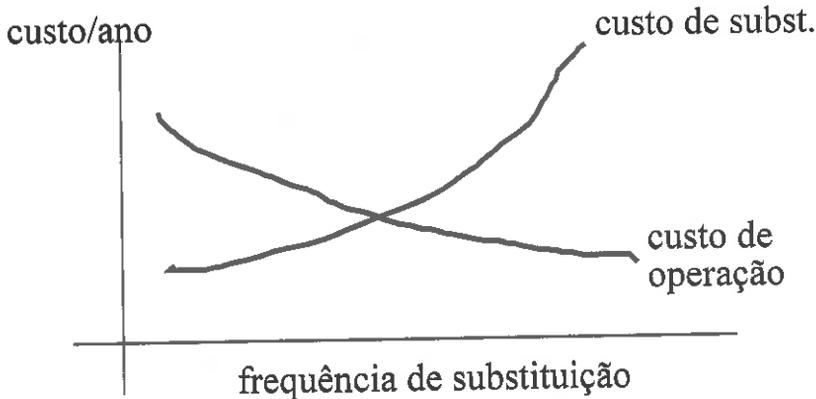
que haja uma falha por desgaste antes da substituição? Qual poderia ser o desvio padrão para o caso se admitir uma chance de falhas de 0,05?

Para se obter a resposta a esta questão deve-se considerar a probabilidade representada pela área a esquerda da curva. Isto pode ser efetuado de diversas formas, inclusive com o auxílio da tabela da normal reduzida.

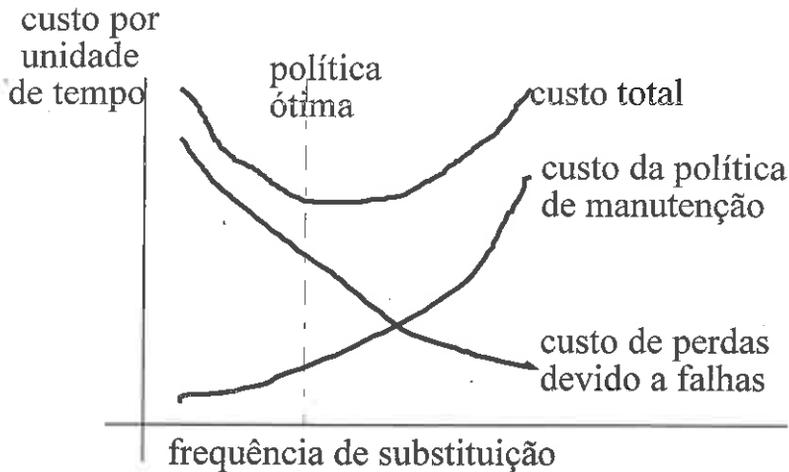
O mesmo problema pode ser facilmente considerado considerando a distribuição Weibull. Obtendo-se os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  e aplicando-se na forma analítica da função  $F(t)$ .

### 2.1. - Considerações sobre o Custo

Considerando a questão de custo, a política de substituição planejada implica em menor custo total do que a substituição quando falha. Observar figura a seguir.



A figura a seguir mostra o efeito da manutenção preventiva.



Uma política de manutenção/substituição tem por objetivo fornecer uma estratégia de substituição com mínimo custo total. Esta política é válida quando  $C_f > C_p$ , onde:

$C_f$  - custo de substituição por falha

$C_p$  custo de substituição. programada

A hipótese básica neste caso é de que os intervalos entre substituições são suficientemente pequenos para que se ignore o valor do dinheiro no tempo. Caso seja necessário se considerar o valor do dinheiro no tempo, deve-se aplicar as técnicas vistas em matemática financeira.

A seguir é apresentado um exemplo com considerações sobre os custos.

- Um cabo numa linha de montagem tem um distribuição de tempo de falha Weibull com  $\eta$  300 h,  $\beta = 1,7$  e  $\gamma = 150$  h. Se ocorrer uma falha durante o uso, o custo de parada na linha é \$5.000. o custo de substituição durante manutenção programada é

\$500. Se a linha de montagem funciona por 5.000 horas por ano e a manutenção programada é efetuada toda semana (100 horas), qual seria o custo esperado por ano de substituição a intervalos de uma semana e duas semanas?

Sem substituição programada, a probabilidade de falha é:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} = 1 - e^{-\left[\frac{t-150}{300}\right]^{1,7}}$$

Com substituição programada depois de m horas, o custo de manutenção em 5.000 h é:  $(5.000/m) \times 500 = (2,5 \times 10^6)/m$ .

O custo esperado de falha em cada intervalo de substituição programada será (considerando não mais que uma falha no

intervalo):  $5.000 \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{m-150}{300}\right]^{1,7}} \right\}$

O custo total por ano será:

$$C = \frac{2,5 \times 10^6}{m} + \frac{5.000 \times 500}{m} \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{m-150}{300}\right]^{1,7}} \right\}$$

Os seguintes resultados são obtidos:

m	C	número de substituições programadas	falhas esperadas
100	\$25.000	50	0
200	\$18.304	25	1,2
400	\$38.735	12	6,5

Este cálculo tem algumas simplificações, dentre as quais considera a possibilidade de apenas uma falha em  $m$ . A rigor se tomaria por base:  $C(t_p) = C_p + C_f \times M(t_p)$ , conforme procedimento abaixo.

## **2.2. - Políticas de Substituição**

Há duas abordagens para políticas de substituição: por idade e em bloco.

A substituição por idade consiste na substituição individual. Substitui o item quando:

- alcança a idade de substituição  $t_p$ , ou
- falha.

No caso de falha, o item é substituído no momento da falha e começa a contar o tempo de vida a partir deste instante. Esta política tem as seguintes características: mais eficiente e menor custo.

A substituição em bloco consiste em substituir todos os componentes a um intervalo fixo  $t_p$ . Os componentes que falharem são substituídos, com a falha. Há uma escala programada de substituições. Se há uma falha entre duas substituições programadas, é efetuada a substituição do item que falhou, sem se interromper a escala. Esta política tem basicamente a seguinte característica: mais fácil para operacionalizar.

Geralmente adota-se uma solução de compromisso entre as duas políticas.

### 2.3. - Inspeções Periódicas

A questão das inspeções periódicas surgem dentro do contexto da manutenção preditiva. Os modelos de decisão na manutenção preditiva e monitoramento, envolvem decisões a partir dos dados coletados nas inspeções periódicas. Outra decisão neste contexto está associada à periodicidade da inspeção, que pode ser baseada nos princípios adotados acima.

### 3. Método de Glasser para Manutenção Programada

O objetivo da maioria dos modelos é minimizar a taxa de custo total  $c(t)$ , dado por:

$$c(t) = C(t)/T(t), \text{ onde}$$

$C(t)$  - custo total médio de um completo ciclo de manutenção (inclui custo de falha, custo de manutenção preventiva, e custo de perda de produção)

$T(t)$  - tempo total de ciclo do item.

Dados  $C_f$  = custo de substituição por falha e  $C_p$  = custo de substituição. Programada. Então, considerando a substituição por idade, o custo operacional por unidade de tempo -  $C(t_p)$  é:

$$C(t_p) = C_f \times F(t_p) + C_p \times (1 - F(t_p))$$

$$C(t_p) = C_f \int_0^{t_p} f(t) dt + C_p \int_{t_p}^{\infty} f(t) dt$$

Tem-se que o tempo de uso esperado de cada item  $T(t_p)$  é dado por:

$$T(t_p) = u_f + t_p \times (1 - F(t_p))$$

onde,  $u_f$  é o tempo de vida médio parcial, considerando a faixa de variação entre 0 e  $t_p$ .

$$T(t_p) = \int_0^{t_p} t f(t) dt + t_p \int_{t_p}^{\infty} f(t) dt$$

A política ótima ( $t_{p^*}$ ) consiste em minimizar o custo médio por unidade de tempo -  $B(t_{p^*})$ :

$$B(t_{p^*}) = C(t_p)/T(t_p)$$

Propõe-se obter uma medida da eficiência relativa de uma política de substituição através da razão normalizada de custo, a qual é dada por:  $\rho = B(t_{p^*}) \cdot E(t) / C_f$ . O valor de  $\rho$  deve estar claramente abaixo de 100 % para que a política de substituição seja adequada.  $\rho$  representa o custo percentual comparado com a não realização da manutenção programada, ou seja, no caso de substituição apenas por falha.

A solução pode ser obtida apenas com o conhecimento de  $f(t)$ . Para a distribuição Weibull, tem-se:

$$B(t_{p^*}) = \frac{C_p e^{-(t_{p^*}/\eta)^\beta} + C_f (1 - e^{-(t_{p^*}/\eta)^\beta})}{\int_0^{t_p} e^{(u/\eta)^\beta} du}$$

( $t_{p^*}$ ) é o valor de ( $t_p$ ) que minimiza a equação acima.

A solução pode ser obtida por método iterativo, ou método gráfico.

Considerando a substituição em bloco, tem-se:

$$C(t_p) = C_p + C_f \times M(t_p)$$

$$B(t_p) = C(t_p)/t_p$$

onde,  $M(t_p)$  é a função renovação - o número esperado de falhas no tempo  $t$ .

Este resultado em geral é complexo. Para a função Weibull:

$$M(t_p) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i (-1)^i \eta^i t^{\beta_i}$$

onde, o coeficiente é definido por  $A_1 = 1$ , e

$$A_i = \frac{1}{\Gamma(i+1)} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Gamma(j\beta+1)\Gamma(i\beta-j\beta+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(i\beta+1)} A_{i-j}.$$

O método que utiliza o gráfico de GLASSER permite que  $(t_p^*)$  seja estimado para ambas as políticas: por idade e em bloco. A hipótese considerada neste método é a de que os tempos de falha seguem a distribuição Weibull.

As informações necessárias são:

- a relação de custo  $k = C_f/C_p$ ; observação: se  $k < 1$ , a política ótima é substituir sempre quando falhar.
- a relação  $v = u/\sigma$ , sendo:

$$\hat{u} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \hat{u})^2}{n-1}$$

Os valores de  $k$  e  $v$  são aplicados no gráfico de Glasser e o correspondente valor de  $z^*$  e  $\rho$  são obtidos. Então  $(t_p^*)$  é obtido por:  $(t_p^*) = u + z^* \sigma$ .

$$\text{Alternativamente, tem-se: } v = \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right)\right]^2}$$

#### 4. Método Multicritério para Manutenção Programada

Na formulação multicritério (Gomes et al, 2002) o problema é analisado considerando diretamente os múltiplos objetivos envolvidos, tais como custo e disponibilidade. Na abordagem anterior, a disponibilidade é tratada em termos de custo, o que é bem plausível em algumas situações, como por exemplo em sistemas de produção de bens. Neste caso, a indisponibilidade é representada pelo custo de perda de produção. Em alguns sistemas (produção de serviços, por exemplo) a disponibilidade não pode ser simplesmente representada pelo custo, pois outros aspectos intangíveis são considerados.

##### 4.1. - Teoria da Decisão

Em Teoria da Decisão (Smith, 1988), um problema é formulado, considerando-se os seguintes elementos básicos:

1. O espaço de ações ( $a_1, a_2, \dots, a_m$ ) onde  $a_i$  representa uma das possíveis ações a serem adotadas.
2. Um conjunto representando o estado da natureza  $\theta$ . Este para o contexto aqui discutido pode ser chamado de estado do sistema.
3. Um conjunto representando as conseqüências da decisão. Este conjunto de forma simplificada é expresso em termos

quantitativos pela função utilidade ou função perda. Estas funções apresentam de forma final uma mensuração da combinação do estado do sistema e da ação adotada pelo decisor. Assim, a função utilidade é representada por  $u(a_i; \theta)$  e a função perda por  $L(a_i; \theta)$ .  $u(a_i; \theta) = -L(a_i; \theta)$ , sendo neste caso mais usual se utilizar  $u(a_i; \theta)$ .  $u(a_i; \theta)$  é obtido através de um processo de elicitacão onde o decisor tem uma modelação de suas preferências com relação aos valores de  $\theta$  e  $a$ .

A questão da decisão então se resume em escolher a ação  $a_i$  que apresenta a máxima utilidade  $u(a_i; \theta)$ . Para isto é necessário se saber o máximo possível sobre  $\theta$ . Existem alguns critérios utilizados para a maximização de  $u(a_i; \theta)$ . Destacam-se dois deles: o minimax e o Bayesiano.

O minimax consiste em escolher o  $a_i$  com a mínima perda dentre aquelas alternativas com máxima perda  $L(a_i; \theta)$  por uma escolha de  $\theta$ . Neste critério não se utiliza nenhum conhecimento sobre  $\theta$ , e portanto só se justifica o seu uso em condições especiais.

O Bayesiano consiste em escolher  $a_i$  que apresente a máxima  $u(a_i; \theta)$  esperada em função de  $\pi(\theta)$ . Assim, tem-se a seguinte formulação:

$$\text{Max}_{a_i} \int_{\theta} u(a_i, \theta) \pi(\theta)$$

A expressão na integral representa o valor esperado de  $u(a_i; \theta)$ . Como resultado tem-se os valores de utilidade atribuídos pelo decisor para as diversas opções de  $\theta$ , ponderadas pela probabilidade de sua ocorrência  $\pi(\theta)$ . Assim, para cada  $a_i$  avalia-se este valor esperado, escolhendo-se aquele que apresente o maior valor.

#### 4.2. - Modelo de Decisão Multicritério

O Estado da Natureza tem duas dimensões. Uma dimensão corresponde a confiabilidade dos equipamentos. A outra dimensão está associada ao tempo de restabelecimento do sistema no caso de falha do equipamento antes do tempo estabelecido para intervenção. Este tempo de restabelecimento corresponde a manutenibilidade do sistema reparável representada pelo MTTR (tempo médio para reparo) ou pelo parâmetro da função exponencial  $u$  ( $u=1/MTTR$ ).

Neste problema o Estado da Natureza relativo a confiabilidade dos equipamentos é representada pelos parâmetros da função Weibull.: o de forma  $\beta$  e o de escala  $\eta$ . Assim  $\theta = (\eta, \beta, u)$ . Dentro da estrutura Bayesiana, as incertezas sobre estes parâmetros são tratadas através de uma distribuição de probabilidade a priori  $\pi(\theta) = \pi(\eta, \beta, u)$ .

Duas conseqüências são associadas ao problema e representam os critérios do problema de decisão. Uma está associada ao custo total envolvido  $C_t$ . A outra corresponde ao nível de Disponibilidade do sistema ( $A$ ). O decisor formula suas preferências em relação a ( $A, C_t$ ) através de uma função utilidade  $U(A, C_t)$ . Entretanto vale ressaltar que  $C_t$  é obtida através de uma função custo onde a disponibilidade é indiretamente parte integrante.

O espaço de ações é representado pelos possíveis tempos de intervenção no sistema. Assim a ação a ser escolhida corresponde a uma variável contínua  $t_p$ . A escolha da ação será baseada na maximização do valor esperado da função utilidade que associa o estado da natureza passível de ocorrer e a ação escolhida, sendo representada por  $U(\eta, \beta, t_p)$ . Tem-se:

$$\text{Max } E_{\eta, \beta, u, t_p} \{U(\eta, \beta, u, t_p)\}$$

$t_p$

A estruturação deste modelo envolve várias atividades, dentre as quais se destaca a derivação da função  $U(\eta, \beta, tp)$ . Esta função é obtida a partir de  $U(A, Ct)$  e da função consequência  $Pr(A, Ct | \theta, tp)$ , ou seja,  $Pr(A, Ct | \eta, \beta, u, tp)$ . Esta função estabelece a relação probabilística entre as consequências e o estado da natureza combinado com a ação escolhida.

Estudos de análise de sensibilidade indicam a robustez do procedimento, avaliando a sensibilidade dos resultados com os parâmetros a serem estimados para as funções utilidade  $U(A, Ct)$  e também para  $\pi(\theta)$ .

## Bibliografia

- O'Connor, P. D. T.; (1989) Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons, pp.398p. ISBN: 0-471-90551-8.
- Kapur, K. C.; Lamberson, L. R.; (1977) Reliability in Engineering Design. John Wilwy & Sons, pp.586 p. ISBN: 0-471-51191-9.
- Barlow, R. E.; Proschan, F.; (1967) Mathematical Theory of Reliability. John Willey & Sons, Inc.
- Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C. de; (1993) Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System. IEEE Trans. Reliability. 42(3)pp.401-407.
- Raiffa, H.; (1970) Decision Analysis. Addison-Wesley.
- Smith, J. Q.; (1988) Decision Analysis - A Bayesian Approach. Chapman and Hall.
- Gomes, Luiz Flávio Autran Monteiro, Gomes, Carlos Francisco Simões, Almeida, Adiel Teixeira de. Tomada de decisão gerencial: O Enfoque Multicritério (no prelo). Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2002.

Almeida, A. T. de (2000) Decisão Multicritério na Engenharia de Manutenção – Modelos de Decisão e Aplicações; In: Almeida, A. T. de & Souza, F. M. C. de, Produção e Competitividade: Aplicações e Inovações, 2000 Editora Universitária, pp. 255-299.



# APPLYING LEVEL OF REPAIR ANALYSIS TO A CONDITION MONITORING PROBLEM

*Lilian L. Barros*

## **Abstract**

There are several problems with the standard calculation of life-cycle cost coefficients used in level of repair analysis, in particular the problem that fixed and variable costs are not clearly identified for each repair option. Fixed costs are a step function linked to capacity constraints while variable increases continuously. Furthermore, total fixed and total variable costs for the life cycle for a physical system (a machine or a set of machines) should be evaluated simultaneously for all components and for all repair options. There are operations research tools which permit the solution of large problems of this type under a set of acceptable simplifying assumptions, such as mixed integer programming which coupled with heuristics methods and a user-friendly interface can become a practical tool for decision-makers. This paper describes such a combination of methods which has been applied to maintenance planning of rotating machines, where mean-time-between failures can be estimated through vibration analysis and an expert fault diagnostic system.

## **1.0 Introduction**

The question of whether to repair or discard components of a system subject to failure in order to minimize support and maintenance costs over the system's life cycle has several real-life

applications. The trade-offs between hardware quality and life-cycle maintenance costs are well-known, as these affect both equipment buyer and seller. Olorunniwo (1992) and Richard (1991) discuss how this trade-off affects multiple buyers while Shifrin (1990) and Larson (1992) consider its impact on equipment engineering design. The profitability of maintenance contracts offered by the manufacturer or a third-party after the end of the normal warranty also depend on life-cycle costs, as shown in Balachandran and Machmeyer (1992). The Japanese manufacturing industry intends to establish cost-effective maintenance life plans applicable to many industries (see Kelly and Harris (1993), Rennes (1993) and Hard (1991) for applications to water engineering and health, respectively).

If manufacturers offer long-term warranties on new equipment, they should also be concerned with the engineering design process and become involved as early as possible because design decisions can have a serious impact on life-cycle costs. Oakley (1993) estimates that design determines between 70 and 80 percent of life-cycle costs. On the other hand, inadequate maintenance cost the US industry an estimated \$200 billion per year [Hilligoss (1992)].

This paper deals with an important aspect of equipment maintenance which is level of repair analysis (LORA). The US Army defines level of repair analysis as "not only the repair or discard location for the items that make up a system or equipment, but the extent of maintenance permitted and the resources needed to support the maintenance process" [Crabtree and Sandel (1989)]. The basic elements necessary for the calculation of life-cycle maintenance costs are **reliability and maintainability** parameters, i.e., how often the equipment is expected to fail during its lifetime and what are maintenance costs to bring it back to operating condition after these failures happen. Engineering design parameters are important to determine maintenance costs by

affecting the difficulty of access to faulty components for instance, or the existence and accuracy of self-diagnostic procedures and so on. However technician training as well as the availability of good quality support and test equipment, for instance, also affects manpower costs.

Finally, there are cost trade-offs between preventive and corrective maintenance, as pointed out by Olorunniwo (1992) where the former is often considered as a component of operating costs and the latter happens more unexpectedly, thus potentially causing greater disruption to the production process. These considerations should be taken into account during costly projects leading to plant modernization and/or automation. Redundancies in equipment may be a costly proposition to avoid even more costly production losses due to stoppage over the life cycle of the equipment. Consequently, engineering logistics and in particular life-cycle cost analysis should be an important and early component of plant modernization or automation projects (see Barros, 1999).

Life-cycle cost models can be crudely classified by type of maintenance sites (or echelons of maintenance) and indenture levels, or the number of component layers in a given system, another engineering design characteristic. The simplest repair option is discard where any failed component is immediately replaced by a working spare unit and lower level components are not even considered in the repair process. Portable telephones are a good example of this type of repair policy. The next option is a one-indenture, one-echelon repair posture where the failed component may enter the single maintenance facility for repair. Once repaired, the unit is placed in inventory and therefore less spares are necessary for the system to run efficiently. However technicians must be trained and support and test equipment must be purchased. Cost trade-offs must be evaluated to make a cost-effective decision.

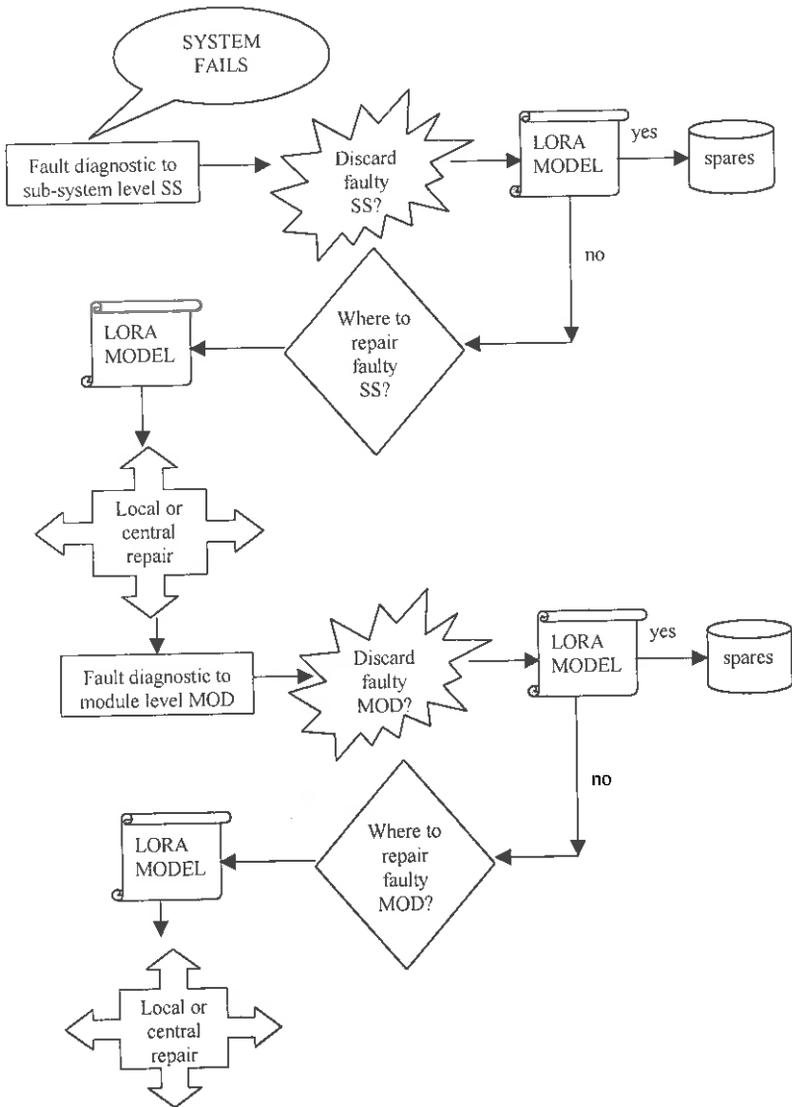
Optimization within a single repair echelon cannot provide practical solutions to multi-level systems where the interactions among components affect the total cost. These interactions require more sophisticated modeling tools than what is often available from commercial life-cycle cost models. The structure of such models is roughly described in a classic textbook in the field, Blanchard (1986) where costs are classified by phase (research and development, initial investment, operations and maintenance, system phase-out), timing and category of expenditures (typically initial and recurring costs, used for present value calculations). Commercial life-cycle cost models tend to concentrate on operations and maintenance costs which are aggregated under the heading of initial (first year) and recurring (annual) cost categories [Butler (1995)]. A discount factor combining given inflation and discount rates is applied to the latter to produce the present value of the total life-cycle cost for the least expensive combination of repair options for the various components. The main problem with these models is the fact that fixed and variable costs are evaluated jointly with the latter normally being allocated to repairable units. If not all units are repaired at a given site, fixed costs for a given echelon of maintenance are not fully paid for and the total cost for that repair option might be underestimated. Conversely, the economic advantages of the discard option will tend to be underrated.

## **2.0 Level of Repair Analysis**

The model in this paper follows USA military standards and assumes two indenture levels and two echelons of maintenance. This implies that a typical system is broken down into two component levels (sub-systems and modules) which can be discarded or repaired at a local or a central repair facility. Subsystems are physically independent system components

composed of modules which are the smallest individually repairable units contained in a system. Modules contain pieceparts which are relatively inexpensive and usually discarded upon failure. In a radio communications system, the radio and the external antenna may be considered subsystems. Speakers and the circuit-board enclosed in the radio are modules. The antenna may be considered as a subsystem containing a single unique module, the antenna itself. The breakdown of a system into sub-systems, modules and pieceparts is generally a complicated and time-consuming exercise, particularly when detailed system breakdown into components is rarely supplied by equipment manufacturers.

Figure 1 describes the typical set of decision-making points during the development of a level-of-repair analysis (LORA) model, for a two-indenture level two-echelon of maintenance repair structure. When a system failure occurs, the faulty sub-system is replaced by a working spare unit (assuming that there is one in stock) and may be discarded or repaired. If discarded, a new spare must be procured and all enclosed modules are discarded as well without further diagnostic. However if the faulty sub-system is repaired, the next set of questions pertain to where the repair is to be performed. In the case of the two-echelon model used here, there is only a local or a central repair facility that can be used. The former is typically nearer the site of operations while the latter may involve returning a faulty component to the manufacturer. Whichever the option, the next set of questions concern the enclosed modules which can be either discarded or repaired. Note that if a repair facility is used at either indenture level, there will be certain fixed costs associated with each facility (support and test equipment, rent, electricity and so on) as well as variable costs associated with each repair action (labour charges and spare parts are the most important costs in this category).



**FIGURE 1. GRAPHIC REPRESENTATION OF LEVEL OF REPAIR ANALYSIS (LORA).**

### **3.0 The Level of Repair Optimisation Model (Lorom)**

LOROM is an optimization model based on a branch-and-bound procedure that correctly evaluates total repair costs, classifying time-dependent life-cycle maintenance costs such as research and development, initial investment, operations and maintenance, and system phase-out, under two main headings:

- ❖ **Fixed costs** which are typically associated with a repair facility rather than particular system components. These costs tend to remain constant regardless of the number of components being repaired up to the facility capacity limit. Examples might be site construction costs, the acquisition price of support and test equipment, technical data development costs and technician training costs. Life-cycle cost models tend to assume that the discard option has zero fixed cost because it does not require a repair facility.
- ❖ **Variable costs** are a function of the number of repair actions or alternatively the failure rate. The failure rate is a determining factor for spare costs (as well as the associated inventory and storage costs). Technician labour costs are also an important component of variable costs in most life-cycle costs. These costs are estimated for each system component and are positive for the discard option as well.

#### **3.1. - Model Assumptions**

The system is assumed to be in one of two states: operative (like new) or inoperative (broken). The system's parameters are assumed to be stationary, i.e., invariant with respect to time, an assumption that is particularly appropriate for electronic systems

but not so appropriate for mechanical systems which suffer degradation over time. The following set of additional assumptions are also necessary:

- ❖ System availability requirements are normally set at very high levels, e.g. 80-90% given high stoppage costs in industry and the large risks of military equipment unavailability in a conflict situation. Therefore, the pressure is to replace faulty units at once and then make a repair decision concerning the faulty item, thus imposing a high initial spare and inventory costs on the maintenance structure.
- ❖ Physical systems can be broken down into subsystems which can be broken down into modules and these into pieceparts. System failures can be attributed to subsystem failures, subsystem and module failures to module and pieceparts, respectively.
- ❖ Upon system failure, the identification of the faulty subsystem is instantaneous. However, fault isolation to the module (piecepart) level occurs only if a decision is made to repair the subsystem (module).
- ❖ Most life-cycle costs models tend to assume that the failure process follows a stationary memoryless Poisson process, first because this process describes a large number of real-life cases and secondly due to computation simplification. This and the assumption of constant failure rates affect the calculation of life-cycle costs coefficients but can be easily changed without affecting LOROM significantly.
- ❖ Identical repair capabilities and labour skills are available at each echelon of maintenance for the various sites (military bases, for instance), in terms of equipment and personnel. This is a simplifying assumption that can have an important impact on model size if disregarded.

Furthermore, it is necessary to assume that the operator always knows the state of the system; failures are detected immediately; the failure distribution for a given part is given and does not depend on the location of the part; lifetimes of all parts are independently determined; all parts are continuously subject to the failure process; the failure of a given part does not cause further damage to other working parts.

The final set of assumptions pertain to the relationship between subsystem and enclosed modules repair options. If a subsystem is discarded upon failure, enclosed modules are also discarded without further diagnostics (and similarly for all pieceparts enclosed in the modules). If a subsystem is repaired locally, any repair option is open for enclosed modules. However if a subsystem is shipped away to a central repair facility for repair, the local repair option is not very cost-effective for enclosed modules which must be shipped twice, once within the subsystem and once on their own. This set of rules are summarized in table 1 below.

<b>SUB-SYSTEM REPAIR OPTION</b>	<b>ENCLOSED MODULE REPAIR OPTION</b>	<b>Discard</b>	<b>Central Repair</b>	<b>Local Repair</b>
Discard	1	-	-	-
Central Repair	2	3	-	-
Local Repair	4	5	6	6

*TABLE 1. Feasible Repair Postures for Subsystems and Enclosed Modules.*

#### 4.0 The Integer Programming Formulation

In general terms, assume that there is an electronic system with a set of  $I$  indenture levels and  $J$  components all of which may be assigned one of a set of  $R$  repair options. Let us assume that  $A = (X, \Gamma)$  defines a set of components  $X$  involved in father-son relationships, or indenture levels  $\Gamma$ . If a component  $y \in \Gamma_x$  it can be said that component  $y$  is the son of  $x$  in a tree structure, or module  $y$  is enclosed in subsystem  $x$ . There is a set of  $R$  repair options a subset of which  $R_1 \in R$  have positive fixed costs (for instance, all non-discard options in figure 1 above), a subset  $R_2 \in R$  for which a repair option for the father component must be imposed to all son components (such as the central repair option in table 1) and a subset  $R_3 \in R, R_2 \neq R_3$  for which a repair option selected for a son component must be imposed to the father component (such as the local repair option in table 1, to avoid double shipping of modules).

Let us define the following Boolean variables:

$$M(r,i) \quad \left\{ \begin{array}{l} = 1 \text{ if repair option } r \in R \text{ is selected at} \\ \text{indenture level } i \in I \\ = 0 \text{ otherwise.} \end{array} \right.$$

$$N(r,x) \quad \left\{ \begin{array}{l} = 1 \text{ if repair option } r \in R \text{ is selected for a} \\ \text{component } x \in X \\ = 0 \text{ otherwise.} \end{array} \right.$$

The following coefficients represent present value estimates (i.e. annualised costs will be discounted to an appropriated initial period):

$VC(r,x)$  = total variable cost for repair option  $r \in R$  for component  $x \in X$

$FC(r,i)$  = fixed cost for repair option  $r \in R_1$  at indenture level  $i \in I$ .

The pure integer programming formulation below minimises the present value of the total support and maintenance costs over the life-cycle of an equipment subject to failure:

$$\text{MINIMIZE TC} = \sum_{x \in X} \sum_{r \in R} (VC(r,x) * N(r,x)) + \sum_{i \in I} \sum_{r \in R_1} (FC(r,i) * M(r,i))$$

subject to:

$$\sum_{r \in R} N(r,x) = 1 \quad \text{for } x \in X \quad (1)$$

$$M(r,i) \geq N(r,x) \quad \text{for } r \in R_1, i \in I, x \in X \quad (2)$$

$$N(r,x) \leq N(r,y) \quad \text{for } r \in R_2, \forall y \in \Gamma_x, \forall x \text{ non-terminal} \quad (3)$$

$$N(r,x) \geq N(r,y) \quad \text{for } r \in R_3, \forall y \in \Gamma_x, \forall x \text{ non-terminal} \quad (4)$$

$$M(r,i), N(r,x) \in \{0,1\} \quad \text{integer for } r \in R, i \in I, x \in X \quad (5)$$

Constraint set (1) imposes a single repair option for all components in the system. Constraint set (2) imposes a fixed charge for a subset of repair options  $R_1$ . Constraint set (3) assigns the same repair option for a father component and all his son components for a subset of repair options  $R_2$ . Constraint set (4) imposes the same subset of repair options  $R_3$  to the father component if it has been assigned to any son component. In the particular case of two indenture level, two echelons of maintenance system, constraint set (3) defines the first row rules in table 1 above, that is, all modules enclosed in a given sub-system

will be discarded if the sub-system is discarded. Constraint set (4) imposes condition so that the third column rule in table 1 is true, that is, if any enclosed son component is repaired at the local facility, so will be the father component. Finally, constraint set (5) defines this as a pure integer programming problem.

This formulation is clearly not constrained to two indenture levels or two echelons of maintenance although typical problem size may increase. The total number of components has a negligible effect on problem size and complexity. For example, a 5 x 7 system containing 40 integer variables and 72 constraints, and a 13 x 13 system containing 82 variables and 194 constraints were solved very quickly using a commercial linear programming package (under 2 and 5 minutes of running time, respectively). However, if the number of echelons and indenture levels is also increased, problem size increases much faster and may become unmanageable under the constraints of most commercial IP packages. Fortunately, the formulation above provides a natural integer solution in its relaxed linear programming version and more importantly, a heuristic provides tight upper and lower bounds on the optimum value of TC (TC\*) thus greatly reducing computer running time. Finally, there is a version of LOROM that does not rely LP relaxations to solve the branch-and-bound option tree – and this version runs very quickly on most PCs (Barros, 2001).

#### ***4.1. - A Heuristic Method to Improve Bounds***

The heuristic method developed for LOROM uses fixed costs at each indenture level (restricted to two in the case being discussed) to define a decision tree with basic cases in each branch, each defining a class of simple problems where variable life-cycle costs are minimized at each indenture level. The general structure of the tree is defined simply as the permutation of all possible

alternatives which assign values  $\{0, 1\}$  to the four integer variables associated with fixed charges for local and central repair at the two indenture levels (sub-systems and modules). The combination of these four “switches” generates 16 tree branches, as total enumeration would terminate in  $2^n$  steps for a problem with  $n$  case binary variables (in this case  $n=4$ ).

Note that the fixed cost tree guarantees that constraint set 2 is respected, i.e. the appropriate fixed costs associated with each echelon of maintenance are paid for at both indenture levels. It also ensures that constraint set 1 is respected, i.e. that only one repair option is selected for each system component at each tree branch. Therefore, the tree provides complete enumeration for a relaxed version of the integer programming formulation provided above, where constraint sets 2 and 3 are ignored (often called the engineering design constraints because these take into account which sub-components are enclosed in which components).

The most important advantage of the tree is the fact that four branches are guaranteed to provide solutions which are feasible in the original problem (i.e. including the engineering design constraint set). This is so when lower echelon components (e.g. modules) are discarded and any repair alternative for the higher echelon component (e.g. sub-systems) is a feasible solution with respect to constraint sets 2 and 3 (see for example the first column in table 1 listing feasible sub-system repair options 1, 2 and 4 for module discard). Other tree branches may accidentally provide feasible solutions as well but this is guaranteed. Experience has shown that this heuristic method greatly improves bounds on  $TC^*$  but the number of branches in the tree may increase quickly with the number of echelons of maintenance and indenture levels. In any case, the required operations to calculate upper and lower bounds on  $TC^*$  are only additions thus consuming little computing time even for a large tree.

## **5.0 Application to Fault Diagnostic Systems**

This application has been described in detail elsewhere [Barros and Noroozi (1995)] and a brief summary is presented below to show the generality of the LOROM approach which was coupled with a condition monitoring system developed to measure vibration of rotating machines within three levels of frequency ranges (low, medium and high). A condition monitoring system is designed for continuous evaluation of equipment "health" during its serviceable life for the purpose of early fault recognition. Advanced warning can be used for informed scheduled maintenance planning as well as better decision-making during the repair process thus leading to increased reliability (due to early failure warning, decrease in overall system failure rates and down time), maintainability (due to better workload planning and spare requirements) and lower administrative costs (due to better forecasting) [Arvanitakis, D. (1992)]. Tauner and Penman(1990) compare this maintenance strategy with emergency corrective maintenance using an analogy, the latter being "an ambulance at the foot of the cliff rather than a fence at the top"(p.4).

If a condition monitoring system for rotating machinery in an industrial environment is coupled with a fault-diagnostic routine, it will decrease down time and capital losses in a manufacturing plant, as well as increase safety standards by providing: (i) early fault recognition; (ii) forecasting of future failures; (iii) better scheduling of maintenance staff and (iv) better scheduling of plant and/or equipment stoppages. The resulting savings can be significant at plant, industry and national levels: the USA spends an estimated US\$ 200 billion annually in equipment maintenance with an annual growth rate of 12 percent, most of which emergency work or unscheduled maintenance [Malin and Bunton (1985)]. The entire procedure can allow better scheduling

of preventive and corrective maintenance actions, a planning tool particularly useful in an environment where technical staff is not always available.

The application described briefly below used an industrial metal cutter as a case study. The cutter was partitioned into two indenture levels (sub-systems and modules) for which various reliability, maintainability and supportability parameters were estimated for three maintenance options (discard, local and central repair) with the help of a specialist technician. A commercial package called COMO was used to simulate condition monitoring information used to forecast mean-time-between-failures (MTBF) under "normal" and "forced" operating conditions. The latter implies operations under special conditions that result in lower MTBF for components operating in low, medium and high vibration frequency bands. The regression curve specification and the statistical results are presented below showing a very good fit.

The next step was use LOROM to perform level-of-repair analysis using the forecast MTBF. Since LOROM is not designed to calculate life-cycle cost coefficients, another commercial model called EDCAS was used to estimate those coefficients which were subsequently classified into fixed and variable costs. EDCAS also performs level-of-repair analysis but without this critical LOROM cost classification. As discussed above, treating fixed and variable costs without differentiation may make the discard option appear less cost-effective than it should be when fixed costs are taken into account as a step function.

Table 2 below shows that this is exactly what happens when fixed costs increase: for LOROM, the discard option is selected for subsystem 1 while EDCAS remains unaffected but total life-cycle costs are less for the LOROM option although both level-of-repair analysis used the same life-cycle cost coefficients. In short, LOROM performs as well as EDCAS under normal circumstances

but reacts better to increases in fixed costs making the correct decision which is to discard components rather than repair them.

### 5.1. - Curve Fitting

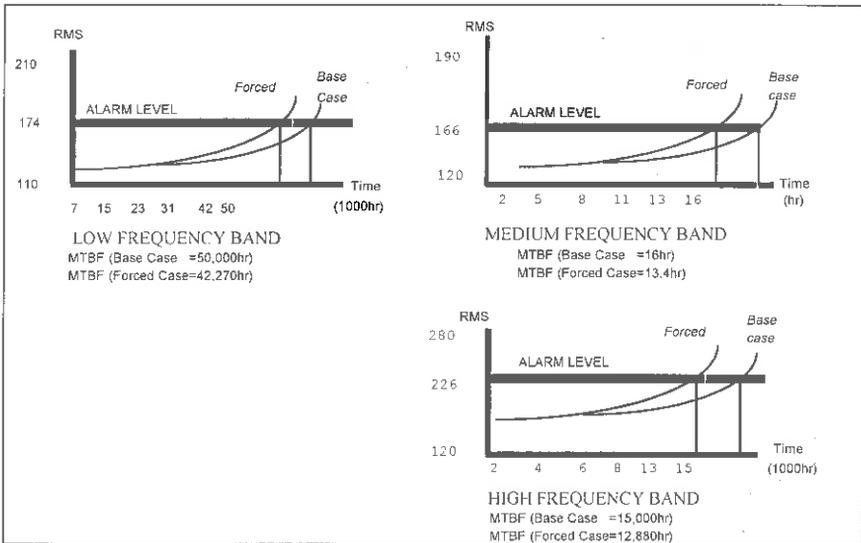
A regression curve was fitted to COMO vibration data, measured in terms of variations around the mean (RMS or root-mean-square) as a function of time. The best fit was a four-degree exponential function where A is the function intercept, e is the constant 2.718, RMS is the root mean square (mean squared error) and time ranges are defined as a function of low, medium and high frequencies:

$$\text{RMS} = a * e^{b * \text{TIME}^4} \text{ or adding the dummy variable D: } \text{RMS} = a * e^{b * \text{TIME}^4 + e * \text{TIME} * D}$$

The exponential specification performed much better than the lognormal, normal and Weibull distributions. The dummy variable was statistically significant and increased the R<sup>2</sup> slightly for the base case but not so for the "forced" case. The small gain in R<sup>2</sup> did not justify the inclusion of the variable in the final analysis. In all cases, the constant term and the time variable were highly significant, the typical R<sup>2</sup> > .96. The results of the statistical analysis are provided in table 2 below with Student "t" test values shown in parentheses below regression coefficients. The charts below illustrate these results and the MTBF forecasts for low, medium and high frequency bands.

COMO BASE CASE	REGRESSION EQUATION	R2 VALUES
Low frequency NORMAL	$\ln \text{RMS} = 4.75 + 1.92\text{E-}07\text{time}$ (332.32) (28.48)	R2=.973
Medium frequency NORMAL	$\ln \text{RMS} = 4.83 + 1.91\text{E-}07\text{time}$ (349.37) (29.34)	R2=.968
High frequency NORMAL	$\ln \text{RMS} = 4.83 + 1.9\text{E-}07\text{time}$ (345.76) (28.89)	R2=.967
Low frequency FORCED	$\ln \text{RMS} = 4.76 + 4.16\text{E-}07\text{time}$ (171.51) (31.82)	R2=.966
Medium frequency FORCED	$\ln \text{RMS} = 4.81 + 4.15\text{E-}07\text{time}$ (172.15) (31.52)	R2=.973
High frequency FORCED	$\ln \text{RMS} = 4.81 + 4.14\text{E-}07\text{time}$ (169.84) (31.02)	R2=.972

TABLE 2. Regression Results Applied to COMO Simulation



## **5.2. - Level-of-Repair Decisions**

Four types of problems were evaluated by a commercial life-cycle cost/level-of-repair analysis package (EDCAS) and LOROM, the same life-cycle cost coefficients being used in either case for the industrial cutter. There was a base case ("normal"), a case representing a stress situation with MTBF lowered by 5% for all components ("forced"), and then both these cases with a high fixed cost where support and test equipment was multiplied by a large constant factor.

Life-cycle costs solutions generated by EDCAS and LOROM were identical for the first and second problem types but LOROM performed better in the other two cases because it deals with fixed costs as a step function. Even in the "normal" case, there was a slight difference between EDCAS and LOROM: although variable costs for the discard and central repair options were identical in the case of module 7, LOROM made the correct decision to discard the module (rather than repair it) to avoid fixed costs.

Table 2 below summarizes these results, using the notation D, L and C to represent the three maintenance options: discard, local and central repair options, respectively for the two subsystems (SS) and eight modules (MOD) enclosed in the industrial cutter used as an example.

CASE	IMPACT	****EDCAS SOLUTIONS*****			*****LOROM SOLUTIONS*****		
		SS	MOD	LCC	SS	MOD	LCC
Normal	base case	LC	DDDDDDCD	44,336	LC	DDDDDDDD	44,336
Forced	low MTBF	LC	DDDDDDDD	45,261	LC	DDDDDDDD	45,261
High FC	base case with high fixed costs	LC	DDDDDDDD	44,914	DC	DDDDDDDD	41,403
Forced-High FC	low MTBF with high fixed costs	LC	DDDDDDDD	45,854	DC	DDDDDDDD	44,559

The combined tool COMO-LOROM, that is a condition monitoring package and a true level-of-repair optimizer can have many industrial applications, and in particular for highly automated facilities using flexible manufacturing systems (FMS). Sethi and Sethi (1990) define FMS as a domain which "should be understood by product engineers, manufacturing engineers, and software programmers. The domain should be planned, managed and with learning expanded" (p.295). Perhaps maintenance engineers should be included in the list of experts as program flexibility or the system ability to run for a long period of time virtually unattended requires "better planning of inspection, fixturing and maintenance" (p.310). Ideally, "sensors and computer controls [should be used] for detection and handling of unanticipated problems such as tool breakages" [and other breakdown maintenance problems] (p.311). The attachment of an auto-diagnostic system to COMO would make the combined tool set even more powerful. There are some recent evolutions in this direction but solutions are rather embryonic.

## 6.0 Summary and Conclusions

LOROM (Level of Repair Optimisation Model) is an analytical tool for maintenance planning. It relies on an integer programming formulation based on the engineering design of hardware systems for which the relaxed linear programming version obtains a natural integer solution. Furthermore some heuristics can be used to generate tight lower and upper bounds on the total life-cycle costs greatly reducing computer processing time. This package was coupled with a condition monitoring package called COMO in order to create an integrated maintenance planning tool that can adjust dynamically to changes in reliability and cost parameters during normal manufacturing operations. This tool is particularly useful for highly automated manufacturing facilities such as FMS. An automated fault diagnostic would make the combined tool set much more powerful but this is still in an embryonic stage and therefore equipment failure is treated as a single category.

Simulated vibration data obtained from COMO were used to test the sensitivity of LOROM to changes in reliability (mainly MTBF) and cost (mainly fixed costs) parameters, and compared to solutions provided by a commercial life-cycle cost package (EDCAS) that ignores the property of fixed costs of being a step function. LOROM reacted as well as EDCAS to changes in reliability parameters but performed significantly better when fixed costs were increased by selecting the most cost-effective repair option for various components.

In other words, when step cost functions are treated as if they were continuous, incorrect decisions may be made with a serious potential impact on long-term operating costs. In the case of maintenance planning, the discard option that does not require a facility should become a more interesting option as fixed costs

increase. The impact of these incorrect decisions on total life-cycle costs can hardly be underestimated if the costs of setting and operating repair facilities for extended periods of time are taken into account. If these analytical tools are used during the design of durable hardware, as many researchers in the field suggest, components may be designed to be maintained when the no-repair options (coupled with a high spares policy) may be the most cost-effective alternative.

LOROM can also be coupled with various failure diagnostic routines such as condition monitoring and expert systems. This coupling allows dynamic adjustments to observed failure-related behavior of the system in its environment. Two applications are briefly described both of which have wide industrial potential as tools for forecasting the timing of future failures, ideally within a class of fault diagnostics. Condition monitoring applied to rotating equipment vibration analysis is the first application. Equipment degradation along the time axis is used to forecast MTBF using regression analysis. This forecast value is then used to recalculate the coefficients of LOROM's objective function. The second application uses the database generated by an expert fault diagnostic system to revise both MTBF and MTTR which may have a major impact on the same coefficients. In the second case, the analytical approaches used for the fault diagnostic procedure and LOROM are rather close, both relying on decision tree structures. Not only the model described here will be affected by major improvements in automated fault diagnostic routines but most of the research today in the field of maintenance planning.

## 7.0 References

- Arvanitakis, D.(1993) Optimal Maintenance. M.Sc. Dissertation, University of Southampton.
- Balachandran, K.R. and Maschmeyer, R.A. (1992) "Accounting for Product Wearout Cost". Journal of Accounting, Auditing and Finance, Vol. 7, Issus No. 1, Winter (pp.49-66).
- Barros, L. and Riley, M. (2001) "A Combinatorial Approach to Level of Repair Analysis". European Journal of Operations Research, vol. 129, number 2, March 1 (pp. 242-151).
- Barros, L. (2000) "A OR-Based Concurrent Engineering Approach to FMS Design" in Almeida and Souza (eds.) Producao e Competitividade: Aplicacoes e Inovacoes. Ed. Universitaria da UFPE, Recife, Brazil.
- Barros L.L. and Noroozi, S. (1995) "Condition Monitoring and Life-Cycle Cost Analysis". Proceedings of the International Conference on Industrial Logistics, Ouro Preto (Brasil), Dec.
- Blanchard, B.S. (1986)Logistics Engineering and Management. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Butler, R. (1995) EDCAS. Equipment Designer's Cost Analysis System. Version 4.0, User's Manual. Systems Exchange.
- Crabtree, J.W. and Sandel, B.C. (1989) "Army Level of Repair Analysis (LORA)".Logistics Spectrum, Summer (pp.27-31).
- Hallahan, S. (1992) "Survey on Maintenance". Informatics, No.12/13, Dec (pp.50-57).
- Hard, Rob(1991) "A Little Know-How Can Help Reduce Service Costs". Hospitals, Vol. 65, Issue No. 7, April (p.68).
- Hilligoss, R.S. (1992) "Maintenance, the business opportunity of the 1990s". Industrial Management, Vol.34, No.2, Mar/Apr (pp.16-19).
- Kelly, A. and Harris, M.J. (1993)"Uses and Limits of Total Productive Maintenance". Professional Engineering, Vol. 6, Issue 1, Jan (pp.9-11).

- Larson, P.D.(1992) "Business Logistics and the Quality Loss Function". Journal of Business Logistics, Vol. 13, Issue No. 1 (pp.125-147).
- Malin, J.L. and Bunton, I.(1993) "HP Maintenance Management; a New Approach to Software Customer Solutions". Hewlett-Packard Journal, Jan (pp.9-11).
- Oakley, B.T.(1993)"Total Quality Product Design". Total Quality Environmental Management, No. 2/3, Spring (pp.309-321).
- Olorunniwo, F.O (1992) "Life-Cycle Cost Policy when Equipment Maintenance is Imperfect". International Journal of Quality and Reliability Management, Vol.9, Issue No. 6 (pp.52-71).
- Renner, D.C. (1993) "Establishing a Maintenance Program". Water Engineering and Management, Vol. 140, Issue no. 2, Feb. (pp.26-27).
- Richard, L.(1991) "Figuring the Relative Cost of Pumps". Chemical Engineering, Vol. 98, Issue No. 8. Aug. (pp.129-136).
- Sethi, A.K. and Sethi, S.P.(1990)"Flexibility in Manufacturing: a Survey". The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2 (pp. 289-328).
- Shifrin, C.A. (1990)"New Rediffusion Simulator to Reduce Production Time, Customer Costs". Aviation Week and Space Technology, Vol. 132, Issue No. 9. Feb (pp.68-69).
- Tauner, P.J. and Penman, J.(1987) Condition Monitoring of Electrical Machines, Research Studies Press Ltd., England.



# OTIMIZAÇÃO DA PERIODICIDADE DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

*Iony Patriota de Siqueira  
Adiel Teixeira de Almeida*

## 1.0. Introdução

O recente processo de globalização da economia redefiniu os objetivos empresariais em muitos empreendimentos industriais. Além de remunerar o capital investido, muitas organizações devem também atender a estritos critérios de segurança, respeito e preservação do meio-ambiente. Cabe à manutenção a responsabilidade de preservar estes critérios, nas instalações existentes, e exigí-los nas instalações futuras. Entre as metodologias contemporâneas de manutenção, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) destaca-se por priorizar estes aspectos nos critérios de planejamento. Simultaneamente, exige-se que também seja uma atividade economicamente atrativa.

Para alcançar estes objetivos, sob a ótica da manutenção, este capítulo revisa, na seção 2, a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade, propondo, na seção 3, Modelagem, um modelo estatístico probabilístico, adequado aos estudos de otimização da periodicidade das atividades propostas e seus impactos nos resultados empresariais. Os modelos são simples, mas genéricos, de forma a representar diferentes famílias de equipamentos e políticas de manutenção.

Na seção 4, Análise, será mostrado como o modelo pode ser simulado para avaliar a disponibilidade e o desempenho dos equipamentos em estado transitório e permanente. Uma série de parâmetros característicos de cada população de equipamentos será definida e avaliada no modelo.

Finalmente, na seção 5, Otimização, um conjunto de indicadores de qualidade e produtividade será definido e correlacionado com indicadores industriais. Cada indicador poderá ser utilizado como função objetiva em um modelo de otimização matemática padronizado, como suporte à decisão no planejamento da manutenção. O Apêndice relaciona a simbologia utilizada no capítulo.

## **2.0. Manutenção Centrada na Confiabilidade**

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) constitui-se em uma metodologia de identificação de necessidades de manutenção em processos físicos ou industriais. Originária da indústria aeronáutica na década de 70, a MCC, após adoção pela indústria bélica americana, estendeu-se às áreas nuclear e de energia, atingindo hoje praticamente todos os setores da indústria moderna. Além de recomendar atividades preventivas, a MCC define um modelo consistente para determinar a periodicidade destas atividades. O processo utilizado consiste na pesquisa de respostas a um conjunto estruturado de questões que identificam, seqüencialmente, os seguintes aspectos do equipamento:

**Funções principais** – o que o usuário espera do equipamento;

**Falhas funcionais** – impossibilidade de executar a função;

**Modos de falhas** – eventos que causam falhas funcionais;

**Efeitos das falhas** – o que decorre dos modos de falha;

**Conseqüências das falhas** – como os efeitos afetam o meio ambiente, a segurança, a operação e a economia do processo.

Com base nas conseqüências das falhas, a metodologia propõe, através de uma lógica estruturada, as tarefas mais aplicáveis e efetivas para combater cada modo de falha, entre as seguintes opções:

**Serviço Operacional** – suprimento de consumíveis e lubrificantes;

**Inspeção Preditiva** – inspeções para detectar falhas potenciais;

**Inspeção Funcional** – ensaios para localização de falhas ocultas;

**Restauração Preventiva** - recuperação antes do final de vida útil;

**Substituição Preventiva** – substituição antes do final de vida útil;

**Reparo** – recuperação ou substituição após a falha.

Na impossibilidade técnica-econômica de uma ou mais destas atividades, a MCC recomenda operar até que a falha ocorra e reparar, ou, em casos de ameaça à segurança ou ao meio-ambiente, realizar uma revisão do projeto.

### **3.0. Modejagem**

Os conceitos de falha potencial e falha funcional dominam a metodologia MCC. O primeiro, como evento detectável de início da degradação funcional, corresponde aproximadamente ao conceito de defeito adotado pela ABNT [10] (“falha simultaneamente gradual e parcial, podendo ao longo do tempo tornar-se completa”), enquanto o segundo corresponde ao conceito de falha (“termino da capacidade de um item desempenhar a função requerida”). Além destas condições, o equipamento pode se encontrar em manutenção preventiva ou corretiva, segundo a

classificação da MCC. Desta forma, pode-se conceituar, a priori, os seguintes estados mais prováveis de um equipamento:

- 1) **Normal** - apto a exercer sua função, sem restrições;
- 2) **Preventivo** - em manutenção preventiva (inspeção ou ensaio);
- 3) **Falha** – indisponível, após uma falha funcional;
- 4) **Defeito** - disponível, mas com falha potencial;
- 5) **Corretivo** – em manutenção corretiva, após uma falha potencial.

Ressalte-se que os estados Preventivo e Corretivo poderão ocorrer mesmo com o equipamento em operação, quando a manutenção for realizada sem desligamento. O quarto estado representa um nível de degradação da performance do equipamento ou aumento da probabilidade de falha permanente, mas ainda insuficiente para provocar uma indisponibilidade forçada. Outros estados estatisticamente menos prováveis poderiam ser incluídos, aumentando a partição e a complexidade do modelo.

Para completar o modelo, resta identificar as possíveis transições entre estados, e os eventos correspondentes, associando-os às atividades de manutenção. Dependendo da extensão e localização, defeitos internos aumentarão inicialmente a vulnerabilidade do equipamento, antes de evoluir para uma falha funcional. A vulnerabilidade será modelada por uma transição do estado Normal para Defeito, no qual a probabilidade de evolução para uma Falha é maior. Neste estado, apenas uma manutenção preventiva poderá corrigir a falha potencial, antes que ela evolua para uma falha funcional. Assim, pode-se listar, a priori, os seguintes eventos que mudam o estado do equipamento:

**Preventiva:** inspeção ou manutenção programada;

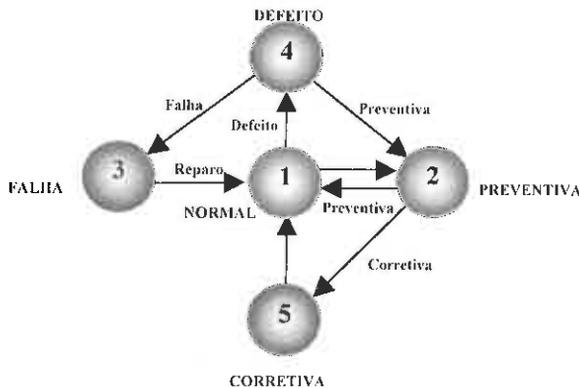
**Corretiva:** manutenção programada para corrigir falha potencial;

**Reparo:** manutenção forçada para corrigir falha funcional;

**Defeito:** degradação parcial do funcionamento;

**Falha:** interrupção forçada do funcionamento.

Estes eventos disparam as transições entre os estados do modelo, conforme ilustrado na figura 1.



**Figura 1 – Modelo de Estados**

Até agora o modelo foi estabelecido de forma geral, q' independente da natureza dos modos de falha e das atividades de manutenção. Para cada tipo de equipamento, as atividades preventivas e corretivas normalmente são determinadas, segundo a adequacidade e efetividade de combate ao modo de falha, pela MCC, entre as cinco variedades listadas no parágrafo anterior. Na Inspeção Preditiva, o estado de manutenção Preventiva corresponde à realização da inspeção, enquanto o estado de Defeito representa a

presença de uma falha potencial. Na Inspeção Funcional, o estado de manutenção Preventiva corresponde à realização da inspeção, enquanto o estado de Defeito representa a presença de uma falha oculta. Na Restauração e Substituição Preventivas, o estado de Defeito simboliza o nível de desgaste do equipamento.

Estabelecido o modelo, pode-se utilizar as equações clássicas de Chapman-Kolmogorov [2,8], para quantificar as probabilidades de cada estado, com a numeração indicada:

$$\begin{aligned} [1] \quad dP_i/dt &= \sum_j (P_j \lambda_{ji}) - P_i \sum_j \lambda_{ij} && (i \neq j = 1 \dots 5) \\ [2] \quad F_{ij} &= P_i \lambda_{ij} = 1/T_{ij} && (i \neq j = 1 \dots 5) \\ [3] \quad F_i &= \sum_j F_{ji} && (i \neq j = 1 \dots 5) \\ [4] \quad T_i &= P_i/F_i = 1/\sum_j \lambda_{ij} && (i \neq j = 1 \dots 5) \\ [5] \quad \sum_i P_i &= 1 && (i = 1 \dots 5) \end{aligned}$$

onde  $P_i$  = probabilidade do estado  $i$ ;  
 $F_i$  = frequência de ocorrência do estado  $i$ ;  
 $T_i$  = tempo de permanência no estado  $i$ ;  
 $F_{ij}$  = frequência de transição de  $i$  para  $j$ ;  
 $T_{ij}$  = período de transição de  $i$  para  $j$ ; e  
 $\lambda_{ij}$  = taxa de transição entre os estados  $i$  e  $j$ .

No restante deste capítulo, para os modos de falha com mecanismo de desgaste determinado pelo uso do equipamento (tal como quilômetros rodados, ciclos operacionais, etc.), a unidade de tempo será substituída pelo correspondente parâmetro de uso e unidade de medida associada. O modelo permanece invariante para

estas substituições. As equações são parametrizadas pelas taxas de transição entre os estados ( $\lambda_{ij}$ ), as quais modelam tanto os mecanismos de falha e defeito, como as frequências de manutenção adotadas. Para os primeiros, diversos modelos estatísticos podem ser adotados, de acordo com o modo de falha. O modelo mais simples, que exige apenas o conhecimento das taxas de falha e defeito, corresponde à distribuição exponencial negativa para o intervalo entre eventos. Além da simplicidade, esta distribuição aplica-se em especial quando se tem uma população razoável de espécimes, gerando eventos renováveis, de forma individual e independente, seguindo uma distribuição de Poisson.

A identificação dos parâmetros de cada população [2] é uma atividade complexa nos sistemas industriais, já que grande parte dos defeitos internos é invisível ou progressiva, não revelando os instantes exatos em que ocorrem. Em consequência, as taxas de falha funcional ( $\lambda_f = \lambda_{43}$ ), e falha potencial ( $\lambda_d = \lambda_{14}$ ), principais parâmetros do processo, normalmente terão que ser deduzidas de outras variáveis observáveis, utilizando o modelo. As variáveis observáveis são ocorrências e durações de eventos visíveis, tais como as frequências de indisponibilidade forçada ( $F_f = F_{43}$ ), os tempos médios de manutenção preventiva ( $MTTM = T_2$ ), reparo ( $MTTR = T_3$ ) e manutenção corretiva ( $MTTC = T_5$ ), e as frequências de manutenção preventiva ( $F_m = 1/T_{21}$ ) e corretiva ( $F_c = 1/T_{42}$ ). Para um conjunto de equipamentos, estes parâmetros resultam da contribuição ponderada de cada exemplar, conforme sua quantidade no sistema, sendo obtidos por estatísticas e médias amostrais na população. A parametrização final pode ser obtida medindo ou estimando os dados observáveis no histórico de cada equipamento, em uma janela de tempo na qual foi mantida constante a frequência e política de manutenção, por um intervalo suficiente para resolver as equações [1] em estado permanente, ou seja:

$$[6] \quad \sum_j (P_j \cdot \lambda_{ij}) - P_i \cdot \sum_j \lambda_{ij} = 0 \quad (i \neq j = 1 \dots 5)$$

Medindo-se as estatísticas ( $F_f$ ,  $F_m$ ,  $F_c$ ,  $MTTM$ ,  $MTTR$  e  $MTTC$ ), do histórico da manutenção, é possível obter uma solução analítica destas equações, e obter todas as taxas de transição, entre elas a taxa de falha funcional ( $\lambda_f = \lambda_{f3}$ ) e potencial ( $\lambda_d = \lambda_{1d}$ ), para cada modo de falha, conforme detalhado na referência [2]:

$$[7] \quad \lambda_f = F_f F_i / F_c = 1 / MTTF$$

$$[8] \quad \lambda_d = F_i (F_c + F_f) / (F_i - F_i^2 T_i - F_i F_i T_r - F_c - F_i F_c T_c) = 1 / MTTD$$

Estes são dados característicos de cada equipamento e ambiente operacional, e específicos para cada modo de falha. O tempo médio para defeito ( $MTTD$ ) estima o período de funcionamento do equipamento, sem manutenção preventiva, até a contaminação gradual por um defeito latente, que poderá resultar numa indisponibilidade forçada. O tempo médio para falha ( $MTTF$ ), define o intervalo entre a contaminação e sua evolução para uma indisponibilidade; corresponde ao período de incubação do defeito, antes de se transformar em falha.

#### **4.0. Análise**

Na análise do modelo acima, interessa ao gestor o comportamento permanente e transitório do sistema, para diferentes políticas de manutenção. No longo termo, mantendo constante a política de manutenção, as probabilidades tenderão a valores limites, obtidos da equação [6]. Desprezando-se os tempos médios de manutenção ( $MTTM$ ,  $MTTC$  e  $MTTR$ ), desprezíveis em relação aos demais tempos envolvidos, pode-se obter um gráfico universal (Figura 2), que relaciona a disponibilidade às frequências de falha e manutenção, ambas referidas à taxa de defeito do equipamento [2].

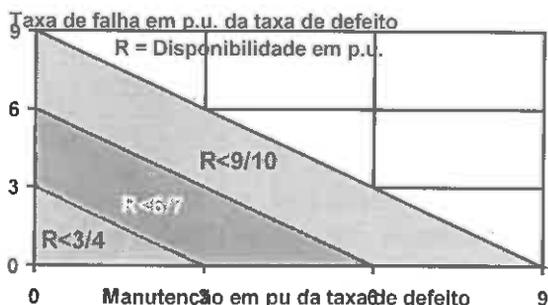


Figura 2 - Ábaco de Disponibilidade

Neste artigo, a disponibilidade será medida pela probabilidade, em estado permanente, do equipamento encontrar-se na condição normal ( $P_1$ ). Note-se que os eixos neste gráfico são adimensionais e, portanto, aplicáveis a qualquer equipamento. Sua construção segue uma regra simples: cada linha que liga os pontos  $n$  em ambos os eixos corresponde ao lócus de disponibilidade  $n/(n+1)$ . Decisores podem usar este gráfico para, através da frequência de manutenção, garantir níveis mínimos de disponibilidade. Desenha-se, inicialmente, a reta correspondente à disponibilidade desejada. Traça-se uma reta horizontal na altura correspondente à taxa de falha. No encontro desta reta com a linha de disponibilidade, obtém-se, no eixo horizontal, a frequência de manutenção necessária, em p.u. da taxa de defeito.

O comportamento transitório também pode ser estudado resolvendo as equações diferenciais [1], a partir de uma condição inicial. Admitindo que o equipamento esteja no estado Normal, logo após uma manutenção, as probabilidades de estado serão, inicialmente:

$$[9] \quad P_1=1 \text{ e } P_2=P_3=P_4=P_5=0 \quad (t=0)$$

A figura a seguir registra a evolução temporal típica das probabilidades dos estados Normal e Defeito, sem manutenção ( $P_1^o, P_4^o$ ) e com manutenção ( $P_1, P_4$ ), modeladas com estas equações em um simulador simbólico.

É importante diferenciar estas variações dos transitórios reais nos equipamentos. As probabilidades representam transições no nível de informação sobre o estado do sistema, e não transitórios físicos. Em modelos populacionais, representam também as frações esperadas dos equipamentos em cada estado.

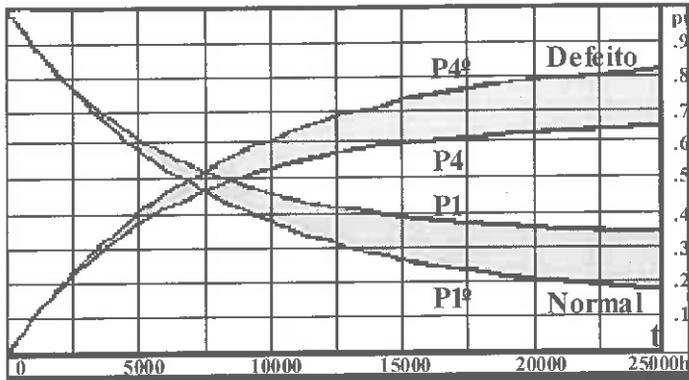


Figura 3 - Disponibilidade em Estado Transitório

Estas curvas são úteis no gerenciamento de curto prazo da manutenção. Através delas é possível estimar os riscos incrementais de falhas, resultantes de atrasos na execução de manutenções ou após uma mudança de periodicidade (5). As mesmas curvas permitem estimar as probabilidades de encontrar o equipamento com defeito na execução da manutenção.

## 5.0. Otimização da Manutenção

Otimizar a manutenção consiste em se determinar valores de periodicidade ( $T_{21}$ ) e outros parâmetros, tais como os Tempos Médio de Manutenção ( $MTTM, MITC$ ) e Reparo ( $MTTR$ ), que maximizam ou minimizam uma função objetiva. Além disso, as variáveis controladas ou de controle devem obedecer a restrições, tais como viabilidades físicas, disponibilidades de recursos ou requisitos de segurança. Sendo os valores de  $MTTM$ ,  $MITC$  e  $MTTR$  limitados pelas tecnologias disponíveis, e supondo que já sejam mínimos para a empresa, a otimização se dará principalmente através da periodicidade da manutenção. A função objetiva deverá refletir o resultado final perseguido, tais como o nível de risco e segurança do processo, ou a qualidade do serviço prestado.

A qualidade de um processo estocástico pode ser avaliada por um indicador escalar que calcule o benefício/desperdício das transições de estado do sistema. Cada transição pode ser ponderada por um coeficiente de retorno ( $K_{ij}$ ) que traduza o ganho/perda do processo na passagem do estado  $i$  ao  $j$ . Analogamente, cada instante de permanência no estado  $i$  pode ser ponderado por um coeficiente ( $K_i$ ). O retorno médio total, por unidade de tempo, será obtido acumulando os ganhos, em estado permanente, de todas as transições e permanências:

$$[10] \quad I = \sum_{ij} K_{ij} \cdot F_{ij} + \sum_i K_i \cdot T_i \quad (i \neq j = 1 \dots 5) \quad (t > 0)$$

Pelas razões já descritas, o modelo considera constantes os tempos médios de manutenção e reparo, ditados pela tecnologia disponível. Justifica-se então o expurgo da segunda parcela acima, se o interesse for otimizar a parcela variável do índice atribuída à manutenção. Os indicadores estudados não ponderam também as transições por falhas potenciais ( $F_{14}$ ), já que seus efeitos se manifestam posteriormente, em falhas funcionais ( $F_{43}$ ). Pela

mesma razão, não são ponderadas as transições para os estados Preventivo e Falho, ( $F_{42}$ ,  $F_{43}$  e  $F_{12}$ ), no início de uma falha funcional ou intervenção preventiva; os retornos serão avaliados no final da manutenção ( $F_{21}$ ) ou reparo ( $F_{31}$ ). Assim, o indicador pode ser simplificado para:

$$[11] \quad I = K_{21}F_{21} + K_{31}F_{31} + K_{51}F_{51}$$

A generalidade desta expressão permite aplicá-la a muitos indicadores utilizados na indústria. Neste informe, os seguintes índices são exemplificados, com os coeficientes listados na Tabela 2 e no Apêndice.

- FIE*    Frequência de indisponibilidade do equipamento;
- DIE*    Duração da indisponibilidade do equipamento;
- FPP*    Frequência média de perda de produção;
- PPP*    Probabilidade de perda de produção;
- DNS*    Demanda média não suprida;
- PNS*    Produção média não suprida;
- FEI*    Frequência equivalente de interrupção da produção;
- DEI*    Duração equivalente de interrupção da produção;
- IDP*    Índice de descontinuidade de produção;
- CVE*    Custo variável empresarial;
- CVC*    Custo variável do cliente.

Tabela 1 – Taxas de Retorno

INDICE	PREVENTIVA ( $K_{2I}$ )	REPARO ( $K_{3I}$ )	CORRETIVA ( $K_{5I}$ )
<i>FIE</i>	$I + K_a$	$I + K_a$	$I + K_a$
<i>DIE</i>	$K_a \cdot T_a + K_r \cdot T_p$	$K_a \cdot T_a + K_r \cdot T_e$	$K_a \cdot T_a + K_r \cdot T_c$
<i>FPP</i>	$K_p + K_a \cdot K_e$	$K_e + K_a \cdot K_e$	$K_p + K_a \cdot K_e$
<i>PPP</i>	$K_p \cdot T_p + K_a \cdot K_e \cdot T_a$	$K_e \cdot T_e + K_a \cdot K_e \cdot T_e$	$K_p \cdot T_c + K_a \cdot K_e \cdot T_a$
<i>DNS</i>	$W_p + K_a \cdot W_a$	$W_e + K_a \cdot W_a$	$W_c + K_a \cdot W_a$
<i>PNS</i>	$(W_p + K_a \cdot W_a)T$	$(W_e + K_a \cdot W_a)T$	$(W_c + K_a \cdot W_a)T$
<i>FEI</i>	$(Q_p + K_a \cdot Q_a)/Q_s$	$(Q_e + K_a \cdot Q_a)/Q_s$	$(Q_c + K_a \cdot Q_a)/Q_s$
<i>DEI</i>	$(W_p + K_a \cdot W_a)T/Q_s$	$(W_e + K_a \cdot W_a)T/Q_s$	$(W_c + K_a \cdot W_a)T/Q_s$
<i>IDP</i>	$(W_p + K_a \cdot W_a)/Q_s$	$(W_e + K_a \cdot W_a)/Q_s$	$(W_c + K_a \cdot W_a)/Q_s$
<i>CVE</i>	$C_i + K_a \cdot C_a$	$C_e + K_a \cdot C_a$	$C_c + K_a \cdot C_a$
<i>CVC</i>	$C_{is} + K_a \cdot C_{as}$	$C_{es} + K_a \cdot C_{as}$	$C_{cs} + K_a \cdot C_{as}$

Cada indicador representa a contribuição da classe do equipamento nos índices de mesmo nome avaliados na empresa, onde apenas os eventos de manutenção são incluídos. Cada célula na tabela representa a contribuição da transição correspondente no indicador.

Segue-se uma definição sucinta de cada indicador:

- (a) O índice *FIE* avalia a continuidade através da frequência de indisponibilidade do equipamento, em um período, por culpa exclusiva da manutenção e do modo de falha modelado. Inclui-se neste índice as indisponibilidades acidentais durante as manutenções, calculadas supondo que sejam proporcionais às intervenções. O coeficiente de proporcionalidade ( $K_a$ ), será específico para cada equipe e população de equipamentos, e estimado por regressão linear nas séries históricas de indisponibilidades.

- (b) A indisponibilidade do equipamento (*DIE*), é definida pela fração de tempo ou probabilidade dele encontrar-se indisponível, em um instante qualquer;
- (c) A frequência de perda de produção (*FPP*) mede o número de vezes que a linha de produção deixa de suprir uma fração da demanda de produtos, por culpa do equipamento. A perda de produção é função da topologia da linha de produção.
- (d) A demanda e produção média não suprida (*DNS*, *PNS*) estimam os pedidos de produtos não atendidos, continuamente, por causa do equipamento. As perdas em cada indisponibilidade são ponderadas pela frequência correspondente.
- (e) A probabilidade de perda de produção (*PPP*) traduz a fração de tempo em que os clientes deixam de ser atendidos plenamente, por culpa do equipamento. Representa uma fração do índice de mesmo nome utilizado no planejamento da capacidade de produção. Dois índices derivados, a expectativa e duração da perda de produção ( $XPP=DNS/PPP$ ,  $XDP=PPP/FPP$ ), estimam a demanda e período da demanda não atendida em cada indisponibilidade originada no equipamento.
- (f) A frequência e duração equivalentes de interrupção (*FEI*, *DEI*) expressam o número e tempo equivalentes de cortes da produção máxima (ou média) em um período, por culpa do equipamento. A relação  $TEI=DEI/FEI$  define o tempo equivalente de restabelecimento da produção, em interrupções originadas no equipamento.
- (g) Os índices de descontinuidade (*IDP*) e continuidade (*ICP*) de produção são complementares, e medem a fração entre a produção requerida (*PRQ*) e não suprida, atribuída ao equipamento ( $PNS/PRQ$ ).
- (h) Finalmente, os custos variáveis, empresarial e dos clientes (*CVE*, *CVC*), avaliam as variações nos encargos diretos, para a

empresa e clientes, imputados ao equipamento. Os custos fixos não variam com a periodicidade da manutenção, podendo ser ignorados caso o interesse resida na comparação de alternativas econômicas. Entre os custos fixos citam-se os encargos administrativos e dispêndios com ativos imobilizados, considerados imutáveis pela ação da manutenção. Também são fixos os custos de material de reposição, pois as taxas de falha e defeito constantes no modelo com distribuição exponencial geram uma demanda fixa de ressuprimento, quando avaliada em longo prazo. Os coeficientes da Tabela 1 agregam custos unitários com pessoal, transporte e produção interrompida, pelos métodos de custeio-padrão, para cada evento gerador de despesa [2].

A frequência de manutenção ideal, que otimiza qualquer um dos indicadores acima como função objetiva, pode ser obtida expandindo as frequências  $F_{2l}$ ,  $F_{3l}$  e  $F_{5l}$ , na expressão (11), a partir das equações do modelo, em estado permanente. Isto permite montar o seguinte sistema de programação não-linear, em forma canônica [2]:

Minimizar a função objetiva:

$$[12] \quad I = AF_t + [D(B-F)/(C+F)] + [E(B-F)F/(C+F)]$$

sujeito à restrição:

$$[13] \quad (1/MTTM) \leq F_t \leq 0$$

onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$  são parâmetros positivos:

$$[14] \quad A = K_{2l}$$

$$[15] \quad B = 1/MTTM$$

$$[16] \quad C = \lambda_d + MTTR \cdot \lambda_d \lambda_f + \lambda_f / (1 + \lambda_d MTTC)$$

$$[17] \quad D = K_{31} MTTR \lambda_d \lambda_f (1 + \lambda_d MTTC)$$

$$[18] \quad E = K_{51} MTTM \lambda_d (1 + \lambda_d MTTC)$$

Nas expressões anteriores, os valores de  $\lambda_d$  e  $\lambda_f$  são funções, respectivamente, das tecnologias utilizadas no equipamento e no ambiente de produção. Os valores de  $MTTM$ ,  $MTTC$  e  $MTTR$  são indicadores da manutenibilidade, e decorrem das tecnologias de manutenção e reparo disponíveis. O único parâmetro controlável será a frequência de manutenção, a qual poderá ser nula, caso a manutenção se limite a ações de reparo, ou ser diferente de zero, caso se adote a Inspeção Preditiva, Inspeção Funcional, a Restauração ou Substituição Preventivas da MCC. O limite inferior e superior para  $F_t$  ( $(1/MTTM) \leq F_t \leq 0$ ), referem-se à viabilidade física, já que a frequência de manutenção não pode ser negativa nem superior ao inverso do tempo médio de manutenção. Na realidade, existe um outro limite superior para  $F_t$ , ditado pela disponibilidade de recursos humanos e logísticos da empresa, e por restrições de interrupções na linha de produção:

$$[19] \quad F_t \leq F_{max}$$

Este limite, na prática, revela-se difícil de se estabelecer a priori, já que depende de uma avaliação de custo/benefício, e da sensibilidade, às vezes subjetiva e temporal, dos decisores. A figura a seguir ilustra a forma típica destas expressões, em função destes parâmetros, e da frequência de manutenção.

Note-se que a região positiva da curva do indicador I é composta de duas parcelas. A primeira,  $(A.F_t)$ , cresce com o

aumento da frequência de manutenção, ponderando o ônus da atividade no objetivo desejado. Já a segunda,  $[D(B-F_i)/(C+F_i)] + [E(B-F_i)F_i/(C+F_i)]$  decresce com a frequência de manutenção, ponderando os benefícios obtidos. Esta composição é encontrada tipicamente em problemas de otimização, gerando um valor ótimo no ponto de equilíbrio das parcelas. A figura evidencia também a forma como os três parâmetros controlados pelo decisor ( $MTTR$ ,  $MTTM$  e  $F_i$ ) afetam o indicador de qualidade. Quanto maior  $MTTR$ , maior o valor de  $D$ , e a frequência que minimiza o indicador. O mesmo se aplica a  $MTTM$  e o parâmetro  $B$ .

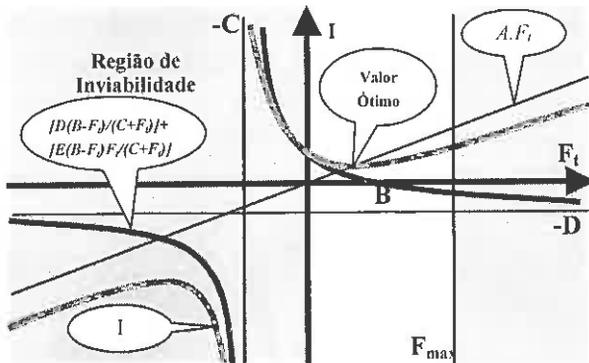


Figura 4 – Indicadores de Qualidade

Utilizando os métodos clássicos de solução destes sistemas, tem-se que a frequência ótima de manutenção será dada por uma das raízes reais não negativas da equação diferencial:

$$[20] \quad d(I)/dF_i = 0$$

Pode-se verificar, por substituição, que esta é uma equação quadrática, admitindo duas raízes reais [2]. Em função dos

parâmetros generalizados  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , obtém-se a frequência ótima de manutenção da raiz:

$$[21] \quad F_{to} = \{C^2 - [AC^2 - D(B+C) + EBC] / (A-E)\}^{1/2} - C$$

A outra raiz da equação (20) será desprezada por ser negativa, o que contradiz a restrição (19). Note-se que, dependendo dos parâmetros generalizados  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$ , mesmo a expressão (21) pode ser negativa. Neste caso, a frequência de manutenção que otimiza a função objetiva será nula, no limiar da região de viabilidade. Ou seja, nestes casos não é aconselhável realizar manutenção preventiva no equipamento, apenas intervenções corretivas.

Se, além da indisponibilidade do equipamento, houver interesse na minimização de outros indicadores, a otimização será complexa, resultando em um problema de decisão com múltiplos critérios (*MCDM*). O mesmo modelo poderá ser usado para calcular o valor ótimo para cada indicador. Uma solução de compromisso terá que ser negociada entre a disponibilidade do equipamento e o desempenho do sistema de produção.

## **6.0. Conclusões**

Este capítulo apresentou um modelo estatístico de defeitos e falhas em equipamentos, e uma metodologia de otimização da manutenção, baseada na Manutenção Centrada na Confiabilidade. As generalidades do modelo e da solução propostas permitem sua aplicação a praticamente qualquer tipo de equipamento e atividade industrial. Sua implantação em um sistema de transmissão de energia foi testada e acompanhada por seminários onde os gerentes de manutenção analisaram os resultados descritos e outras simulações de interesse, como suporte do processo decisório.

A disponibilidade de um modelo permite obter-se ganhos adicionais na gestão da manutenção. Na modelagem regional, por exemplo, além das condições ambientais, pode-se comparar (a) o desempenho das equipes de manutenção, pelos tempos de manutenção corretiva, reparo e taxas de acidentalidade; (b) a eficiência operacional, através dos tempos de retomada da produção; (c) as deficiências da rede, pelas perdas de produção; e (d) os custos marginais da manutenção e lucros cessantes. O desempenho de famílias de equipamentos pode ser analisado na modelagem por classe de equipamento, comparando os indicadores com padrões de eficiência estabelecidos no setor industrial. A estrutura uniforme do modelo, independente da classe do equipamento modelado ou modo de falha, facilita o intercâmbio de experiências entre equipes, e a adoção de políticas uniformes pela empresa.

## **Apêndice**

Este apêndice relaciona os símbolos e dados usados na Tabela 2, e não definidos no texto. Colhidos para cada equipamento da empresa e normalizados para um mesmo período, representam uma amostragem estratificada completa, do tipo proporcional. Na ausência de dados históricos, alguns itens podem ser estimados por especialistas. Dados topológicos podem ser gerados em estudos de contingência, simulando os fluxos de produtos na linha de produção, para determinar a produção interrompida em indisponibilidades forçada e programada de cada equipamento.

Com o período de observação  $T$ , preço unitário médio do produto e o custo do cliente por unidade de pedido não atendido, um sistema de informações pode ser construído para gerar os

seguintes parâmetros e médias estatísticas, em cada estrato, por modo de falha:

- $C_a$  custo médio de uma indisponibilidade acidental;
- $C_{as}$  custo médio de uma indisponibilidade acidental do cliente;
- $C_c$  custo médio de uma manutenção corretiva;
- $C_{cs}$  custo médio de uma manutenção corretiva para o cliente;
- $C_e$  custo médio de uma interrupção forçada;
- $C_{es}$  custo médio de uma interrupção forçada para o cliente;
- $C_l$  custo médio de uma manutenção preventiva;
- $C_{ls}$  custo médio de uma manutenção preventiva para o cliente;
- $F_e$  frequência de indisponibilidades forçadas;
- $K_a$  taxa de acidentalidade em manutenção;
- $K_e$  fração de equipamentos que afetam a produção forçados;
- $K_p$  fração equipamentos que afetam a produção na manutenção;
- $K_l$  fração do tempo programado com indisponibilidade;
- $Q_a$  fluxo de produção suspensa em um desligamento acidental;
- $Q_e$  fluxo de produção suspensa em um desligamento forçado;
- $Q_p$  fluxo de produção suspensa em indisponibilidade preventiva;
- $Q_c$  fluxo de produção suspensa em indisponibilidade corretiva;
- $Q_s$  fluxo de produção média suprida por equipamento;
- $T_a$  tempo médio de interrupção acidental na produção;
- $T_e$  tempo médio de interrupção forçada na produção;
- $T_p$  tempo médio de interrupção preventiva na produção;

$T_c$	tempo médio de interrupção corretiva na produção;
$W_a$	produção interrompida em um desligamento acidental
$W_e$	produção interrompida em um desligamento forçado;
$W_p$	produção interrompida em desligamento preventivo;
$W_c$	produção interrompida em desligamento corretivo;

## Referências Bibliográficas

- 1) SIQUEIRA, I.P., *Fiabilité des Appareillages de Protection et son Impact sur les Performances des Réseaux*, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, CIGRÉ, Paris, 1996.
- 2) SIQUEIRA, I.P., *Processos de Decisão Markovianos em Sistemas de Segurança e Proteção*, Tese de Mestrado em Engenharia de Produção, UFPE, Recife, 1999.
- 3) SIQUEIRA, I.P., *Impact of Protective Apparatus and Maintenance Scheduling on Power System Performance*, 4th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Rio de Janeiro, ELETROBRAS, 1994.
- 4) LYONNET, P., *Optimisation d'une Politique de Maintenance*, Technique & Documentation, Paris, 1993
- 5) SIQUEIRA, I.P., *Análise de Riscos de Adiamento de Manutenção em Sistemas Elétricos de Potência*, XVI Seminário Nacional de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CIGRÉ, SP, 2001.
- 6) SMITH, A.M., VASUDEVAN, R.V., MATTESON, T.D., GAERTNER, J.P. *Enhancing Plant Preventive Maintenance Via RCM*, IEEE 1986 Annual Reliability and Maintainability Symposium, Las Vegas, Nevada, USA, 1986

- 7) Moubray, J., *Reliability-Centered Maintenance*, Butterworth-Heinemann, London, 1994.
- 8) NORRIS, J.R., “*Markov Chains*”, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- 9) ABNT, NBR5462, *Confiabilidade-Terminologia*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 1981.

# MANUTENÇÃO DE SOFTWARE

*Ana Paula Cabral Seixas Costa  
Fernando Menezes Campello de Souza*

## 1. Introdução

Uma vez um *software* em operação, atendendo as necessidades dos seus usuários, se faz necessário gerenciar o produto de *software*, ou seja, manter os fatores de qualidade especificados para o mesmo, ao longo de sua vida útil. Considerando que 70% dos recursos de desenvolvimento são alocados à manutenção (corretiva ou pequenas melhorias) o planejamento das manutenções torna-se algo crítico. O fato é que a maioria das solicitações de manutenção acontecem de forma inesperada, o que requer um monitoramento constante. Além da preocupação com a qualidade, a questão da liberação de recursos humanos também deve ser tratada, possibilitando não só obter maior capacidade de atendimento para a manutenção dos *software* em operação, mas também o desenvolvimento de novos projetos.

É necessário, então, estruturar o processo definido como manutenção de *software* e estabelecer índices operacionais que permitam o gerenciamento efetivo do *software* em seu ciclo de vida útil. Para isto, a utilização de métodos quantitativos e um sistema de informação são fundamentais.

A aplicação de conceitos de probabilidade e inferência estatística nos permite criar modelos que explicitem as estruturas do processo de manutenção de um *software*. Identificar essas estruturas significa conhecer melhor o processo e o *software* e, também, fazer afirmações sobre possíveis comportamentos do mesmo. Contudo, isto só é possível se existirem dados a serem

analisados. Sem um sistema de informação que registre os dados sobre as manutenções adequadamente, nada pode ser feito.

Infelizmente, são raríssimas as organizações que se preocupam com esta questão. Não existe uma cultura de registro de informações sobre as ocorrências de falhas e necessidades de melhorias nos produtos de *software*, tampouco existe uma preocupação com alocação de homens/hora e custos envolvidos no processo de manutenção.

## 2. O Processo de Manutenção

Embora existam algumas semelhanças entre o desenvolvimento de *software* e a manufatura de *hardware*, Pressman (Pressman, 1995 ) explica que as duas atividades são fundamentalmente diferentes. Em ambas as atividades, a alta qualidade é obtida mediante um bom projeto, mas a fase de manufatura do *hardware* pode introduzir problemas de qualidade que inexistem (ou são facilmente corrigidos) para o *software*. Ambas as atividades dependem de pessoas, mas a relação entre as pessoas envolvidas e o trabalho executado é inteiramente diferente. Ambas as atividades exigem a construção de um *produto*, mas as abordagens são distintas.

Outro aspecto do uso que ilustra a diferença entre *hardware* e *software* é que, quando se desgasta, um componente de *hardware* é substituído por um peça de reposição. O mesmo não se verifica com relação ao *software*. Toda falha de *software* indica um erro no projeto ou no processo por meio do qual o projeto foi traduzido para um código executável por máquina. Portanto, a manutenção de *software* envolve consideravelmente mais complexidade do que a manutenção de *hardware*.

A atividade de manutenção de *software* diz respeito à correção de erros, adaptação do *software*, exigida pelo ambiente externo e por solicitação de ampliação por parte do cliente. Esta

atividade re replica os passos das fases de definição e desenvolvimento de um *software* mas no contexto do *software* existente.

Alguns conceitos são básicos para entender o processo de manutenção de *software* (Musa,1987):

- Programa - Um programa pode ser definido como um conjunto de instruções de máquina executados num computador e desempenhando uma função específica.
- Falha de software - É uma saída, resultado da execução de um programa, que representa uma discrepância no *software*, isto é, uma diferença entre a resposta atual e a resposta esperada do *software*. Assim a falha é algo dinâmico. O programa tem de ser executado para a falha ocorrer. O termo falha relaciona-se a um procedimento de um programa. Note que a falha não é algo como um *bug* ou, mais propriamente um defeito. Ela pode incluir coisas como deficiências de atributos de desempenho e tempo de resposta alto.
- Defeito de software - Em um conceito absoluto, o defeito pode ser considerado como uma entidade, que pode ser definida, independente de fazermos referência a falha. Numa visão operacional, o defeito é uma entidade que existe somente com referência a falha e nós podemos defini-lo como sendo a causa para um tipo particular de falha. Resumiremos defeito como um erro encontrado numa instrução ou conjunto de instruções que são a causa de um ou mais tipos de falhas. Pela definição não existem muitos defeitos causando uma falha. O conjunto todo de instruções defeituosas que estão causando a falha é considerado o defeito.
- Erro de Software - São os geradores dos defeitos e surgem por muitas razões, a maior parte delas pode ser classificada em uma destas quatro categorias:

- a.) *Comunicação* - Os erros de comunicação formam provavelmente o maior grupo, e aumentam a proporção que o tamanho do *software* a ser desenvolvido aumenta. Eles estão geralmente em um dos tipos:
- Entre cliente e analista, analista e programador
  - Entre analistas, programadores
- b) *Conhecimento* - Os erros de conhecimento ocorrem principalmente quando as pessoas envolvidas no projeto de desenvolvimento do *software* são inexperientes na área de aplicação, na metodologia de projeto e na linguagem de programação.
- c) *Análise incompleta*
- d) *Codificação*

## 2.1 - Tipos de Manutenção

Entre as classificações das manutenções apresentadas na literatura, podemos considerar a descrita a seguir (Musa, 1987):

Correção - A manutenção corretiva, envolve redução do conjunto de estados de entrada (*fail set*) que provocam a falha, para um defeito em algum instante no tempo. Um defeito é considerado removido, ou completamente reparado, quando o *fail set* é nulo. Quando o tamanho do *fail set* é transformado, mas não é reduzido a zero, diz-se ter sido feito um reparo parcial. A soma das probabilidades associadas com os estados de entrada do *fail set* para um defeito, representa a probabilidade de ocorrência da falha causada por este. A definição de falha, em termos de discrepância e tipos de módulos, permite perceber que diferentes defeitos podem causar, para diferentes tipos de módulos, a mesma discrepância. Existem dois processos de detecção de defeito durante o desenvolvimento e evolução de um *software*: direto e indireto.

Processo direto:

- a) Revisão de requisitos
- b) Revisão de projeto
- c) Revisão de código
- d) Uso de depuradores

O reparo de defeitos, encontrados através de detecção direta, previne a ocorrência de falhas potenciais.

Processo indireto: - Os defeitos são detectados indiretamente através de identificação de falhas. Falhas são detectadas pela execução do programa, em teste ou operação normal. Os sinais da falha sugerem as áreas de código a serem investigadas, na busca do defeito que a está causando.

Adaptação - Com o passar do tempo, o ambiente para o qual o *software* foi desenvolvido poderá mudar. A manutenção adaptativa objetiva modificar o *software* a fim de acomodá-lo às mudanças ocorridas no ambiente externo.

Melhoramento Funcional - O cliente, com a utilização do *software*, reconhecerá novas funções que o beneficiarão, ou, o especialista pode verificar a necessidade de otimização de um programa. A manutenção perfectiva estende o *software* para além de suas exigências funcionais originais. Dependendo da melhoria funcional, podemos ter até características de um projeto semelhantes ao desenvolvimento.

## **2.2 - Software Reparável e não Reparável**

No estudo do processo de manutenção, podemos classificar os *software* em dois grandes grupos: reparáveis e não - reparáveis.(Zerphongsekul,1994)

Exemplos de *software* reparável e não reparável são uma aplicação de compras na Internet, e um sistema de controle de tráfego aéreo controlado por computador, respectivamente.

No caso de uma aplicação na internet, a indisponibilidade, por consequência de um defeito, caracteriza um problema para o usuário que pode ser contornado por um procedimento alternativo. Já no caso do controle de tráfego aéreo a indisponibilidade poderia interferir no processo de controle, necessário na prevenção de um acidente por exemplo. O foco da discussão sobre o conceito de *software* reparável é o quanto é tolerável a interrupção do serviço fornecido pelo *software*.

A confiabilidade de *software* reparável é baseada no conceito de correção de erros ou reinicialização do *software*. No caso da correção de erro, a taxa de reparo é a taxa média, medida em correções por hora para um reparo completo. O tempo de reparo completo consiste no reconhecimento que existe um problema, diagnóstico do erro, teste e correção, e reinicialização do *software*. O tempo de reparo é obviamente uma variável aleatória, os modelos simples usam o tempo médio para reparo ou a taxa de reparo. Podemos perceber que uma vez removidos todos os erros de um programa, sua nova taxa de falhas decresce.

A reinicialização de um *software* para restaurar a operação constitui um reparo, o programa retorna a operação com sucesso. Conceitualmente, o processo é muito diferente da depuração para remover um erro, mas o resultado final, devolvendo o *software* a operação, é funcionalmente o mesmo. O tempo de reparo pode novamente ser representado num modelo simples como o tempo médio para a reinicialização do sistema. Neste caso como nenhum defeito foi removido a taxa de falha permanece a mesma.

O efeito do reparo sobre a confiabilidade de um *software* pode ser melhor ilustrado pelo seguinte exemplo: Vamos considerar dois computadores com programas redundantes e independentes. Vamos assumir que os sistemas são não reparáveis,

se ocorrer uma falha de *software* em um programa que leve o sistema a crash, o outro computador é ativado e o sistema continua em operação sem interrupção do serviço fornecido, até que o programa do segundo computador falhe devido a outro erro. Como supomos inicialmente que os dois programas, embora redundantes são independentes, a probabilidade que o serviço fornecido pelo sistema seja interrompido é pequena. Agora se considerarmos que o sistema é reparável, reduziremos a probabilidade de falha do sistema, de interrupção do serviço, porque o reparo do primeiro programa deverá ser completado antes do segundo programa falhar. A chance da operação ser interrompida diminui, porque para que isso aconteça, teriam que ocorrer agora três eventos simultaneamente: (1) falha do programa 1; (2) falha do programa 2 e (3) insucesso do reparo do programa 1 antes do programa 2 falhar.

Podemos concluir que a atividade de reparo diminui a probabilidade de falha do sistema, levando a um aumento da confiabilidade de *software*. Num caso em que não exista a redundância, temos apenas um único sistema, o sistema falhará assim que um erro for encontrado, e tanto melhor será o sistema quanto mais rapidamente pudermos repará-lo e devolvê-lo à operação.

Sempre que um sistema pode submeter-se a um reparo é importante usar a disponibilidade, bem como a confiabilidade de *software*, para medir o desempenho do sistema.

A disponibilidade de *software* é a probabilidade de que o programa esteja funcionando com sucesso, de acordo com suas especificações, até um dado instante. A diferença importante entre confiabilidade e disponibilidade é que a confiabilidade mede a probabilidade de não falhar, enquanto que a disponibilidade mede apenas a probabilidade do sistema estar em operação.

### 3. Qualidade de Software

Os sistemas computacionais estão cada vez mais presentes em muitas áreas de nossas vidas. Assim o aumento da importância do *software*, implica numa necessidade maior de precisão no cumprimento das especificações no processo de desenvolvimento e nos produtos de *software*. Medidas de *Software* são um ferramenta para medir a qualidade de um *software*.

A área de medição de *software* é uma das áreas da engenharia de *software*, também conhecida como métricas de *software*. Os termos medidas e métricas geram uma certa confusão. Na realidade elas são usadas como sinônimos. Assim a qualidade de *software* está diretamente relacionada com a medição de *software*.

Os investigadores das métricas de *software* dividem-se em dois campos: os que afirmam que o *software* pode ser medido e os que dizem que o *software* não pode ser analisado através de métricas. Estes sendo uma minoria. A maioria dos investigadores está consciente que a qualidade de *software* pode e precisa ser quantificada. (Aguinaldo, 1995)

A área de medição de *software*, trata de questões como o custo envolvido no desenvolvimento de um *software* e o custo da manutenção. É necessário para isto uma fundamentação teórica que suporte decisões gerenciais. Procedimentos científicos devem ser aplicados ao estudo de desenvolvimento de sistemas de *software* e a atividade de programação deve ser transformada realmente numa disciplina de engenharia. Isto significa o desenvolvimento de técnicas de medição e a determinação de relações de causa e efeito no processo e produto de *software*.

As métricas de *software* nos dizem, entre outras coisas, que é possível :

- Predizer os erros prováveis de um sistema usando medição de *software* na fase de projeto.
- Através do modelo do projeto de *software*, extrair características quantitativas que nos permitam prever o nível de manutenibilidade de um sistema, como a quantificação de características-chaves do código de um programa que nos permite prever o nível de dificuldade da execução de um teste e o provável número de erros residuais após sua execução.
- Predizer o tamanho de um projeto na fase de especificação.
- Que medida de *software* é necessária para determinar a qualidade de um projeto.

As métricas de *software* buscam quantificar características do *software* que afetam diretamente a qualidade ou fatores de qualidade.

A programação estruturada e a modularização de sistemas são aspectos importantes para o desenvolvimento de *software*. A maioria dos especialistas em *software* concorda que um aumento de confiabilidade é assegurado quando os sistemas são modularizados e os módulos são estruturados. Esta questão de modularização tem sido vastamente discutida na literatura. O que todos concordam é que estes fatores afetam o custo e a qualidade de um *software*.

Uma das mais fáceis métricas de *software* é o número de linhas por código. Baseado nesta métrica podemos ter uma medida de produtividade de programação, como por exemplo instruções objeto por homem/mês. O tamanho de um programa pode ser usado como um preditor, aliado a outras medidas, de características como facilidade de manutenção. O importante é entender que embora esta métrica seja simples, ela pode servir como base para outras métricas.

Uma outra característica diretamente relacionada com a qualidade é a complexidade de um *software*. Mas o que é complexidade ? é possível ter uma definição razoável ? é possível quantificá-la ? Infelizmente os trabalhos e o conhecimento nesta área ainda são poucos. Existem estudos baseados no conceito de probabilidade condicional, o que nos leva a comentar mais uma vez a necessidade de métodos científicos no desenvolvimento/gerenciamento dos sistemas computacionais.

Uma técnica muito usada é a Análise de Pontos de Função (Function Point Analysis - FPA). É uma medida de tamanho. A primeira publicação sobre FPA foi feita por Allan Albrecht da IBM em 1979, a técnica de FPA quantifica as funções contidas num *software* em termos do que é significativo para os usuários (Kitchnham, 1996). O ponto de função mede o tamanho do *software* pela quantificação de sua funcionalidade externa, baseada no projeto lógico ou a partir do modelo de dados. A contagem dos pontos de função propicia uma métrica de tamanho para apoiar análises de qualidade e produtividade, um fator de normalização para comparação entre *software*, entre outras coisas.

A medida ponto de função é usada baseada num conjunto de critérios, cada função do *software* é um índice classificado de acordo com seu tipo e complexidade. Estes índices são totalizados para dar uma medida inicial de tamanho que é então normalizada incorporando um número de fatores relativos ao *software* como um todo. O resultado final é um único número chamado ponto de função que mede o tamanho de um produto de *software*. De forma resumida, a técnica de ponto de função tem como objetivo fornecer uma medida comparativa que auxilie a evolução, o planejamento, o gerenciamento e o controle de produtos de *software*.

A medida ponto de função foi originalmente idealizada para ser usada em aplicações de Sistemas de Informação. Contudo Coper Jones e o International Function Point User's Group -

IFPUG, estenderam essa medida, possibilitando que a mesma seja usada em aplicações de engenharia de *software*. (Kitchnham,1996)

### 3.1. - Métricas

As métricas de *software* podem ser classificadas em relação aos diversos aspectos a que dizem respeito (Kitchnham,1996):

Métricas de Desempenho na fase de projeto quantificam características como:

- produtividade da metodologia
- produtividade das linguagem de programação
- nível do ambiente de programação

Métricas dos Padrões avaliam o ambiente de desenvolvimento atual, padrões e referências, preocupam-se em verificar:

- Tendência dos métodos de desenvolvimento
- Tendência das linguagens de programação
- Qualidade dos padrões

Métricas de Experiência das pessoas preocupam-se em quantificar:

- experiência de linguagem de programação
- experiência em metodologia de desenvolvimento
- experiência de gerenciamento

Métricas do nível de colaboração preocupam-se com aspectos como:

- experiência de trabalho em equipe
- disponibilidade pessoal

Métricas de produtividade avaliam :

- tamanho da produtividade
- estatística de produtividade
- qualidade x produtividade

As métricas podem ainda ser orientadas ao tamanho ou à função. As métricas orientadas ao tamanho são medidas diretas do

*software* e do processo de desenvolvimento. São simples como por exemplo quantidade de pessoas/mês necessárias para construção do *software*; quantidade de erros encontrados após a entrega ao usuário; custo do projeto; linhas de código; etc.

As métricas orientadas à função são medidas indiretas do *software* e do processo. Em vez de contar as linhas de código, a métrica concentra-se na funcionalidade ou utilidade do programa, pontos de função por exemplo.

### **3.2. - Fatores de Qualidade**

Como foi dito anteriormente as métricas de *software* buscam quantificar características do *software* que afetam diretamente fatores de qualidade. De acordo com a norma ISO/IEC-9126 seis são estes fatores:

#### **a) Funcionalidade**

A funcionalidade responde a pergunta chave: o *software* satisfaz as necessidades dos usuários ?

Neste fator estão envolvidos aspectos como conformidade, segurança de acesso, adequação, interoperabilidade (interação com sistemas especificados), de forma mais explícita o *software* só permite acesso aos dados de usuários autorizados e faz o que foi projetado para fazer de forma correta.

#### **b) Usabilidade**

A usabilidade diz respeito a interação com o usuário. Este fator verifica quanto o *software* é fácil de aprender e usar. Envolve aspectos apresentados na literatura como inteligibilidade (o *software* é fácil de entender), apreensibilidade (é fácil aprender a usar) e operacionalidade. Para o sucesso deste fator é imprescindível no desenvolvimento do *software*, um projeto de interface com o usuário.

c) *Eficiência*

A eficiência envolve aspectos que dizem respeito ao tempo e aos recursos: A velocidade de execução do *software*, o tempo de resposta, os recursos necessários para sua operação e o tempo de utilização dos mesmos.

d) *Portabilidade*

Este é um fator importante no caso de o *software* ser utilizado num ambiente novo, diferente do qual ele foi projetado. A portabilidade verifica se o *software* é fácil de adaptar e instalar em outros ambientes. O esforço exigido para transferir o *software* de um ambiente de *hardware* e/ou *software* para outro.

e) *Manutenibilidade*

Este fator diz respeito a uma das etapas do processo de desenvolvimento de *software*, a que envolve um custo alto. Por isso características como a facilidade de encontrar defeito quando a falha ocorre, de modificar e adaptar o *software* são fundamentais. Outro aspecto a ser considerado é a facilidade de testar o *software* após a realização das alterações e o risco de traumas que podem acontecer como consequência das mesmas, em outras palavras a estabilidade do *software*.

f) *Confiabilidade*

Medida que indica que um software satisfaz sua especificação e executa sua função, cumprindo os objetivos visados pelo cliente, com a precisão exigida. Este fator diz respeito a como as falhas se apresentam, com que frequência e ainda mais, como *software* reage ocorrendo falhas e se o mesmo é capaz de recuperar dados em caso de falhas.

#### 4. Confiabilidade de Software

Para modelar a confiabilidade de *software*, é preciso primeiro, considerar os principais fatores que a afetam:

- *Introdução de falhas* - Introdução de falhas depende primeiramente das características do código desenvolvido e das características do processo de desenvolvimento. A mais significativa característica do código é o tamanho. As características do processo de desenvolvimento incluem tecnologia de engenharia de informação e ferramentas usadas e o nível de experiência das pessoas envolvidas. Note que código pode ser desenvolvido para incluir novas funções ou ser alterado para remover defeitos.
- *Remoção de Falhas* - A remoção de defeito depende do tempo, perfil operacional e da qualidade da atividade de reparo.

Visto que alguns dos fatores são probabilísticos por natureza e operam sobre o tempo, modelos de confiabilidade de *software* são geralmente formulados em termos de processos estocásticos.

Os modelos são diferenciados uns dos outros em geral, pela distribuição de probabilidade do tempo de falha, ou número de ocorrência de falha e pela natureza da variação do processo aleatório no tempo.

Um modelo de confiabilidade de *software* específica de forma geral a dependência do processo de falha e os fatores que afetam a confiabilidade.

A forma específica do modelo é geralmente determinada pelo estabelecimento de parâmetros, através de dois possíveis procedimentos:

- 1) *Estimação* - procedimentos de Inferência Estatística são aplicados para as falhas registradas para um programa.
- 2) *Predição* - determinação das propriedades do *software* e do processo de desenvolvimento. (isto pode ser feito antes de qualquer execução do programa.)

Existe sempre alguma incerteza na determinação da confiabilidade. Esta é geralmente expressa em termos de intervalo de confiança para os parâmetros. Um intervalo de confiança representa uma faixa de valores dentro dos quais um parâmetro é esperado com uma certa confiança.

Um modelo de confiabilidade de *software*, tem a forma de um processo estocástico que descreve o procedimento de falhas no tempo. A especificação de um modelo genérico inclui especificação de valores tais como a função valor médio (esperança do número de falhas) ou intensidade de falha. Os parâmetros da função são dependentes da atividade de reparo e alteração de programas e propriedades do produto do *software* e do processo de desenvolvimento. Propriedades do produto incluem, como já foi dito, tamanho, complexidade e estrutura. Propriedade do processo de desenvolvimento incluem, entre outras, tecnologia de engenharia de *software* e ferramentas úteis, e nível de experiência das pessoas, como também já foi mostrado. O tempo envolvido na caracterização dos modelos é um tempo acumulado.

A maior parte dos modelos de confiabilidade de *software* supõem sempre que as falhas são independentes umas das outras. Isto é feito através da suposição que os tempos são independentes uns dos outros ou pelo processo de Poisson de incrementos independentes. Estas condições podem ser apresentadas para maioria das situações. Falhas são resultado de dois processos: a introdução de defeitos e a ativação delas através de estados de entrada.

Os modelos de confiabilidade de *software* devem abranger duas situações, a situação de programas que são entidades reparadas quando ocorrem falhas, e a situação de programas que não são. Não reparar, quer dizer *adiar o reparo*. Falhas são observadas, mas reparos sobre os defeitos não são incorporados até a próxima versão.

O fator principal que causa o aumento da confiabilidade com o tempo é a correção de defeitos que tenham causado falhas. Um fator complicador na caracterização do processo de falha é o tempo de correção dos defeitos.

Os modelos fornecem projeções através do tempo. Sem um modelo não é possível fazer inferências sobre a confiabilidade fora do período de tempo para o qual os dados foram coletados. Dados de falha são, na maioria das vezes, avaliados na forma de falha ou nº de falha em um dado intervalo de tempo. A forma de tempo de falha é a mais precisa e contém a maior parte das informações, ainda que algumas vezes, a diferença entre as duas formas seja pequena. Nós podemos perceber que além da descrição do processo de falha o termo *modelo de confiabilidade*, também conota um procedimento de inferência. (Musa, 1987)

## 5. Um Modelo de Sistema de Informação

O custo da manutenção de *software* tem aumentado muito nos últimos 20 anos. Durante a década de 1970, a manutenção era responsável por um índice entre 35% e 40% do orçamento de *software*. Esse valor passou para aproximadamente 60% durante a década de 1980 (Pressman, 1995). Para que seja feito algo que mude este quadro, precisamos avaliar a efetividade das técnicas de manutenção e sermos capazes de determinar quanto custa realmente a manutenção.

O custo de manutenção não significa apenas valores em reais, mas a oportunidade de alocar recursos num novo projeto que é adiada, a possibilidade de redução da confiabilidade do *software* como resultado de mudanças que introduzem erros.

Para gerenciamento não só da manutenção mas do produto de *software* de uma maneira geral, de forma adequada, é necessário estruturar o processo de manutenção e implantar um sistema de

informação que permita manter um histórico dos eventos envolvendo o mesmo.

O primeiro problema consiste em identificar que informações sobre o *software* e o processo de manutenção devem ser registradas gerando um histórico. A correta identificação destas informações permitirá uma avaliação das atividades de manutenção de *software*, proporcionando uma estrutura quantitativa, onde pode ser realizado um tratamento probabilístico, a partir do qual podem ser tomadas decisões sobre o esforço de manutenção, alocação de recursos, satisfação dos clientes/usuários e outras questões.

Vamos analisar com base no que discutimos até agora que informações são relevantes para suportar o gerenciamento do *software*.

Nós verificamos a importância dos fatores humanos no processo de desenvolvimento e manutenção de *software*, por tanto informações sobre o perfil da equipe que manterá o *software* é significativo. Técnicas e tecnologia para o desenvolvimento podem afetar os fatores de qualidade do produto, é importante então que se registre informações sobre o próprio *software*. Sendo o *software* reparável, é importante que se tenha informações sobre as falhas e sobre as falhas que são conseqüências de manutenções, para que seja possível verificar a eficiência das manutenções, dos procedimentos de testes e a estabilidade do *software*. E por fim é necessário registrar todos os dados que dizem respeito a atividade de manutenção propriamente dita: tempos, homem-hora e funções mantidas. Como nossa preocupação maior é a satisfação dos clientes/usuários informações sobre os mesmos e sobre possíveis indisponibilidades do *software* são muito importantes.

A seguir apresentamos um modelo da estrutura dos dados que foram identificados como necessários para gerar um histórico para gerenciamento do produto de *software*.(Costa, 1997)

Necessidade de Manutenção - Representa toda necessidade de manutenção no *software*, identificada pelo usuário ou pela equipe

de manutenção. Está sempre associada a um tipo de manutenção (manutenção corretiva, adaptativa ou melhoria). Gera uma manutenção de *software*. Deve conter informações do tipo:

- Quem verificou e quando foi verificada a necessidade de manutenção
- A gravidade da manutenção relacionada com a importância da função do *software* que será mantida. Esta informação incorpora uma visão do usuário e da própria funcionalidade do *software*. Deve ser estabelecida uma classificação dentro da organização.

Tipo de Manutenção - Caracteriza a manutenção de *software*. (a classificação da manutenção conforme descrito no item 2.1, ou outra descrita na literatura selecionada de acordo com as necessidades e características da organização.)

Manutenção de Software - Execução de uma manutenção que atende a uma necessidade registrada. A manutenção é gerada por uma necessidade e diz respeito a um *software* cadastrado. Deve conter informações sobre:

- Tempos de manutenção
- Tempo de indisponibilidade do *software* se for o caso.
- Homem hora efetivamente envolvido em todo o processo
- Esforço da manutenção
- Classificação da manutenção quanto ao tipo
- Se a manutenção é evidencialmente conseqüência de uma manutenção anterior, no caso das falhas classificar em primárias ou secundárias. (permite avaliar intensidade e custo de retrabalho, estabilidade de *software*)

- Identificação das funções (sistema, subsistema, módulo ou componentes do *software*) que sofreram manutenção.
- Descrição do problema a ser corrigido ou adaptação/melhoria a ser realizada

Software - Cadastro de todos os *software* e suas funções (sistema, subsistema, módulo ou componentes do *software*), sobre as quais serão realizadas as manutenções. Deve conter informações sobre:

- A linguagem em que a função foi desenvolvida
- Porte das funções. Para determinar o tamanho das funções deve ser usada alguma técnica de estimação como Pontos de Função por exemplo.
- A complexidade das funções. Deve ser estabelecido internamente a organização critérios de classificação para a complexidade das funções, levando em consideração aspectos como: quantidade de arquivos manipulados pelas funções, existência de algoritmos de cálculo, estruturação/desestruturação da função, etc.
- Crescimento anual - Pode ser estimado baseado na medida de tamanho do *software*, atualizada a cada manutenção.

Especialista - Cadastro (perfil e histórico) de todos os profissionais envolvidos com a manutenção de software.

## 5.1 - Indicadores

A definição e cálculo dos indicadores para acompanhar o desempenho de um software e do processo de mante-lo acontece em vários níveis. O nível operacional visa subsidiar o planejamento e a gestão do processo de manutenção. O nível tático diz respeito à gestão do ambiente em termos do impacto de introdução de novas ferramentas, mudanças no processo de manutenção, treinamento de pessoal, análise de tendências da produtividade e assim

sucessivamente. Já no nível estratégico devem possibilitar a realização de benchmarking, permitindo a comparação com outras empresas, melhorias contínuas e avaliação econômica do produto de software.

Uma dificuldade no processo de manutenção de *software* é a correta alocação dos recursos humanos, por causa da imprevisibilidade das solicitações de manutenção. Um índice poderia ser usado para orientar a alocação de recursos com base no crescimento anual do *software*. Para isto faremos uso da já conhecida metodologia de análise de pontos por função - FPA. O ponto de função mede o tamanho do *software*. A idéia é estimar a quantidade de recursos com base numa estimativa do esforço gasto anualmente para manter o *software* (Esforço/Número de meses do ano). O esforço é a relação entre a produtividade média das manutenções e o crescimento anual do *software*, tudo em pontos de função. A produtividade das manutenções é de difícil dimensionamento, uma forma é considerar as linhas que compõem a parte do *software* a ser corrigida e transforma-las em pontos de função e dividi-las por homem-hora. O crescimento anual do *software* é dado pela relação do incremento realizado no *software* em pontos de função e o tamanho anterior do *software* em pontos de função. (Kitchnham, 1996)

## 6. Conclusões

O registro de dados sobre as manutenções simplesmente não é suficiente. É preciso ter bem definido o que se deseja monitorar e controlar.

Um *software* precisa ser medido por muitas razões: indicar a qualidade do produto, avaliar custo de construção do produto, avaliar a produtividade das pessoas que constróem/mantém o produto, avaliar o benefício de novos métodos e ferramentas de *software*.

Empresas que fabricam, vendem, compram e mantêm *software* precisam medi-lo.

A ausência de informação torna difícil responder a questões como: O que é mais interessante economicamente para a organização, desenvolver o *software* internamente ou comprá-lo pronto ?

A aplicação de técnicas e estruturação de modelos e uma base histórica quantitativa são fundamentais para desenvolver *software* de qualidade, especificar e garantir qualidade no momento de comprar, estabelecer critérios para assegurar qualidade de serviço se a opção for terceirizar a manutenção. A medida em que a organização começar a aplicar medições e registrar as informações sobre seus resultados, não só na fase de operação do *software* (produto) mas também na fase de desenvolvimento (processo) , serão estabelecidas as condições necessárias para tomada de decisão.

## 7. Bibliografia

- Aguinaldo, A. F.,(1995) “Gerência de Software através de Métricas”, Editora Atlas S. A São Paulo 1995
- Costa, A. P. C. S., (1997), “Métodos quantitativos e um modelo de sistema de informação aplicados ao gerenciamento do produto de software”, Dissertação de Mestrado, UFPE.
- Grady, R. B., (1992), “Practical *software* metrics for project management and process improvement” ,. New Jersey:Pratice Hall, Engle Wood Cliffs.
- Grady, R. B.,(1987), “Measuring and Managing *Software* Maintenance”, IEEE *Software*, September 1987, pp35-45.
- Jensen, A. H., Vairan, K.,(1985), “Na Experimental Study of *Software* Metrics for Real-Time *Software*. IEEE Transactions on *Software* Engineering”, volume SE-11, N. 2, FEV 1985, pp231-234.

- Kitchnham, B., Pflieger, S. L.,(1996), “*Software Quality: The Elusive Target*”, IEEE *Software* January 1996
- Musa, J. D., Iannino, A., Okumoto, K.,(1987), “*Software Reliability: Measurement, Prediction, Application*”, McGRAW-HILL.
- Pressman, R. S., (1995), “*Engenharia de Software*”, MAKRON Books, São Paulo
- Tiana, J., Lu, P., Palma, J.,(1995), “*Test-Execution-Based Reliability Measurement and Modeling for Large Commercial Software*”, IEEE Transactions on *Software Engineering*, vol 21, n. 5, May 1995, pp 405-414
- Zerphongsekul, P., Xia, G., Kumar, S.(1994), “*Software Reliability Growth Model: Primary-Failures Generate Secondary-Faults Under Imperfect Debugging*, IEEE, Trans Reliability, vol 43, pp 408-413
- Zuse, H.,(1994), “*Foundations of Validation, Prediction, and Software Measures*”, Anual Oregon Workshop on *Software Metrics*, Silver Fall State Park, Oregon, 1994

# MONITORAMENTO: CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO EM UMA APLICAÇÃO DE TEMPO REAL.

*Hélio Burle de Menezes<sup>1</sup>*  
*Fernando Menezes Campello de Souza*

## **Resumo**

O trabalho trata da implantação da estratégia de monitoramento aos equipamentos de Controle de Processo da Cia. Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF. Estabelecendo a noção do que seja monitoramento, apresentam-se os requisitos básicos para adoção desta estratégia a um determinado parque de equipamentos. Determina-se, em seguida, a abrangência da aplicação discutida no trabalho, justificando sua implementação. Detalha-se, então, a concepção de um modelo matemático de monitoramento, concluindo com a apresentação dos resultados obtidos a partir da sua implementação e projetando as conseqüências na manutenção.

## **1. Introdução**

Dentre as possíveis estratégias de manutenção aplicáveis a um determinado parque instalado uma, freqüentemente lembrada, é o monitoramento permanente dos equipamentos. Esta tendência é esperada como uma conseqüência da ampla utilização da informática, que viabiliza a instalação de sistemas interligados por redes de computadores, onde é possível implementar-se rotinas de diagnóstico remoto, principalmente em sistemas de supervisão e

---

<sup>1</sup> (\*) Este capítulo teve a colaboração do Engenheiro Emmanuel Ozório Gomes Júnior.

controle de processos industriais, pois, nestes casos, já se tem disponível a infra-estrutura para a aquisição remota e transmissão de dados. Os exemplos apresentados, no entanto, são intensivos no uso de sensores, o que eleva os custos de implantação e restringe a utilização do monitoramento aos casos onde os equipamentos desempenham uma tarefa vital no processo produtivo.

Na CHESF, os equipamentos de telessupervisão, embora monitorem as grandezas do sistema eletro-energético, não foram projetados para coletar informações que viabilizem a avaliação do seu próprio estado operativo. A idéia de aplicar a estratégia de monitoramento nestes equipamentos, por razões que explicitamos adiante, era, no entanto, bastante atrativa. Pela sua própria natureza funcional já dispúnhamos da rede de aquisição e transmissão de dados remotos. Restava apenas uma solução para os sensores.

Na busca de uma alternativa de baixo custo, com o menor investimento possível na aquisição de sensores, constatamos que pouca ênfase tem sido dada ao tratamento metódico dos dados coletados, visando extrair deles toda a informação agregada disponível. Resolvemos explorar uma solução com a utilização de métodos quantitativos, trabalhando sobre os dados que, normalmente, são coletados pelas equipes de manutenção, ou lhes estão facilmente disponíveis. Combinando as técnicas estatísticas de previsão de séries temporais e Controle Estatístico de Processo - CEP -, aplicadas aos dados coletados, construímos um modelo de monitoramento para os equipamentos de telessupervisão de um sistema elétrico. Neste modelo utilizando o CEP podemos, a partir de informações sobre a qualidade final do produto (atendimento às especificações), inferir sobre as condições operativas da "máquina produtora" (processo), diagnosticando, inclusive, possíveis tendências ao desajuste.

Nos procedimentos operacionais pode-se, de acordo com as necessidades e recursos disponíveis, optar, com a mesma

eficiência, por um tratamento puramente manual ou totalmente automatizado, em tempo real. É necessário destacar que a coleta de dados, de modo a não descaracterizar o monitoramento, deve ser efetuada sem afetar a operação normal de qualquer equipamento ou sistema observado.

## **2. Implantação do Monitoramento**

A área de Controle de Processo da CHESF é responsável pelo projeto, instalação e manutenção dos sistemas de telessupervisão e telecontrole de suporte aos centros de operação do sistema eletro-energético. Temos 5 divisões de operação regional - DRO's, coordenadas por um Centro de Operação do Sistema - COOS. As informações que balizam as decisões de operação são trazidas aos centros por 2 sistemas de supervisão e controle distintos.

O mais antigo é chamado de Rede de Telemetria e é composto de transdutores, remotas de telemetria ponto-a-ponto, algumas remotas interrogadas por uma estação central de telemetria, indicadores digitais e registradores. São 35 as instalações supervisionadas, com um total de cerca de 150 telemidas e 600 telessinais - estados de chaves e disjuntores. No COOS, responsável pelo controle da rede primária da CHESF, foi necessário implementar uma solução alternativa para a apresentação das informações da Rede de Telemetria, tendo em vista o volume de dados e à especificidade do seu tratamento para utilização a nível central. Foi desenvolvida uma interface homem-máquina em um micro-computador dedicado, baseado no 8085, que recebe as informações da estação central de telemetria, trata-as e apresenta-as no formato adequado. Denominamos este sistema de interface homem-máquina de Centro de Supervisão de Sistema - CSS. A Rede de Telemetria funciona hoje como o *back-up* do novo sistema de supervisão e controle implantado.

O novo sistema foi denominado de Sistema de Controle Supervisório - SCS. É um EMS - *Energy Management System*, composto por uma central de processamento baseada em computadores de grande porte, específicos para aplicações em tempo real, estações remotas micro-processadas de aquisição de dados, transdutores e uma diversidade de outros equipamentos, típica dos EMS. A interface homem-máquina e os recursos disponíveis para a operação do sistema eletro-energético transcende em muito os da Rede de Telemetria. São 48 instalações supervisionadas, embora ainda nem todas já instaladas, contando-se, aproximadamente, 2.000 telemidas, 500 pontos de telecontrole, 30.000 pontos de estado e 17.000 pontos de registro seqüencial de eventos.

A CHESF pretende manter ambos os sistemas de supervisão em operação. Baseados neste fato e no panorama que acabamos de apresentar, fundamentamos nossas principais justificativas, conforme já estabelecidas por MENEZES (1), para buscar uma solução que viabilizasse a implantação da estratégia de monitoramento aos equipamentos de Controle de Processo.

## **2.1. - Importância Estratégica da Função**

Uma vez que os equipamentos de Controle de Processo são responsáveis pela aquisição e transmissão das informações que vão balizar a geração e transmissão de energia elétrica para atendimento às concessionárias estaduais do Nordeste e, também, para alguns consumidores industriais de grande porte, é evidente a sua importância nas operações da CHESF. Isto implica em elevados padrões de qualidade para as telemidas, no tocante a confiabilidade e exatidão. A disponibilidade média esperada para a telessupervisão é de, no mínimo, 99,80 %, e, em condições normais, o erro máximo admitido para uma telemida é menor que 0,30 %. Fica claro que a missão de Controle de Processo é

fundamental para a função vital da CHESF - geração e transmissão de energia elétrica -, sendo imprescindível para viabilizar a operação dos sistemas elétricos interligados, das diversas empresas geradoras do país.

## **2.2. - Crescimento do Parque Instalado**

A necessidade de operar os sistemas elétricos interligados das diversas empresas geradoras de energia, vem acarretando no aumento da demanda por recursos de telessupervisão e telecontrole. Isto fez crescer, nos últimos 5 anos, em torno de vinte vezes o nosso parque instalado. Considerando que o quadro de pessoal para execução da manutenção sofreu algumas reduções, tornou-se imperativo encontrar uma nova estratégia de manutenção que nos permita garantir os índices de qualidade especificados para os nossos serviços. As diretrizes adotadas até então são inexecutáveis com o advento da nova realidade. Não dispomos de Homem-hora suficiente para efetuar a Manutenção Preventiva de Condição (Diagnose), baseada em visitas com periodicidade pré-estabelecida às instalações. Temos de implantar uma manutenção por exceção; detectando os problemas e cuidando apenas deles. Na maioria dos casos, antes que o usuário perceba.

## **3. Concepção do Modelo**

Nossa idéia foi aplicar o Controle Estatístico de Processo - CEP - às telemedidas, visto serem elas nosso principal produto, sobre as quais incidem bem estabelecidos requisitos de qualidade, inferindo então sobre o estado da cadeia de equipamentos responsáveis pela sua "produção". As principais telemedidas são os valores das potências de geradores, transformadores e linhas de transmissão, e das tensões de barramento das diversas instalações da CHESF.

### **3.1. - Controle Estatístico de Processo**

Em sua essência, o CEP é um método de controle que permite, a partir de informações sobre a qualidade final de um produto (atendimento às especificações), inferir sobre as condições operativas da "máquina produtora" (processo), indicando, inclusive, possíveis tendências ao desajuste. Partindo do conhecimento específico dos especialistas de manutenção, devemos definir um conjunto de medidas que possam caracterizar o estado funcional do equipamento. O ponto de partida do Controle Estatístico de Processo é o padrão de comparação. Este padrão estabelece as tolerâncias para as características definidoras da qualidade de um produto. Nas aplicações tradicionais, as dimensões padronizadas de uma peça constituem um exemplo facilmente encontrado. No caso da telemedição, a principal característica de qualidade que iremos acompanhar é a exatidão. O padrão de comparação, entretanto, nem sempre é de fácil obtenção, uma vez que a possibilidade de variação pode, também, ser uma característica necessária e inerente à natureza de um processo de medição. Ao conceber nosso padrão tivemos de levar isto em conta, construindo um específico para cada telemedida controlada e de forma que ele pudesse acompanhar as alterações normais apresentadas pelo valor da grandeza analógica associada. Os padrões e demais parâmetros de "sintonia" do CEP são determinados a partir da análise de uma série de medidas coletadas, determinando o efetivo comportamento do sistema.

Os testes aplicados ao conjunto de pontos que formam um gráfico de controle detectam tanto quebras aleatórias quanto tendências de desajuste. As ocorrências de quebra são associadas à manutenção corretiva aleatória residual, que sempre existirá, qualquer que seja a estratégia de manutenção adotada. Para as tendências detectadas, pode-se aplicar as técnicas de séries temporais e prever o tempo provável até que a qualidade de

serviço atinja um nível inadequado. Desta forma, baseados na confiabilidade instantânea de cada telemedida, podemos programar o momento ótimo de intervenção, antes que o usuário seja afetado.

Com a finalidade de padronizar o trabalho de análise dos dados coletados, evitando os erros grosseiros e aqueles associados ao julgamento subjetivo do gráfico de controle, desenvolvemos um programa em linguagem Turbo-Pascal, denominado CEP, - conforme DINIZ (2) -, que automatiza a tarefa. São efetuados 6 testes distintos, que listamos a seguir na Tabela 1, sendo considerada como fora de controle estatístico qualquer condição com probabilidade de ocorrência menor ou igual a 1 %.

**Tabela 1 - Testes Do Programa CEP**

TESTE	CONDIÇÃO
1	Ponto fora das linhas de controle
2	7 pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central
3	10 pontos em 11 consecutivos de um mesmo lado da linha central
4	12 pontos em 14 consecutivos de um mesmo lado da linha central
5	7 pontos consecutivos com tendência crescente ou decrescente
6	2 pontos em 5 consecutivos próximos das linhas de controle

O cálculo dos limites de controle e demais parâmetros do CEP não são discutidos aqui. No nosso desenvolvimento seguimos as orientações de CALEGARE (3) E PALMER (4), que apontamos como referências deste trabalho.

### **3.2. - Construção do Padrão para as Potências**

Para construir o padrão de comparação das potências partimos da equação de consistência dos fluxos de potências de um "nó". Por convenção, os fluxos de potência que chegam a um nó

são negativos e os fluxos que partem do nó são positivos. O somatório dos fluxos de potência que tocam em um nó é, portanto, zero. Isto pode ser verificado para as telemidas de potência. O padrão de comparação instantâneo para qualquer amostragem de um nó de potência é, então, 0 (zero). O erro, E%, que será controlado via CEP, é dado por:

$$E\% = \frac{\sum_j P_j}{\sum_i FE_{PSi}}$$

onde:  $P_j$  é a telemida do fluxo de potência  $j$ ;

$FE_{PSi}$  é o fundo de escala da telemidação do fluxo de potência  $i$ , saindo do nó.

O denominador no cálculo do erro é um fator de normalização para permitir a comparação entre os diversos nós de potência observados. A equação em termos de erro percentual permite a associação imediata à característica de qualidade, exatidão, que também é expressa nesta base.

Os valores utilizados no CEP são as médias diárias dos erros percentuais observados em quatro amostragens. Apresentamos na Figura 1, a seguir, exemplo, com dados reais, de um gráfico de controle da média para os nós de potência na subestação de Paulo Afonso IV - PAQ.. Verifica-se que o processo de medição está sob controle estatístico

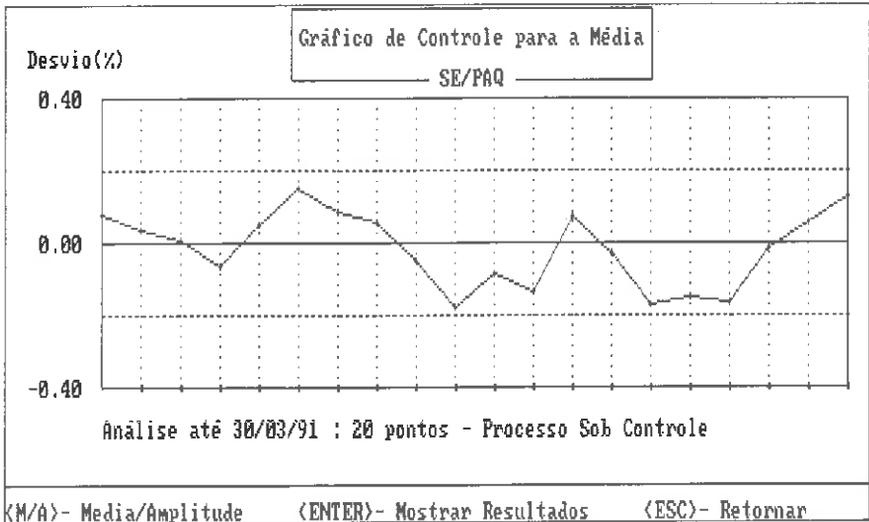


Figura 1

### Construção do Padrão para as Tensões

A construção do padrão para as telemedidas de tensão exige uma abordagem diferente da apresentada até aqui. Não dispomos de uma equação simples, como no caso da consistência dos nós de potência, de onde possamos extrair o valor padrão. Resolvemos desenvolver um modelo de previsão do valor de tensão baseado em modelos de séries temporais. Ver MORETIN (5).

Fizemos uma coleta horária das tensões dos principais barramentos do sistema elétrico da CHESF, durante um período de um mês. Efetuando o tratamento de dados com as técnicas de séries temporais, identificamos ser adequado para previsão, um modelo de alisamento exponencial para séries localmente constantes. O modelo de médias móveis simples, com previsão baseada em uma única observação, embora muito simples,

mostrou ser eficiente para a nossa aplicação. A previsão do valor de uma telemedida de tensão no horário  $t$ ,  $M(t)$ , será:

$$M(t) = Z(t-1),$$

onde  $Z(t-1)$  é o valor da medição no horário  $t-1$ .

O valor do erro percentual entre a previsão - padrão - e o valor telemedido é, então:

$$E\% = \frac{Z(t) - M(t)}{FE} \times 100$$

onde :  $Z(t)$  é o valor telemedido no horário  $t$   
 $FE$  é o valor de fundo de escala da telemedida

Os valores utilizados no CEP são as médias dos erros percentuais observados a cada quatro medições horárias consecutivas, resultando em seis pontos diários. A média das médias dos erros, que definirá a linha central do gráfico, é 0 (zero), no caso das tensões. Na Figura 2 apresentamos um exemplo de gráfico de controle da média da telemedição de tensão de 500 kV da subestação de Paulo Afonso IV - PAQ.

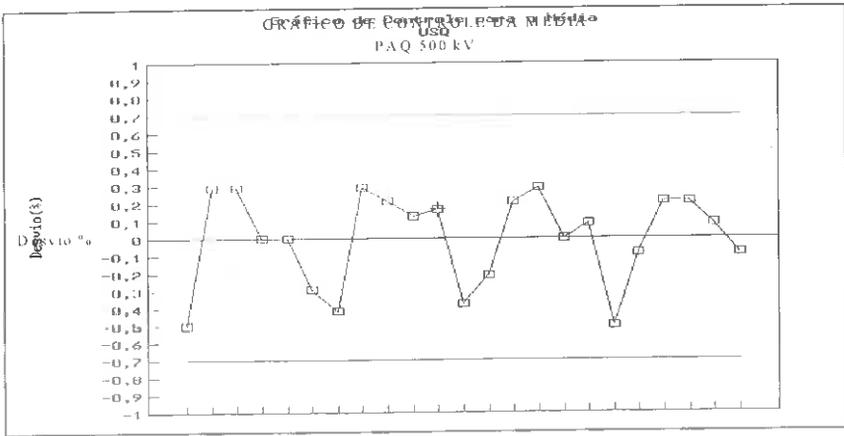


Figura 2

Neste gráfico, que não foi gerado pelo programa CEP, podemos observar a existência de um processo cíclico, mostrando um certo grau de sazonalidade na série. É um indicativo que o modelo de previsão pode ser aperfeiçoado, o que, até o momento, não julgamos como imprescindível na nossa aplicação.

#### 4. O Contorno da Aplicação

##### 4.1. - Limitando o volume de dados

Estabelecemos que o desenvolvimento da aplicação deveria ficar, a princípio, restrita ao CSS. O volume de telemidas deste sistema é menor. Isto minimiza o trabalho de construção e armazenamento dos padrões do CEP e, conseqüentemente, os esforços e recursos computacionais envolvidos. Ainda que contando com um menor volume de telemidas, as informações contidas no CSS garantem a completeza das equações de somatórios de potência de todos os nós controlados, ponto imprescindível no modelo concebido.

Na Figura 3 mostramos um diagrama simplificado das interligações do Sistema Elétrico Principal da CHESF.

Para atender as exigências das equações de soma das potências dos nós tivemos que aglutinar alguns dos barramentos. Desta forma, são tratadas como um único nó os seguintes arranjos:

- PAQ + UIT
- TSA + PRI
- AGD + RCD + RCD 230 kV
- OLD + CMD + CMD 230 kV
- FTZ + SBD + DMG + MLG + BNO

Uma vantagem adicional para a utilização do CSS é a facilidade de implementar-se uma interface para troca de dados com um micro-computador PC-compatível, o que não era simples no caso do computador de grande porte do SCS, quando iniciamos nosso projeto.

#### **4.2. - Aquisição e formatação de dados**

O processo consiste na formação de uma tabela de valores ao final de cada período de amostragem que, neste caso, foi estabelecido em 1 (uma) hora.

Para a formação dessa tabela, a cada período de amostragem são analisados pelo programa os valores armazenados no último ciclo de atualização dos dados de telessupervisão. Se encontrada inconsistência de dados, espera-se pelas informações do ciclo de atualização seguinte, até que se tenha um ciclo totalmente consistente. Entende-se por consistente, um ciclo onde

não houve falha na resposta de nenhuma remota de telemetria interrogada. A duração de um ciclo de atualização é de, aproximadamente, 30 segundos.

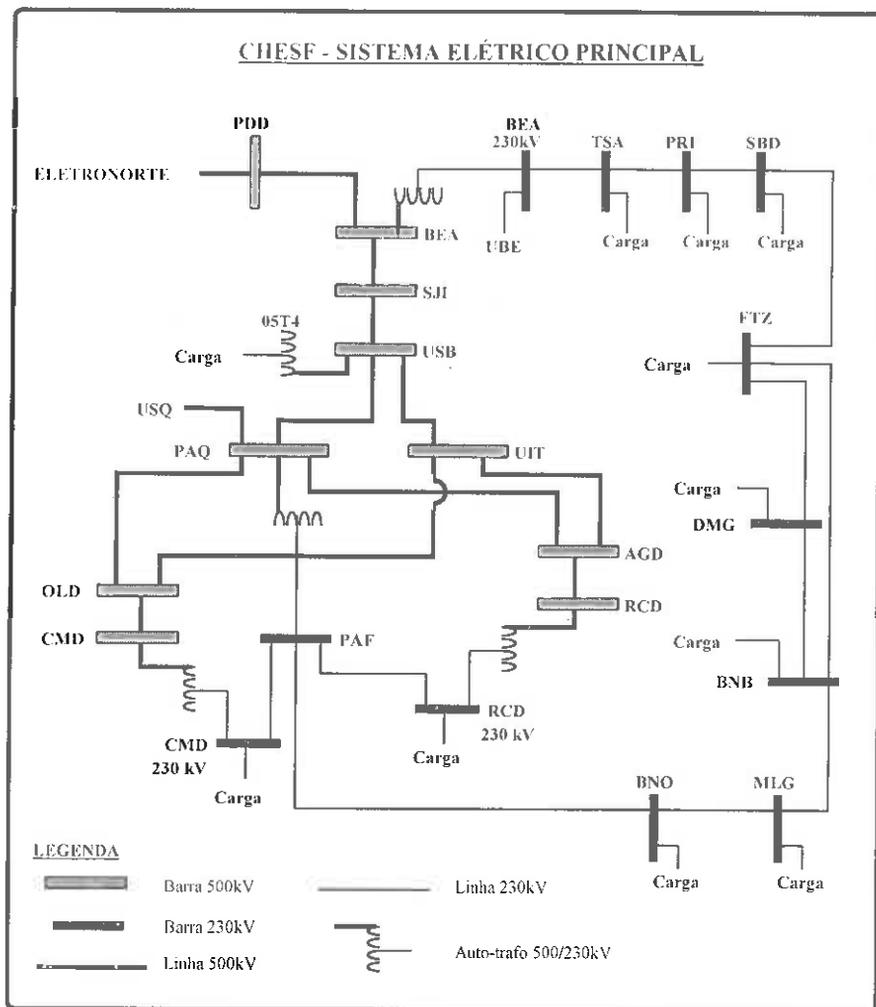


Figura 3

## 5. Conclusões

A utilização do CEP viabilizou a implantação do monitoramento dos equipamentos de Controle de Processo da CHESF, sem qualquer custo adicional em *hardware*. Com a implantação desta ferramenta de controle podemos eliminar o programa de manutenção preventiva de qualidade que vínhamos adotando até então, e passar a agir por exceção, apenas onde se fizer necessário.

O modelo concebido permite acompanhar o desempenho de uma telemedida, num túnel de exatidão de  $\pm 1\%$ . Este valor, que é a cota majorada dos 3 desvios-padrão ( $3\sigma$ ) utilizado no CEP, tem se mostrado satisfatório para os nossos propósitos.

É evidente que nossa aplicação foi facilitada por podermos contar com toda uma rede de telemetria remota já disponível. Entretanto, as técnicas e idéias utilizadas no desenvolvimento do trabalho se revelam de caráter geral e podem ser adaptadas a uma vasta gama de aplicações. Em outros tipos de plantas sua utilização poderá viabilizar a substituição dos procedimentos de manutenção preventiva tradicionais por um programa de manutenção preditiva de baixo custo, concorrendo para o aumento da disponibilidade dos equipamentos e diminuição dos custos de manutenção.

## 6. Bibliografia

- (1) MENEZES, HÉLIO B., SOUZA, FERNANDO M. C. e GOMES Jr, EMMANUEL O. - Monitoramento: reduzindo custos e garantindo a qualidade. Uma experiência na CHESF. 9o Congresso Brasileiro de Manutenção, outubro de 1994, Curitiba.
- (2) DINIZ, PAULO C. P. - Relatório de estágio supervisionado. Documento interno CHESF, dezembro de 1991, Recife.
- (3) CALEGARE, ÁLVARO J. A. - Técnicas de Garantia da Qualidade. 1ª edição, LTC, 1985, Rio de Janeiro.
- (4) PALMER, COLIN F.- Controle Total de Qualidade. 1ª edição, Editora Edgard Blücher, 1974, São Paulo.
- (5) MORETIN, PEDRO A. e TOLOI, CÉLIA M. C. - Previsão de Séries Temporais. 2ª edição, Atual Editora, 1987, São Paulo.
- (6) MEYER, PAUL L. - Probabilidade: aplicações à Estatística. 2ª edição, LTC, 1983, reimpressão 1988, Rio de Janeiro.



**PARTE IV**  
***MODELOS DE DECISÃO***  
***EM MANUTENÇÃO***

---

---



# MODELOS DE DECISÃO EM PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO BASEADOS EM TEORIA DA DECISÃO

*Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando Menezes Campello de Souza*

## 1. Introdução

Observa-se que a área de manutenção tem passado por uma evolução grande em termos de métodos aplicáveis ao seu processo de gerenciamento e decisão. Neste processo de evolução, o ambiente constituído por organizações no Brasil começa a dar passos cada vez mais concretos. Dentre os motivos para estes passos destacam-se a escassez de recursos e a crescente exigência por competitividade.

A pesquisa explora o estudo do processo decisório em manutenção, incluindo as principais visões de métodos e aplicações desenvolvidas. A maior parte do estudo se concentra em aplicações de uma das técnicas de pesquisa operacional: Teoria da Decisão.

O artigo aprofunda o estudo específico desenvolvido, iniciando-se com a apresentação da visão conceitual da técnica de Teoria da Decisão. Os resultados mais recentes de aplicações desenvolvidas dentro do contexto de manutenção são apresentados na forma de uma revisão da literatura existente.

Finalmente, a maior ênfase do artigo é dada a uma aplicação. Esta decisão envolve a escolha de um esquema de manutenção a ser adotado dentre vários disponíveis.

## 2. Teoria da Decisão

Na ótica desta metodologia (7), (8), (9) um problema da decisão pōde ser visto como um jogo  $(\theta, a, L)$ , onde:

- A natureza escolhe um estado  $\theta$  do conjunto de possíveis estado da natureza;
- O decisor tomando proveito do que sabe sobre  $\theta$ , escolhe uma ação  $a$  dentro do conjunto de ações;
- Em função da escolha do decisor e da natureza tem-se uma perda denotada por  $L(\theta, a)$  ou uma utilidade  $u(\theta, a)$ ; esta perda ou utilidade é função das preferências que o decisor tem sobre um conjunto de possíveis consequências, que poderão advir da escolha  $(\theta, a)$ , ou seja, daquilo que se quer.

A preocupação do decisor é escolher uma ação que minimize a perda  $L(\theta, a)$ . Se o verdadeiro estado da natureza fosse conhecido, não haveria problema; bastaria verificar a matriz de perda se escolher a ação. No caso, há uma incerteza sobre o estado da natureza.

A determinação do critério para escolha da ação será função do conhecimento que o decisor tem da incerteza. Havendo um conhecimento probabilístico da incerteza, ou seja, dispondo de uma distribuição de probabilidade a priori sobre o estado da natureza, denotada por  $\pi(\theta)$ , então pode-se aplicar o critério de BAYES, minimizando a perda esperada.

A informação a priori é obtida com base na experiência acumulada do decisor, ou informações adquiridas ao longo de anos de experiência por um especialista no assunto, e a qual pode ser tratada quantitativamente, quando expressa por meio de uma distribuição de probabilidade a priori  $\pi(\theta)$ .

A função perda é obtida a partir da função utilidade que mede numa escala cardinal as preferências que o decisor tem. O conceito de utilidade é derivado a partir de determinadas hipóteses do comportamento e aplicável ao caso de escolha diante do risco. Estas hipóteses são formuladas através de axiomas de preferências, os quais podem ser vistos nas referências (7) e (8). Estas apresentam os axiomas das preferências de von Neuman e Morgenstern.

### **3. Probabilidade a Priori**

A determinação da distribuição de probabilidade a priori pode ser efetuada aplicando um procedimento de elicitación de probabilidade subjetiva. Este procedimento consiste numa seqüência de questões bem estruturadas junto a um especialista. Outras abordagens mais simples podem ser aplicadas e permitem determinar com algum grau de precisão a  $\pi(\lambda)$ .

Em alguns casos uma probabilidade a priori imprópria é aplicada. Esta probabilidade, por definição, não pode ser normalizada para integrar em 1. Representa uma probabilidade a priori não informativa. Algumas destas funções são apresentadas a seguir:

1. Quando a função confiabilidade é exponencial a  $\pi(\lambda)$  pode ser  $\pi(\lambda) = 1/\lambda$ .
2. Se o parâmetro  $\lambda$  está restrito a uma região específica, então a distribuição de probabilidade a priori uniforme truncada é aplicada. Isto é, se  $\lambda_0 < \lambda < 1$ , então:

$$\pi(\lambda) = 1/(1-\lambda_0) \text{ para } \lambda \text{ no intervalo acima, fora do intervalo}$$
$$\pi(\lambda) = 0.$$

3. Para o parâmetro de escala da função confiabilidade, pode ser aplicado  $\pi(\lambda) = 1/\lambda$ .

Outro conceito também aplicado é o de distribuição a priori conjugada. Quando isto é efetuado a distribuição a posteriori resulta em uma função da mesma família. A conjugada a ser aplicada a  $\pi(\lambda)$  depende da função de confiabilidade. Para a função de confiabilidade exponencial a conjugada é a função distribuição Gamma. Por este motivo a função distribuição Gamma é mais utilizada para  $\pi(\lambda)$ . Há, portanto, vários métodos para determinação dos parâmetros  $(\alpha, \beta)$  desta função.

A seguir é apresentado o método aplicado, considerado o caso de manutenibilidade. Observa-se que o mesmo método também foi aplicado para confiabilidade.

### **3.1 - Elicitação de Conhecimento a Priori de Manutenibilidade**

O uso de conhecimento a priori no caso de manutenibilidade é muito apropriado no caso de ausência de dados de tempos de manutenção, ou quando os dados não são adequados, ou ainda, em situações nas quais são efetuadas mudanças na estrutura de manutenção e os dados históricos não representam a realidade atual.

De qualquer forma o processo de utilização de conhecimento a priori dos engenheiros e gerentes ou outros especialistas que detém um conhecimento significativo sobre a estrutura de manutenção e seu comportamento em relação ao Tempo para reparo (TTR), permite estabelecer e construir um conhecimento a priori sobre a manutenibilidade.

Muitas vezes pode-se assumir hipóteses sobre o comportamento probabilístico da variável TTR, a partir das características e históricos do sistema e, assim, construir o conhecimento a priori sobre o(s) parâmetro(s) da função  $f(TTR)$ .

Este foi o procedimento aplicado, considerando a obtenção das famílias típicas de mantabilidade através da análise de dados.

A seguir são apresentadas considerações para o parâmetro MTTR. No estudo desenvolvido foram considerados também o parâmetro  $u = 1/\text{MTTR}$ . No caso da confiabilidade foi considerado o parâmetro  $\lambda$ .

Para obtenção de  $\pi(\text{MTTR})$  há vários procedimentos aplicáveis. Estes procedimentos são aplicados a um especialista que tenha conhecimento sobre o problema de interesse. No caso de  $\pi(\text{MTTR})$ , sobre na estrutura de manutenção correlata.

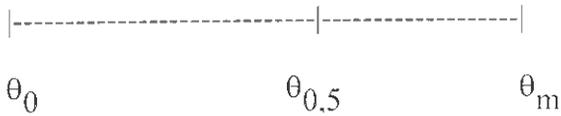
O procedimento para obtenção de conhecimento a priori aplicado é apresentado a seguir no contexto de MTTR. Este procedimento é denominado método dos intervalos equiprováveis e consiste na avaliação de percentis por meio de sub-divisão sucessiva de intervalos equiprováveis. Estas informações são obtidas através de entrevista com o especialista.

O procedimento pode ser visualizado nas seguintes etapas:

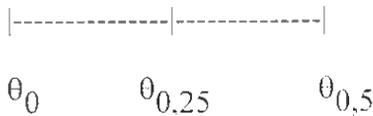
1. Explicação geral do processo ao especialista. O propósito não é encontrar o real valor de  $\theta$ . O problema consiste em estimar o valor mais provável para  $\theta$ .
2. A faixa dos possíveis valores de  $\theta$  é estabelecida. O valor mínimo  $\theta_0$  e o valor máximo  $\theta_m$ .



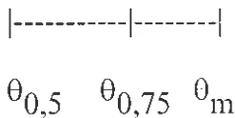
3. Inicia-se a sub-divisão em intervalos equiprováveis, obtendo-se inicialmente o valor de  $\theta_{0,5}$  para o qual  $f(\theta_{0,5}) = 0,5$ .



4. Divide-se então o intervalo  $\theta_0$ - $\theta_{0,5}$ , obtendo-se  $\theta_{0,25}$ , onde  $f(\theta_{0,25}) = 0,25$ .



5. Divide-se então o intervalo  $\theta_{0,5}$ - $\theta_m$ , obtendo-se  $\theta_{0,75}$ , onde  $f(\theta_{0,75}) = 0,75$ .



6. Após a obtenção de  $\theta_{0,25}$ ,  $\theta_{0,5}$ , e  $\theta_{0,75}$ , procede-se um teste de consistência. Este teste consiste em se avaliar a seguinte questão: qual o mais provável,  $\theta$  acontecer dentro ou fora do intervalo  $\theta_{0,25}$  -  $\theta_{0,75}$  ?



Há três respostas possíveis: 1-dentro, 2-fora, ou 3-indiferente.

A terceira resposta é a correta, pois se os valores estiverem em consistência, a probabilidade de estar dentro é 0,5; e fora também.

No caso de resposta inconsistente, deve-se reavaliar os valores.

7. Repetir o procedimento para obter outros pontos (por exemplo:  $\theta_{0,125}$ ,  $\theta_{0,375}$ ,  $\theta_{0,625}$ ,  $\theta_{0,875}$ )

Ao final obtém-se uma tabela com os seguintes percentis:

$\theta$	$f(\theta)$
	0,01
	0,125
	0,25
	0,375
	0,5
	0,625
	0,75
	0,875
	0,99

Finalmente, procede-se uma análise estatística para ajustar os pontos a uma distribuição de probabilidade.

Os resultados dos estudos desenvolvidos são apresentados nas aplicações relativas aos Modelos de Decisão nos itens 6 e 7, para confiabilidade ( $\lambda$ ) e manutenibilidade, respectivamente.

#### **4. Teoria da Decisão em Manutenção e Confiabilidade**

A engenharia de Manutenção tem sido apresentada na literatura de diversas formas. Uma visualização mais bem estruturada é apresentada na forma de duas abordagens: Matemática e de Engenharia (Gits, 1986).

A abordagem matemática consiste em estudos dedicados à otimização de procedimentos. Os modelos de manutenção são classificados de acordo com três critérios: número de estados (modos de falhas no sistema), observabilidade do estado do sistema, e número de componentes.

No primeiro caso os modelos são classificados em dois grupos: modelos de dois estados e modelos multi-estado. No segundo caso, são classificados por modelos de manutenção preventiva, onde o estado do sistema é sempre conhecido, e modelos preditivos ("preparedness"), onde o real estado do sistema não é conhecido com certeza.

A classificação por número de componentes implica em dois tipos de modelos: simples (um componente) e complexos (vários componentes). A modelação matemática, com as hipóteses básicas e desdobramentos são função do tipo de classificação acima.

A abordagem de engenharia consiste no tratamento de um conjunto satisfatório de procedimentos de manutenção. O que fazer e quando?

Como se pode observar através desta visão apresentada por Gits (1986) o uso de Métodos Quantitativos em manutenção é enquadrada especialmente na abordagem matemática. Entretanto alguns procedimentos propostos pela abordagem de engenharia incorporam o uso de métodos matemáticos ou de resultados obtidos através destes.

Dentro desta visão de uso de Métodos Quantitativos, o item a seguir enfatiza as contribuições da Teoria da Decisão e da Teoria da Utilidade Multiatributo na área de Manutenção.

Uma revisão da literatura sobre este tema é apresentada em (5). A seguir, uma síntese dos trabalhos encontrados na literatura.

Muitas aplicações tem sido encontradas aplicando Teoria da Decisão em Confiabilidade e Manutenção e a previsão é de um número crescent, especialmente com o uso de conhecimento a priori na abordagem Bayesiana (10).

Em geral a literatura apresenta resultados de aplicações específicas, havendo pouco trabalho no sentido de uma formulação mais geral para problemas no contexto de Confiabilidade e Manutenibilidade.

Aplicações tem sido desenvolvidas (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) em: problemas de diagnóstico; procedimentos de manutenção; otimização da manutenção; manutenção preventiva; problemas de contratos de manutenção; escolha de níveis de confiabilidade em projetos; decisões em confiabilidade; etc

## **5. Desenvolvimento de um Modelo de Decisão para Manutenção e Confiabilidade**

O desenvolvimento do modelo de decisão (5) consiste numa estruturação para tratamento de forma sistematizada de uma certa classe de problemas na área de Manutenção e Confiabilidade. Esta classe de problemas envolve sistemas complexos de um estado, conforme a classificação na abordagem matemática. Podem ser tratados problemas tais como: escolha de estratégias de manutenção, procedimentos de manutenção, estrutura ótima de manutenção, e contratos de manutenção. O modelo pode ser adaptado para outras classes de problemas.

A estruturação do modelo de decisão consiste na formulação prévia de aspectos básicos para a classe de problemas em questão. A implementação segue um procedimento estabelecido, apoiado por um protótipo de software de sistema de apoio à decisão.

O critério de otimização é o Bayesiano com o uso do conhecimento a priori dos especialistas, onde procura maximizar a função utilidade estabelecida. Esta função é constituída com base nas preferências que o decisor tem sobre as possíveis conseqüências no sistema.

O sistema executa a otimização indicando a melhor ação após a etapa de entrada de dados e especificação de condições que caracterizam o problema. O sistema inclui um estudo de análise de sensibilidade. Os dados de entrada são alterados em torno de mais ou menos 30% de modo a verificar o impacto nos resultados obtidos.

### **5.1 - Aplicação do Modelo de Decisão**

A aplicação foi desenvolvida sobre um problema de estabelecimento de esquema de manutenção, envolvendo infraestrutura de suporte em dias úteis, fins de semana e feriados. O problema básico consiste em decidir pelo acionamento ou não de equipes fora do horário normal de trabalho. Do conjunto de conseqüências, considera-se: o custo adicional da manutenção quando atua em horário extra; cancelamento de outras programações para acionamento imediato; possibilidade de indisponibilidade por falha em equipamento redundante, no caso de esperar, para acionar a equipe depois.

Dentro de uma visão de manutenção centrada na confiabilidade, a confiabilidade dos equipamentos é considerada juntamente com a mantabilidade da estrutura de manutenção.

Assim, o estado de Natureza, corresponde a condição em que o sistema se encontra com respeito a Confiabilidade e Manutenibilidade. O que “se sabe” sobre o estado da natureza, ou seja, o conhecimento que os especialistas têm sobre o comportamento dos equipamentos e da manutenção pode ser expresso na forma de distribuição de probabilidade a priori. O conjunto dos possíveis estados da natureza deve levar em consideração a confiabilidade dos equipamento no período de tempo  $t$ , previsto para liberação da equipe, e, a manutenibilidade, ou seja, a probabilidade de que a equipe efetue o serviço num período de tempo  $t_{tr}$ .

Os objetivos neste nível de avaliação são basicamente: um aumento do índice de disponibilidade do subsistema e uma redução nos custos operacionais envolvidos. Duas variáveis objetivo são consideradas: o tempo de interrupção no sistema (TI) e os custos (C) associados ao esquema de manutenção a ser escolhido.

Estes atributos são agregados e expressos na forma de uma função utilidade que é maximizada na escolha do curso de ação a ser adotada pela equipe de estudos no sistema.

Assim, o trabalho desenvolvido inclui a modelação de preferências quanto às variáveis objetivo (TI e C) junto a decisores na empresa. O problema é resolvido tomando por base a estrutura de preferências dos decisores. Foi desenvolvido um software por prototipação para modelar as preferências entre TI e C, o qual é apresentado juntamente com os resultados obtidos.

O caso analisado envolvia novos equipamentos incorporados no sistema para o qual havia incerteza quanto aos níveis de confiabilidade. Neste caso foi aplicado o enfoque "Bayesiano". Este enfoque permite a modelação probabilística da confiabilidade e de manutenibilidade em situações de incerteza, especialmente na indisponibilidade de dados. Foi desenvolvido e

aplicado um procedimento na forma de um software similar ao mencionado acima.

Vários resultados teóricos foram obtidos na formulação deste problema (19). A seguir são apresentados alguns resultados obtidos do sistema de apoio à decisão.

A Figura 1 mostra a utilidade esperada para cada uma das 4 ações analisadas. Cada curva mostra uma situação específica para cada análise de sensibilidade que o sistema verifica automaticamente. Os resultados obtidos indicam a ação  $a_3$  com máxima utilidade e  $a_4$  com valor próximo de utilidade. Para as ações  $a_1$  e  $a_2$ , valores baixos de utilidade, indicam que não são adequadas.

Para a estrutura de preferência obtida com os decisores na CHESF, no contexto considerado, verificou-se que é mais vantajoso evitar esquemas de prontidão e sobreaviso nos casos de redundância de equipamentos.

Estes resultados são analisados e comprovados através de análise de sensibilidade. Isto é, as diversas curvas na Figura 1 mostram que o resultado indicando  $a_3$  permanece o mesmo para as variações na entrada, confirmando a robustez do procedimento. Além da saída gráfica o sistema fornece uma saída na forma de tabela com dados numéricos.

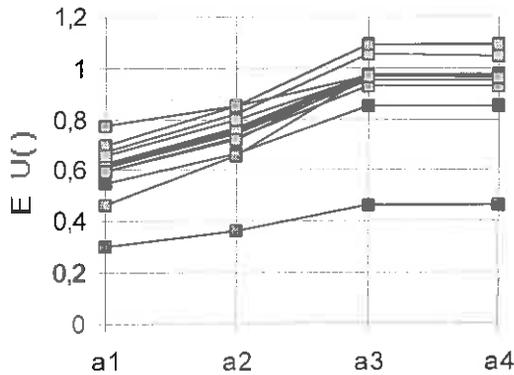


FIGURA 1

O sistema fornece algumas informações sobre as variações verificadas nos dados de entrada na análise de sensibilidade. A Figura 2 apresenta a função distribuição acumulada a priori para  $\theta$  (no caso mantenedibilidade), dado tres valores de parâmetro de escala. A primeira curva é para o valor nominal menos 30%; a segunda é para o valor nominal; a terceira é o valor nominal mais 30%.

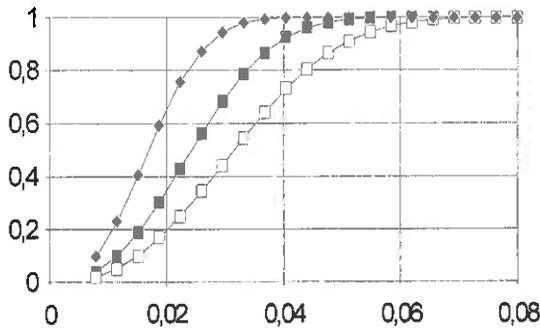


FIGURA 2

## 5.2 - Modelação de Preferências

A referência (20) apresenta resultados obtidos com a modelação de preferências para este problema.

Esta parte do sistema consiste em duas seções: utilidade multiatributo e utilidade unidimensional. O sistema segue as etapas básicas de elicitación de função utilidade (20). A seguir é ilustrado o funcionamento da segunda seção através de menus do sistema apresentados nas Figura 3 e Figura 4.

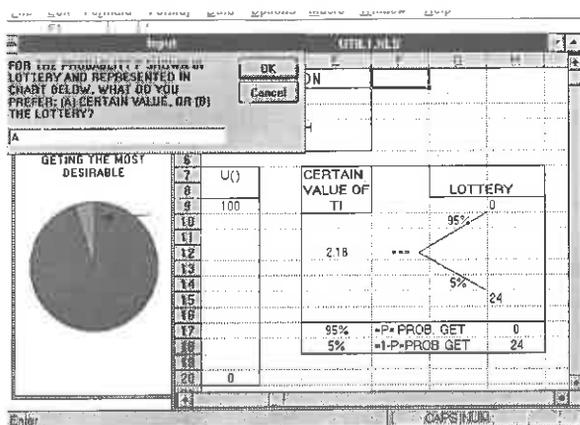


FIGURA 3

A Figura 3 mostra um dos primeiros menus, onde o decisor inicia a escolha entre alternativas possíveis no conjunto de conseqüências do problema, envolvendo, no caso tempos de interrupção.

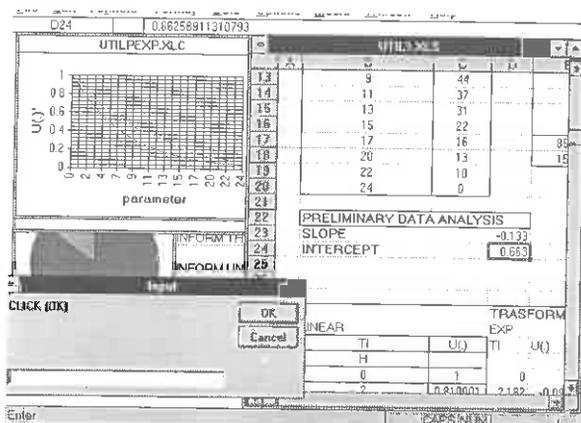


FIGURA 4

A Figura 4 mostra o ajustamento dos dados fornecidos pelo decisor a uma curva de função utilidade que possa representar as preferências (no caso foi obtida a função exponencial).

### 5.3 - Modelação Probabilística com Conhecimento a Priori

Um procedimento de elicitación de probabilidade a priori é aplicado visando obter uma distribuição de probabilidade a priori para  $\theta$ . O sistema funciona de forma similar ao do item 5.2, apresentando menus interativos que permitem o especialista interagir e verificar consistências nas informações fornecidas (5).

## 6. Conclusões

O modelo de decisão permite abordar diretamente um problema, incorporando um tratamento quantitativo para os objetivos na forma de função utilidade. O protótipo de sistema de

apoio à decisão desenvolvido permite uma versatilidade maior na aplicação. O decisor pode interagir e fazer um estudo de sensibilidade além de simular cenários diferentes. Isto permite um maior grau de segurança na tomada de decisões.

O sistema pode ser ampliado para tratar outras classes de problemas com ajustes específicos dentro do quadro geral já adotado.

## **Bibliografia**

- (1) GITS, C. W.; (1986) On the Maintenance Concept for the Technical System: II Literature Review. *Maintenance Management International*. 6(3)pp.181-196.
- (2) BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F.; (1967) *Mathematical Theory of Reliability*. John Willey & Sons, Inc.
- (3) GOLDMAN, A. S.; SLATTERY, T. B.; (1977) *Maintainability: A Major Element of System Effectiveness*. Robert E. Krieger Publishing Company, ISBN: 0-88275-292-8.
- (4) O'CONNOR, P. D. T.; (1985) *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, pp.398p. ISBN: 0-471-90551-8.
- (5) ALMEIDA, A. T de, (1994), *Decision Making in Maintenance and Reliability - The Decision Theory Approach*, Ph.D. Thesis, University of Birmingham.
- (6) GERAERDS, W. M. J.; (1992) The EUT Maintenance Model. *International Journal of Production Economics*. 24pp.209-216.
- (7) KEENEY, R. L.; RAIFFA, H.; (1976) *Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*. John Wiley & Sons
- (8) RAIFFA, H.; (1970) *Decision Analysis*. Addison-Wesley.

- (9) SMITH, J. Q.; (1988) Decision Analysis - A Bayesian Approach. Chapman and Hall.
- (10) MARTZ, H. F.; WALLER, R. A.; (1982) Bayesian Reliability Analysis. John Wiley & Sons, pp.745p.
- (11) GUPTA, S. k.; (1987) Support System Uses Decision Theory To Locate Faults. Ind.Eng. 19(10)pp.20-27.
- (12) KAPLAN, S.; Frank, M. V.; Bley, D. C.; Lindsay, D. G.; (1988) Outline of COPILOT, an Expert System for Reactor Operational Assistance, Using a Bayesian Diagnostic Module. Reliability Engineering and system Safety. 22pp.411-440.
- (13) BACON-SHONE, J.; (1982) Bayesian Loss Functions for Structure Choice. IEEE - Trans. Reliability. R-31(M5)pp.485-486.
- (14) BAYLOR, J. S.; Galpin, D. S.; Johnston, R. L.; (1991) Decision Methodology for Plant Life Management Option Selection. Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the American Power Conference. 29 April - 1 May 1991; 1pp.485-491.
- (15) SATHE, P. T.; Hancock, W. M.; (1973) A Bayesian Approach to the Scheduling of Preventive Maintenance. AIIE Transactions. 5(2)pp.172-179.
- (16) RONEN, B.; PLISKIN J.S.; (1981) Decision Analysis in Micoelectronic Reliability: Optimal Design and Packaging of a Diode Array. Operations Research. 29(2)pp.229-242.
- (17) CLAROTTI, C. A.; SPIZZICHINO, F.; (1989) The Bayes Predictive Approach in Reliability Theory. IEEE Trans. Reliability. 38(3)pp.379-382.
- (18) ALMEIDA, A. T. de; Souza, F. M. C. de; (1986) Bayes-Like Decisions in Reliability Engineering. International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in

- Knowledge-Based Systems. June 30 - July 4, 1986; Paris - France; pp.87-90.
- (19) ALMEIDA, A. T. de; Souza, F. M. C.de; (1993) Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System. *IEEE Trans. Reliability*. 42(3)pp.401-407.
- (20) ALMEIDA, A. T. de; Souza, F. M. C. de; Bohoris, G. A.; (1992b) Preference Elicitation in Reliability Engineering. *IFORS/IFAC Workshop on Support Systems for Decision and Negotiation Process*. 24-26 June 1992; Warsaw - Poland; 2pp.11-16.
- (21) ALMEIDA, A. T. de; Steinberg, H.; Bohoris, G. A.; (1991) A Decision Support System in the Management of a Telecommunication Network. *IFORS First Specialized Conference on Decision Support System*. 27-29 March 1991; Bruges -Belgium; 4.F11.Cpp.67.
- (22) ALMEIDA, A. T. de; Bohoris, G. A.; Souza, F. M. C.de; (1992) Management Information and Decision Support System in the Maintenance of a Telecommunication System. *European Safety & Reliability Conference*. Elsevier Applied Science, 10-12 June 1992; Copenhagen - Denmark; pp.23-31. ISBN: 1 85166 875 6.
- (23) ALMEIDA, A. T. de; Bohoris, G. A.; Steinberg, H.; (1992) Management Information and Decision Support System of a Telecommunication Network. *Journal of Decision Systems*. 1(2-3) pp. 213-241.
- (24) Glasser, Gerald J. (1969) Planned Replacement: Some Theory and its Application. *Journal of quality Technology*. 1,2. Pp. 110-119

# TESTE DE CONFIABILIDADE BASEADO EM TEORIA DA DECISÃO

*Adiel Teixeira de Almeida  
Fernando Menezes Campello de Souza*

## 1. Introdução

O planejamento da Operação e Manutenção de Sistemas requer o uso de informações sobre a confiabilidade dos equipamentos que o constituem. Como parte deste planejamento tem sido efetuado o dimensionamento de sobressalentes e de equipes de manutenção, a estimativa de custos operacionais e etc. As informações utilizadas são fornecidas pelos fabricantes, os quais geralmente especificam o MTBF (ou taxa de falhas).

Uma preocupação crescente quanto a credibilidade nestes dados tem desencadeado a necessidade de prever, em contrato, um teste de aceitação de confiabilidade.

Os procedimentos aqui desenvolvidos, consistem, em testes de aceitação de confiabilidade de equipamentos, durante a fase de operação experimental (FOE), após os testes de comissionamento (qualidade de serviço).

A questão é: que número de panes pode ocorrer na população de equipamentos, durante o período de observação, de modo que a taxa de falhas real  $\lambda$  esteja compatível com a especificada  $\lambda_0$  (ou aceitável diante da especificada)?

A proposição básica é tratar o problema com a aplicação dos métodos quantitativos da Pesquisa Operacional, dentre os quais destacamos, a Teoria da Decisão (1).

Neste trabalho, trataremos do problema de avaliação do nível de confiabilidade de equipamentos que entrando em operação serão observados durante um determinado período de tempo.

## **2. Introdução a Teoria da Decisão**

A formulação de um problema em Teoria da Decisão é função de três elementos básicos: “o que se pode fazer”, “o que se sabe” e “o que se quer”.

O “que se pode fazer” corresponde ao espaço de ações  $a \in A$ , constituído de todos os cursos de ações que o decisor pode adotar.

O sistema em consideração se encontra em uma condição desconhecida, denominada Estado da Natureza ( $\theta$ ), elemento de um conjunto  $\Theta$ . O decisor pode ter algum conhecimento inicial sobre, na forma de uma distribuição de probabilidade a priori  $\pi(\theta)$ , sobre todos os elementos do conjunto  $\Theta$ ; este conhecimento é função da experiência que se tem acumulado sobre o comportamento do sistema, e corresponde “àquilo que se sabe”.

Através de um experimento o decisor pode obter dados sobre o verdadeiro Estado da Natureza, reduzindo a incerteza sobre  $\theta$ ; temos então, um conjunto das possíveis observações  $x \in X$ , que podem ser obtidas, e uma função  $p(x|\theta)$ , que é a probabilidade de se observar  $x$  dado que o verdadeiro Estado da Natureza é  $\theta$ . Esta informação  $x$ , possibilita uma atualização no estado de informação inicial, na forma de uma distribuição de probabilidade à posteriori  $\pi(\theta|x)$ .

Considerando que vamos trabalhar com dados, definimos um conjunto  $D$ , de regras de Decisão (ou estratégias). Cada Regra  $d$  é uma função que mapea cada elemento  $x$  do conjunto  $X$ , a um elemento  $a$  do conjunto  $A$ ,  $d: x \rightarrow a$ ; a tarefa do decisor consiste, então, em escolher a melhor Regra de Decisão ou Estratégia  $d$ .

O “que se quer” corresponde aos objetivos do decisor, os quais estabelecerão preferências sobre as conseqüências que poderão advir da escolha  $(\theta, a)$ . Estas preferências podem ser expressas quantitativamente na forma de uma função Utilidade  $u(\theta,a)$  ou uma função perda  $L(\theta,a)$ . O conceito de Utilidade é derivado a partir de determinadas hipóteses do comportamento; estas são formuladas através dos axiomas das preferências de von Neuman e Morgenstern [2].

A preocupação do decisor é escolher uma ação que minimize a perda  $L(\theta,a)$ , com base no “que se sabe” sobre  $\theta$ . No caso de uso de Dados  $(x)$ , a preocupação é escolher uma regra de decisão  $d$  que minimize a função risco  $R_d(\theta)$ , que é o valor esperado da Perda  $L(\theta,a)$  da regra  $d$ , em função de  $\theta$ ;

$$R_d(\theta) = \sum_{x \in X} L(\theta, d(x))P(x/\theta), \text{ caso discreto}$$

com o uso de conhecimento a priori, obtém-se o risco da regra  $d$ , que é o valor esperado da função Risco:

$$r_d = \sum_{\theta} \pi(\theta)R_d(\theta), \text{ caos discreto; o problema, assim, é}$$

escolher a regra  $d$  que tenha o menor risco ( princípio de BAYES):

$$\text{Min}_d r_d.$$

Não havendo conhecimento a priori, podemos adotar outros procedimentos visando minimizar a função Risco, os quais serão apresentados posteriormente (Neyman-Pearson e Minimax).

### **3. Colocação do Problema**

O problema, então, consiste em avaliar a verdadeira taxa de falhas  $\lambda$ , ou MTBF, do equipamento. O estudo desenvolvido foi efetuada sobre determinadas restrições de amostragem: população de  $N=36$  equipamentos e período de observação  $T=3$  meses

(período de FOE). Assim, dentro deste período foi observado o número de panes ( $x$ ) nos 36 equipamentos, pois sabemos que o mesmo depende da confiabilidade do equipamento, parametrizada pela taxa de falhas, que é o Estado da Natureza neste problema.

O dado a ser utilizado, conforme mencionado, é o número de falhas ocorridas durante o período de observação, de modo que o conjunto de observações será:  $X = (0, 1, 2, 3, 4, \dots)$

A função  $P(x|\lambda)$  que diz como o  $x$  informa sobre o estado da natureza  $\lambda$ , e corresponde à probabilidade de ocorrer  $x$  falhas, dado que a taxa de falhas real seja  $\lambda$ , é um dos elementos para solução do problema. Este número de falhas  $x$  tem um comportamento assumido como Processo de Poisson.

Quanto ao valor especificado pelo fabricante dos equipamentos, obtemos a taxa de falhas  $\lambda_0 = 0,457$ , que representa a taxa de falhas do conjunto de  $N=36$  equipamentos na unidade de tempo  $T=2160$  horas (3 meses da FOE). Este valor de  $\lambda_0$  é obtido a partir do valor especificado para um equipamento, considerando a associação das 36 unidades em série e o modelo de falhas de Poisson. [9]

A questão é: que número de panes pode ocorrer na população de 36 equipamentos, durante o período de observação, de modo que a taxa de falhas real ( $\lambda$ ) esteja compatível com a especificada ( $\lambda_0$ )?

A resposta a esta questão será apresentada sob três óticas:

- Teste de Hipótese sob enfoque Neyman-Pearson (também tratado no outro capítulo deste livro sobre teste de confiabilidade);
- Formulação do problema de Decisão com critério Bayesiano; e,
- Determinação de Estimadores Minimax e Bayesiano para a taxa de falhas  $\lambda$ .

### 3.1. - Dados Sobre a Confiabilidade

O dado a ser utilizado, conforme mencionado, é o número de falhas ocorridos durante o período de observação:  $x$ , pertence ao conjunto  $X = \{0, 1, 2, \dots\}$

O modelo empregado utilizando o MTBF especificado, considera que as falhas observadas,  $x$ , são aleatórias, não causadas por efeitos externos nem por operação indevida, nem por falhas no processo de fabricação; assim, considera-se que no início do FOE já foram retiradas aquelas “falhas prematuras”, através de testes de burn-in e debugging, permitindo que a taxa de falhas dos equipamentos esteja na fase operacional da curva, ou seja, constante no tempo.

Temos assim, um processo de Poisson, donde obtemos:

$$P(x, \theta) = P(x/\lambda) = P\{X(t) = x/t\} = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad (4)$$

No caso tratado aqui, o tempo  $t$  será fixado em  $\Delta t = 3$  meses ( 2160 horas), e será obtida a taxa de falhas ( $\lambda_0$ ) dos  $N$  equipamentos para o período  $\Delta t$ , a partir da taxa de falha especificada para um dado equipamento.

É especificado o MTBF=170.000 horas, logo

$\lambda = 5,88 \times 10^{-6}$ /hora, para um equipamento; obtemos então:

$\lambda_0 = \lambda N \Delta t = 0,457$ . Assim:

$$P(x, \theta) = P(x/\lambda) = \frac{\lambda_0^x e^{-\lambda_0}}{x!}$$

#### 4. Teste de Hipótese

O Estado da Natureza aqui, é a condição da taxa de falhas dos equipamentos, onde identificamos um conjunto discreto  $\Theta = \{ \theta_0, \theta_1 \}$ ;  $\theta = \theta_0$  quando  $\lambda \leq \lambda_0$ , e o  $\theta = \theta_1$ , quando  $\lambda > \lambda_0$ . Admitimos que não há conhecimento inicial sobre o estado da natureza  $\lambda$ , e aplicamos o enfoque Neyman-Pearson.

O problema nesta enfoque consiste em escolher a melhor regra de decisão  $b$  que minimize o Risco  $R_b$  para um dado  $\theta$ , sujeito à restrição de que o Risco  $R_b$  para outro  $\theta$  seja menor ou igual a um nível pré-estabelecido  $\alpha$ . Temos :

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{b} R_b(\theta_1) \\ & \text{sujeito a } R_b(\theta_0) \leq \alpha \end{aligned}$$

Esta formulação corresponde a testar a hipótese nula ( $H_0$ ) de que os equipamentos tenham taxa de falhas menor ou igual a especificada, contra a hipótese alternativa ( $H_1$ ):  $H_0: \lambda \leq \lambda_0$   
 $H_1: \lambda > \lambda_0$

Vemos que  $H_0$  e  $H_1$  são hipóteses compostas. Ferguson (5) sugere a solução de problemas de hipóteses compostas através da solução primeiro de um problema de hipótese simples, mantendo a relação de desigualdade entre o  $\lambda$  da hipótese  $H_0$ , e o da alternativa  $H_1$ . É mostrado que a solução deste problema atende à hipótese composta; assim temos a hipótese simples:  $H_0': \lambda = \lambda_0 = 0,457$

$$H_1': \lambda = \lambda_1 = 1 > \lambda_0$$

Devemos então, considerar o risco  $\alpha$  ( $R_b(\theta_0)$ ) de se rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira e o risco  $\beta$  ( $R_b(\theta_1)$ ) de se aceitar sendo ela falsa. A literatura sobre o assunto refere-se também a estes dois riscos por : Erro do Tipo I e Erro do Tipo II, respectivamente (6).

Voltando á Regra de Decisão, devemos verificar que o espaço de ações é discreto com dois elementos :  $\alpha_0$ = aceitar  $H_0$  e  $\alpha_1$ = rejeitar  $H_0$ . A regra de decisão é randomizada e requererá o uso de um dispositivo aleatório para a escolha da ação.(2)

As regras de decisão randomizadas, empregadas no enfoque Neyman-Pearson, são regras de comportamento :  $b(a|x)$ ; ou seja, a probabilidade de se adotar a ação  $a$ , dado que foi observado  $x$ . como o espaço de ações tem dois elementos, então:

$b(a_0|x)+b(a_1|x)=1$ , para simplificar fazemos:

$$b(a_1|x)=\phi(x)$$

$$b(a_0|x)=1-\phi(x)$$

O emprego da regra do comportamento implica no processo ilustrado abaixo, onde escolhe-se a regra  $b$ , depois observa-se o dado  $x$  e randomizando com probabilidade  $b(a|x)$ , encontra-se a ação  $a$ , e sendo  $\theta$  o verdadeiro estado da natureza, tem-se uma conseqüência :



#### 4.1. - Algoritmo

Conforme apresentado acima no enfoque Neyman-Pearson, temos uma restrição de desigualdade a ser atendida, que corresponde ao risco  $\alpha$ .

Aplicando-se multiplicador de Lagrange  $\lambda'$ , a restrição é substituída por uma igualdade, donde se obtém a seguinte regra de decisão:

$$\phi_{\lambda'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } \Delta(x) > \lambda' \\ \gamma & \text{se } \Delta(x) = \lambda' \\ 0 & \text{se } \Delta(x) < \lambda' \end{cases}$$

Sendo  $\Delta(x) = \frac{P(x/\theta_1)}{P(x/\theta_0)}$ , a razão de verossimilhança; e  $\gamma$  uma probabilidade, tal que:  $0 < \gamma < 1$ . O problema é resolvido, procurando o valor multiplicador de Lagrange  $\lambda'$  para o qual a igualdade:  $R_{\phi_{\lambda'}}(\theta_0) = \alpha$ , é verificada; e neste caso, encontra-se o  $x_0$  para o qual  $\Delta(x_0) = \lambda'$ . A regra de decisão, será então:

$$\phi_{\lambda'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x > x_0' \\ \gamma & \text{se } x = x_0' \\ 0 & \text{se } x < x_0' \end{cases}$$

Desenvolvendo para  $R_b(\theta_0)$ :

$$\begin{aligned} R_b(\theta_0) &= \sum_a \sum_x L(\theta_0, a) b(a/x) P(x/\theta_0) \\ &= \sum_x P(x/\theta_0) [b(a_0/x) L(\theta_0, a_0) + b(a_1/x) L(\theta_0, a_1)] \end{aligned}$$

Substituindo  $b(a|x)$ , vem:

$$\begin{aligned} R_b(\theta_0) &= \sum_x P(x/\theta_0) [(1 - \phi(x)) L(\theta_0, a_0) + \phi(x) L(\theta_0, a_1)] \\ &= L(\theta_0, a_0) + \sum_x \phi(x) P(x/\theta_0) [L(\theta_0, a_1) - L(\theta_0, a_0)] \end{aligned}$$

O algoritmo consiste em encontrar a igualdade na expressão anterior para  $R_b(\theta_0)=\alpha$ . Variando o valor de  $\lambda'$  tem-se três parcelas correspondentes a três subconjuntos de  $x$ :

$$\{X: \Delta(x) > \lambda'\}, \text{ onde } \phi(x) = 1$$

$$\{X: \Delta(x) = \lambda'\}, \text{ onde } \phi(x) = \gamma$$

$$\{X: \Delta(x) < \lambda'\}, \text{ onde } \phi(x) = 0$$

$$\text{Logo : } R_{\phi \lambda,}(\theta_0) = \alpha$$

$$\alpha = L(\theta_0, a_0) + 1 \sum_{x: \Delta(x) > \lambda'} P(x/\theta_0) [L(\theta_0, a_1) - L(\theta_0, a_0)] + \\ + \gamma \sum_{x: \Delta(x) = \lambda'} P(x/\theta_0) [L(\theta_0, a_1) - L(\theta_0, a_0)]$$

Temos para o caso em estudo:

$$\lambda'(x) = \frac{P(x/\theta_1)}{P(x/\theta_0)} = \frac{e^{-\lambda_1} \lambda_1^x}{e^{-\lambda_0} \lambda_0^x} = e^{-\lambda_1 + \lambda_0} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^x$$

sendo,  $\lambda_0=0,457$  e  $\lambda_1=1$ .

Algoritmo varia  $\lambda'$  a partir de 0, até a solução, ou seja, a igualdade na relação acima para  $\alpha$ .

#### 4.2. - Solução.

Para resolver o problema sob a ótica aqui apresentada usaremos a função Perda do Observador Ideal, que atribui perda 1 no caso de erro e perda zero no caso de acerto:

$$L(\theta_0, a_0) = L(\theta_0, a_1) = 0$$

$$L(\theta_0, a_1) = L(\theta_1, A_0) = 1$$

Esta função perda caracteriza a formulação convencional para Testes de hipóteses.

Substituindo o valor das perdas na relação anterior para:

$R_{b\lambda'}(\theta_0)$ , vem :

$$\alpha = \sum_{x:\Delta(x)>\lambda'} P(x/\theta_0) + \gamma \sum_{x:\Delta(x)=\lambda'} P(x/\theta_0)$$

A seguir a solução para três valores de  $\alpha$ :

**A)  $\alpha=0,05$ ;**

variando  $\lambda'$  a partir de 0, encontra-se a solução:

$$\alpha=0,05 < \sum_{x=0}^{\infty} P(x/\theta_0) = 1, \text{ para } \lambda'=0$$

para  $\lambda' = 0,58$ ;  $\Delta(0)=0,58$

$$\alpha < \sum_{x=1}^{\infty} P(x/\theta_0) + \gamma P(0/\theta_0)$$

$$\alpha < 0,37 + \gamma 0,63$$

Para  $\lambda'=2,756$ :  $\Delta(2)=2,756$

$$\alpha = \sum_{x=3}^{\infty} P(x/\theta_0) + \gamma P(2/\theta_0)$$

$$\alpha = [1 - \sum_{x=0}^2 P(x/\theta_0)] + \gamma P(2|\theta_0)$$

$\gamma=0,515$ , assim  $x_0=2$

Logo, o procedimento será :

$$\phi_{\lambda'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x > 2 \\ 0,515 & \text{se } x = 2 \\ 0 & \text{se } x < 2 \end{cases}$$

Assim:

Se  $x > 2$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x < 2$ , aceita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x = 2$ , Randomiza-se para encontrar a solução com  $\Pr(\text{rejeitar})=0,515$  e  $\Pr(\text{aceitar})=0,485$

**B)  $\alpha=0,01$ ;**

igualmente obtemos o seguinte procedimento:

Se  $x > 3$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x < 3$ , aceita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x = 3$ , Randomiza-se para encontrar a solução com  $\text{Pr}(\text{rejeitar})=0,4$  e  $\text{Pr}(\text{aceitar})=0,6$

**C)  $\alpha = 0,001$ ,**

igualmente obtemos o seguinte procedimento:

Se  $x > 4$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x < 4$ , aceita-se a hipótese  $H_0$

Se  $x = 4$ , Randomiza-se para encontrar a solução com  $\text{Pr}(\text{rejeitar})=0,78$  e  $\text{Pr}(\text{aceitar})=0,22$

Os procedimentos obtidos para os três níveis  $\alpha(R_b(\theta_0))$  com os critérios de minimização empregados, asseguram o menor risco  $R_b(\theta_1)$ , isto é,  $\beta$ .

A determinação deste risco depende do valor de  $\lambda_1$ , e a hipótese alternativa considera qualquer  $\lambda_1 > \lambda_0$ . Portanto, para calcular o risco  $\beta$  para determinado risco  $\alpha$ , é necessário considerar um determinado valor de  $\lambda_1$ , dentro da faixa considerada. Este risco é alto para valores de  $\lambda_1$  próximos de  $\lambda_0$ , e decresce com o aumento de  $\lambda_1$ .

$$\beta = L(\theta_1, a_0) + \sum_x \phi(x) P(x/\theta_1) [L(\theta_1, a_1) - L(\theta_1, a_0)]$$

$$\beta = 1 - \sum_x \phi(x) P(x/\theta_1)$$

$$\beta = 1 - \left\{ 1 \cdot \sum_{x=x_0+1}^{\infty} P(x/\theta_1) + \gamma P(x_0/\theta_1) \right\}$$

### 4.3 - Comentários Sobre o Teste de Hipótese

Este procedimento resolve o problema, minimizando o risco  $\beta$  a partir de um nível para o risco  $\alpha$ , aplicando a regra  $b(A \mid x)$ .

Uma questão que surge é como determinar o nível  $\alpha$ ; o cliente prefere aumentar para reduzir o risco  $\beta$  e o fornecedor pretende reduzi-lo, pois se trata de seu risco. Há casos onde o decisor tem dificuldade para escolher o nível  $\alpha$ , e tem-se adotado a convenção de quase sempre escolher o valor de 0,05 para este erro (6).

O enfoque apresentado no próximo item evita a questão da determinação deste risco  $\alpha$ , ou, pode ajudar ao decisor a obter o  $\alpha$  que lhe interesse.

Quanto ao uso de regras randomizadas no caso da solução no sub-item anterior (alínea a), para  $\alpha=0,05$ , temos a regra randomizada  $b(a_1 \mid 2)=0,515$ ; isto significa que ocorrendo duas falhas, devemos utilizar um dispositivo aleatório (mecânico ou eletrônico) que apresente dois estados possíveis na saída ( $a_0, a_1$ ), sendo  $a_1$  com probabilidade 0,515 e  $a_0$  com probabilidade 0,485. Há situações em que as pessoas têm dificuldades em entender o uso destas regras de decisão e preferem ajustar o nível  $\alpha$  de modo a aplicar uma regra determinística; poderia se aceitar ( $a_0$ ) se  $x \leq 2$  e rejeitar ( $a_1$ ) se  $x > 2$ ; neste caso  $\alpha$  seria maior que 0,05 e  $\beta$  aumentaria um pouco.

## 5. Decisão Bayesiana

Embora no item anterior tenhamos resolvido o problema de decidir pela aceitação ou rejeição da hipótese  $H_0$ , dado um nível  $\alpha$  para o erro do tipo I, denominamos o tratamento aqui apresentado de "Um Problema de Decisão", decorrente do uso de Função Utilidade para exprimir as preferências do decisor sobre as

consequências de aceitar ou rejeitar os equipamentos. Sob esta ótica não há a necessidade de fixar um nível para o risco  $\alpha$  e o problema se resume em maximizar a Utilidade do Decisor (seus objetivos), usando o conhecimento a priori sobre a confiabilidade do equipamento através do critério de Bayes.

O espaço de ações é um conjunto discreto com dois elementos:  $a_0$ - aceitar e  $a_1$ - rejeitar. As regras de decisão são semelhantes ao caso anterior, sendo que aqui (Bayes) não se aplica regra randomizada (2). O espaço de ações poderia ter outros elementos ao invés de  $a_1$ ; prorrogar a FOE, aumentar o período de garantia, complementar o lote de sobressalentes, etc.

O Estado da Natureza corresponde à verdadeira taxa de falhas (ou MTBF) da população de equipamentos, ou seja  $\theta = \lambda$ . Assim, o conjunto  $\theta$  é a parte positiva de  $R$  (conjunto dos reais).

O problema é:  $\text{Min}_d r_d$

$$r_d = \int_0^{\infty} \pi(\theta) \left\{ \sum_{x=0}^{\infty} L(\theta, d(x)) P(x/\theta) \right\} d\theta$$

Uma vez que a regra de decisão é da forma  $d = \begin{cases} a_0 & \text{se } x \leq i \\ a_1 & \text{se } x > i \end{cases}$

Então teremos a função  $L(\theta, d(x)) = \begin{cases} L(\theta, a_0) & \text{se } x \leq i \\ L(\theta, a_1) & \text{se } x > i \end{cases}$

Substituindo na expressão para  $r_d$ , vem:

$$R_d = \int \pi(\theta) \left\{ \sum_{x=0}^i P(x/\theta) L(\theta, a_0) + \sum_{x=i+1}^{\infty} P(x/\theta) L(\theta, a_1) \right\} d\theta$$

Verificando os elementos desta expressão temos que:  $P(x|\theta)$  é Poisson;  $\pi(\theta)$  é a função densidade de probabilidade a priori e  $L(\theta, a_0)$  e  $L(\theta, a_1)$  são as funções perdas para o caso de aceitar ou rejeitar, respectivamente.

### 5.1. - Conhecimento a priori

Na formulação do problema foi utilizada a informação a priori de um engenheiro especialista em sistema de transmissão, com conhecimento sobre os equipamentos em consideração. Este conhecimento é função da experiência acumulada sobre o comportamento do equipamento em termos do desempenho de confiabilidade.

A obtenção deste conhecimento na forma de uma função de distribuição de probabilidade foi efetuada com base em um dos procedimentos já desenvolvidos e validados para estes casos foi aplicado o método dos intervalos equiprováveis (7), onde o especialista, inicialmente delimitou um intervalo no qual o estado da natureza poderia se encontrar; o método consiste em dividir o intervalo em duas partes equiprováveis, e prosseguir subdividindo os intervalos obtidos em outros intervalos equiprováveis.

A taxa de falhas da população de equipamentos sob avaliação, foi assumida como um valor no intervalo de 0,115 a 4,615; a probabilidade de que esteja fora deste intervalo é praticamente nula, segundo o conhecimento a priori.

Aplicando o método mencionado, foram obtidos os pontos da função distribuição apresentados na ilustração 3.1-1, juntamente com os gráficos da função distribuição e histograma de  $\pi(\theta)$ .

Para solução do problema, foi encontrada uma expressão analítica para a função  $\pi(\theta)$ , através de métodos para ajustamento da curva na ilustração 3.1-1. O modelo que mais se adequou foi a função logística:

$$F(\theta) = K \cdot \exp(-\beta/\theta).$$

Aplicando análise de regressão foram obtidos os coeficientes  $K=1,12$  e  $\beta=0,81$ ; com coeficiente de determinação  $R^2=0,994$ ; o teste F, para a hipótese de  $\beta=0$ , foi igual a igual a

1,146 e o teste Kolmogorov-Smirnov confirmou a hipótese de normalidade nos resíduos. Foi observado também não haver autocorrelação nos resíduos.

Derivando a função de distribuição  $F(\theta)$ , obtemos a função densidade de probabilidade:

$$\pi(\lambda)=\pi(\theta)=\frac{k\beta}{\theta^2} \exp\left(-\frac{\beta}{\theta}\right)=\frac{0.9}{\theta^2} \exp\left(-\frac{0.81}{\theta}\right)$$

## 5.2. - Função Utilidade

As funções perda  $L(\theta, a_0)$  e  $L(\theta, a_1)$  correspondem ao simétrico das funções utilidade  $u(\theta, a_0)$  e  $u(\theta, 1)$ , respectivamente.

A utilidade pode ser vista como uma função definida sobre várias conseqüências com as quais alguém é defrontado, medindo a desabilidade relativa destas conseqüências sobre uma escala numérica.

Assim, para obter a função utilidade, efetuamos uma pesquisa junto ao decisor envolvido com este problema, empregando técnicas que foram desenvolvidas para esta finalidade (2), (6), (7).

Nesta pesquisa o decisor responde a uma série de questões sobre escolhas diante de situações de risco, onde o mesmo quantifica suas preferências sobre o valor da taxa de falhas ( $\lambda=\theta$ ), para o caso de aceitá-la; obtemos a função  $u(\theta, a_0)$ . Depois, outras questões são aplicadas para o caso de rejeitar aqueles valores de taxa de falhas; obtemos a função  $u(\theta, a_1)$ .

Nestas questões, ao responder, o decisor reflete sobre as conseqüências que advirão da ação adotada relacionada àquele valor para o estado da natureza ( $\theta=\lambda$ ); considerando que o valor

especificado para o MTBF (ou  $\lambda$ ) foi utilizado para dimensionamento de sobressalentes, de equipes de manutenção e estimativa de custos operacionais, estes fatores serão afetados pelo valor da verdadeira taxa de falhas; no caso de rejeitar os equipamentos estando dentro do especificado, seria postergado o início da operação do sistema desnecessariamente; outros aspectos não detalhados aqui, são também considerados.

Para o caso da função  $u(\theta, a_0)$ , foram obtidos pontos ajustados como uma função linear; usando análise de regressão foram obtidos um coeficiente de determinação  $R^2=0,98$ , o teste  $F=629,6$ , com 1 grau de liberdade, resíduos distribuídos normalmente e não auto-correlacionados. A seguir a função obtida:

$$u(\theta, a_0) = -L(\theta, a_0) = -1,174\theta + 5,115$$

Outrossim, na função para o caso de rejeitar ( $a_1$ ), os pontos obtidos foram ajustados por uma função logística com  $R^2=0,98$ ,  $F=908,7$ , resíduos não auto-correlacionados e com distribuição normal; a expressão analítica obtida foi a seguinte:

$$U(\theta, a_0) = -L(\theta, a_1) = 4,9 \exp\left[\frac{-0,54}{\theta}\right]$$

### 5.3 - Solução

Conforme colocado acima a solução para o problema consiste em obter a regra de decisão ( $d=i$ ) para a qual o risco  $r_d$  é mínimo.

$$\text{Min}_i \int_a^b \pi(\theta) \left\{ \sum_{x=0}^i P(x/\theta) L(\theta, a_0) + \sum_{x=i+1}^{\infty} P(x/\theta) L(\theta, a_1) \right\} d\theta$$

Desenvolvendo, vem:

$$\text{Min}_i \int_a^b \pi(\theta) \left\{ L(\theta, a_1) + \sum_{x=0}^i P(x/\theta) [L(\theta, a_0) - L(\theta, a_1)] \right\} d\theta$$

Uma vez que o termo  $\pi(\theta)L(\theta, a_1)$  não depende de  $d=i$ , obtemos:

$$\text{Min}_i \left\{ \sum_{x=0}^i \frac{1}{x!} \int_a^b \pi(\theta) [L(\theta, a_0) - L(\theta, a_1)] e^{-\theta} e^x d\theta \right\}$$

O intervalo  $(a, b)$  corresponde a faixa de variação para  $\lambda$  na distribuição a priori. A solução que minimiza a expressão é  $i=2$ . Assim, para um número de falhas igual ou menor do que dois no período da FOE os equipamentos são aceitos; se for maior que dois a ação é rejeitar.

#### 5.4. - Comentários sobre a Regra de BAYES

A Regra de Bayes, permite que os objetivos do decisor, quanto as conseqüências de aceitar e de rejeitar, sejam atingidos, baseando-se no conhecimento a priori do especialista, e usando a função utilidade.

No item anterior foi aplicada a solução de Teste de Hipótese sob um risco  $\alpha$ , usando técnicas de estatística clássica, onde a base de informações está apenas nos dados obtidos, ou seja, no número de falhas; a escolha do nível de risco  $\alpha$  deve ser realizada, sendo uma decisão a ser tomada.

Neste item foi usada a Inferência Bayesiana, onde a base de informação está, no conhecimento a priori que se tem, combinado com os dados obtidos; a função utilidade do decisor e o critério de minimização do risco garantem a melhor decisão.

Esta abordagem evita o problema encontrado anteriormente, onde fica difícil especificar o risco  $\alpha \leq 0,05$  que levaria a rejeitar, com  $x > 2$ .

## 6. Estimadores para a Taxa de Falhas

Neste item a preocupação está em obter um estimador que, minimizando uma função perda, nos forneça uma estimativa do verdadeiro estado da natureza com base nos dados que se obtém, ou seja, com base no número de falhas.

Em problemas de estimadores, o espaço de ações é igual ao conjunto de estados da natureza ( $a = \theta$ ), e a melhor ação corresponderia a acertar  $d$  é o estimador; a função perda é tal que deve penalizar o erro.

### 6.1. - Função Perda

Em estimação esta função deverá refletir a discrepância entre a valor de  $\theta$  e o de sua estimativa  $a$ . Por esta razão a função perda  $l(\theta, d)$  e freqüentemente uma função da diferença:  $\theta - d$ ; (8).

Uma função muito utilizada é a perda proporcional ao valor absoluto do erro:  $L(\theta, d) = |\theta - d|$ ; quanto maior o erro, maior a penalidade para o estimador  $d$ .

Aplicaremos aqui a função perda quadrática da forma:

$L(\theta, d) = (\theta - d)^2$ ; neste caso, os pequenos erros são pouco penalizados e os grandes erros são muito penalizados. Uma variação desta função é:

$L(\theta, d) = (\theta - d)^2 / \theta$ ; neste caso, com  $\theta$  no denominador, a perda aumenta para valores pequenos de  $\theta$  ( $\theta < 1$ ) e é reduzida para grandes valores de  $\theta$ .

## 6.2. - Estimador Minimáx

Aplicaremos a função  $L(\theta, d) = (\theta - d)^2 / \theta$ ; esta, penaliza mais erros que ocorrem para pequenos valores de  $\theta$  do que para valores maiores. Esta função é interessante para este caso da taxa de falhas, pois se o verdadeiro valor de  $\theta$  for pequeno, haverá mais rigor pelo estimador e se  $\theta$  for grande o rigor será menor; se  $\theta$  for grande, já é indesejável, e a preocupação maior é detectar isto, e não o valor com precisão; no caso de ser pequeno aplica-se o raciocínio contrário.

O procedimento Minimax consiste em minimizar o pior que pode ocorrer; indica uma atitude pessimista por parte do decisor. O problema é escolher a regra  $d$  que minimize o máximo risco  $R_d(\theta)$ , para o valor de  $\theta$  no pior caso, ou seja:

$$\text{Min}_d \text{Max}_\theta R_d(\theta)$$

A função risco  $R_d(\theta)$  é o valor esperado da perda:

$$R_d(\theta) = \sum_{x=0}^{\infty} P(x|\theta)L(\theta, d(x)).$$

Substituindo as funções  $P(x|\theta)$  e  $L(\theta, d)$ , vem:

$$R_d = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{e^{-\theta} \theta^x}{x!} \frac{(\theta - d(x))^2}{\theta}$$

A solução de um problema Minimax é de maior complexidade matemática do que um problema Bayesiano. Aplicaremos um teorema que diz: Toda regra equalizadora admissível é uma regra Minimax (5).

Uma regra equalizadora é tal que o risco  $R_d(\theta)$  independe do valor de  $\theta$ , ou seja, o risco é o mesmo para qualquer valor de  $\theta$ . Uma regra admissível é tal, que é uma solução Bayes para uma determinada família de distribuição a priori. Assim, aplicaremos um procedimento que consiste em três etapas: usar uma equação de ponderação  $\zeta(\theta)$ , que fará o papel de uma distribuição a priori; depois, achar a regra de Bayes para a função  $\zeta(\theta)$ ; por fim, procurar uma regra equalizadora dentre as regras Bayes da família  $\zeta(\theta)$ , variando esta função  $\zeta(\theta)$ .

- a) Utilizaremos a função de ponderação  $\zeta(\theta) = 1$ , chamada “Improper Prior”.
- b) O risco da regra d com a função  $\zeta(\theta) = 1$ , será:

$$r_d = \int_0^{\infty} \zeta(\theta) \cdot R_d d\theta = \int_0^{\infty} \sum_x \frac{(\theta - d)^2}{\theta} \frac{e^{-\theta} \theta^x}{x!} d\theta$$

O problema Bayesiano é:

$$\text{Min}_d \int_0^{\infty} \sum_x \frac{(\theta - d)^2}{\theta} \frac{e^{-\theta} \theta^x}{x!} d\theta =$$

$$\text{Min}_d \int_0^{\infty} \sum_x e^{-\theta} (\theta - d)^2 \theta^{x-1} d\theta$$

O ponto de mínimo é obtido, derivando em relação a  $d(x)$  e depois igualando a zero.

$$\frac{\delta \int_0^{\infty}}{\delta \cdot d(x)} = 0 = \int_0^{\infty} e^{-\theta} (d - \theta) \theta^{x-1} d\theta$$

$$\text{Donde: } d(x) = \frac{\int_0^{\infty} \theta^x e^{-\theta} d\theta}{\int_0^{\infty} \theta^{x-1} e^{-\theta} d\theta} = \frac{x!}{(x-1)!} = x = d^*$$

A integral acima tem a forma de função Gama, cuja solução é da forma fatorial indicada acima. Portanto, a regra de decisão de Bayes para a “improper prior”  $\zeta(\theta) = 1$ , é de  $d(x) = x$ ; temos então uma regra admissível para  $\zeta = 1$ .

c) Para encontrar a regra equalizadora, encontramos a expressão para o risco quando a regra é a BAYES  $d^*$  acima, verificamos quando o risco independe de  $\theta$ ; a função risco é o valor esperado da perda:

$$R_{d^*}(\theta) = E(L(\theta, d^*) | \theta) = E((\theta - x)^2 | \theta)$$

$$R_{d^*}(\theta) = \frac{\theta^2 - 2\theta \cdot E(x|\theta) + E(x^2|\theta)}{\theta} = \frac{\theta^2 - 2\theta^2 + \theta^2 + \theta}{\theta} = 1$$

então,  $R_{d^*}(\theta)$  é independente de  $\theta$  e portanto, a regra encontrada é equalizadora. Temos então a regra Minimáx  $d(x) = x$ .

Assim, o estimador Minimax para a taxa de falhas é:  $\lambda = x$ ; se houver uma falha a estimativa é de que a taxa de falhas seja igual a um. Chamamos atenção para as características deste estimador, o qual adota uma postura de pessimismo na minimização da função perda, cuja filosofia já foi descrita.

### 6.3 - Estimador Bayesiano

Aplicaremos a função perda quadrática:  $L(\theta, d) = (\theta - d)^2$ .  
 O conhecimento a priori é o mesmo obtido anteriormente:

$$\pi(\theta) = \frac{0.8}{\theta^2} e^{-\frac{0.81}{\theta}} \sum$$

O problema, então, consiste em minimizar o risco escolhendo d:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_d \int_a^b \sum_x (\theta - d)^2 P(x/\theta) \pi(\theta) d\theta \\ & \text{Min}_d \int_a^b \sum_x (\theta - d)^2 \frac{e^{-\theta} e^x}{x!} \frac{0.9}{\theta^2} \exp\left(-\frac{0.81}{\theta}\right) d\theta \\ & \text{Min}_d \int_a^b \sum_x (\theta - d)^2 e^{-\theta} e^{x-2} \exp(-0.81/\theta) d\theta \\ & dx = \frac{\int_a^b e^{x-1} e^{-\theta} e^{-\frac{0.81}{\theta}} d\theta}{\int_a^b e^{x-2} e^{-\theta} e^{-\frac{0.81}{\theta}} d\theta} \end{aligned}$$

A expressão acima foi resolvida adotando método de integração numérica para alguns valores de x. O quadro abaixo mostra o resultado para valores de zero até onze falhas.

x	0	1	2	3	4	5
λ estimado	0,716	1,1	1,615	2,16	2,64	3,03
x	6	7	8	9	10	11
λ estimado	3,32	3,54	3,7	3,8	3,9	4

Vemos mais uma vez, no princípio Bayesiano, a combinação da informação a priori  $\pi(\theta)$  com os dados observados  $x$ . Não havendo falhas no período, a estimativa é de que a taxa de falhas é 0,716; se o número de falhas é  $x=6$ , a estimativa é de que a taxa de falhas é 3,32.

Observamos o forte efeito do conhecimento a priori, principalmente nos casos em que o número de falhas é grande, apresentando uma estimativa pequena para  $\lambda$ .

#### **6.4. - Comentários sobre Estimadores**

O problema de escolher um estimador com base numa função perda também é um problema de decisão, conforme tratado acima. O decisor deverá escolher a função perda conforme seja sua preferência sobre o tratamento do erro  $|\theta - a|$ . O uso ou não de conhecimento a priori é outra escolha considerando as filosofias de otimização Bayesiana e Minimax.

Pode-se utilizar outros estimadores, tal como o “Estimador de Máxima Verossimilhança” (EMV), onde não é considerada a noção de função perda; é mais um problema de inferência do que de decisão, ou seja, a preocupação é fazer a melhor medida, e deve-se ter em mente a preocupação de não se utilizar um estimador tendencioso. O EMV para a taxa de falhas (Poisson) é a média amostral  $X$ , do número de falhas em vários período de observação. É necessária a realização de testes para confirmar as hipóteses assumidas para o EMV.

Um estimador utilizado com freqüência para taxa de falhas de um equipamento é  $\lambda = n/N\Delta t$ , onde  $n$  é o número de falhas na população de  $N$  equipamentos durante o período  $\Delta t$  de observação. Assim, o estimador da taxa de falhas da população de equipamentos para o período de observação é o número de falhas  $n$ .

Se o período de observação ou o número de equipamentos  $N$  não forem suficientemente grandes, a chance de obter valores inadmissíveis é alta. A escolha deste caminho equivaleria a um decisor adotar os critérios do Estimador Minimax, visto que é o mesmo.

## **7. Conclusões**

O planejamento da Operação e Manutenção de Sistemas requer o uso de informações sobre a confiabilidade dos equipamentos que o constituem; como parte deste planejamento tem sido efetuado o dimensionamento de sobressalentes e de equipes de manutenção, estimativa de custos operacionais, etc. As informações utilizadas são fornecidas pelos fabricantes, os quais geralmente especificam o MTBF (ou taxa de falhas).

Tem havido uma preocupação crescente quanto à segurança de uso destes dados, até mesmo na decisão de aquisição de equipamentos, e a necessidade de prever, em contrato, um teste de aceitação de confiabilidade, demanda um estudo mais profundo sobre o assunto.

O estudo aqui apresentado foi utilizado para avaliar a confiabilidade de equipamentos. O procedimento formulado no item sobre Teste de Hipótese Convencional, foi detalhado em outro capítulo deste livro. O procedimento formulado sobre o problema de decisão, com tratamento Bayesiano, ajudou a encontrar o número de falhas que seria aceitável para a empresa, considerando os seus objetivos e o seu conhecimento. O tratamento apresentado para Estimadores de taxa de falhas fornece enfoques diferentes para a maneira de estimar a confiabilidade com base nas falhas observadas.

Um problema amplamente discutido com o fabricante foi a consideração de que os equipamentos recebidos já haviam passado por um Controle de Qualidade (em fábrica) eficiente, com testes de

Burn-in e Debugging, de modo a quase eliminar o problema de “mortalidade infantil”. Assim, a hipótese de taxa de falhas constante permitiu tratar o número de falhas  $x$  como um Processo de Poisson. No caso do tipo de falha “prematura” [3], devido à mortalidade infantil (causada por erros no projeto ou no processo de fabricação), ser considerada como significativamente presente no período de observação, então, devemos acrescentá-la ao modelo, com a correspondente distribuição e parâmetros a serem fornecidos pelo fabricante.

Em nosso caso específico, foi encontrado um caminho mais fácil: uso do modelo de Poisson e análise de cada falha ocorrida para detectar as causas; sendo considerada “aleatória pura” ou “casual” [3], então é computada para efeito de avaliação; sendo considerada como oriunda de problemas de projeto ou de processo de fabricação (mortalidade infantil), então não é computada para efeito da avaliação, sendo outro problema a ser resolvido pelo fornecedor.

Finalizando, ao comparar os três procedimentos apresentados, verificamos que a solução do problema de decisão é um tratamento formal, mais completo. O Teste de Hipótese requer a determinação prévia do risco  $\alpha$ , tornando o procedimento relativamente incompleto no sentido formal. O uso de Estimadores, fornece uma medida da confiabilidade, e a decisão dependerá ainda, da determinação de referencial e comparações para avaliação final.

## Bibliografia

- [1] ALMEIDA, A. T. e SOUZA, F. M. C. , Desenvolvimento de uma Metodologia de Avaliação de Desempenho de Sistemas de Telecomunicações, IIIº SNTEEE, Curitiba, PR, 1985.
- [2] LINDGREN, B. W., Elements of Decision Theory, The Macmillan Company, New York, 1971.
- [3] BAZOVSKY, IGOR, Reliability and Practice, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1961.
- [4] BILLINTON, ROY and ALLAN, RONALD N., Reliability Evaluation of Engineering Systems, Pitman Advanced Publishing Program, 1983.
- [5] FERGUSON, THOMAS S., Mathematical Statistics- A Decision Theoretic Approach, Academic Press, 1967.
- [6] HOEL, PAUL G. Estatística Matemática, Editora Guanabara Dois, S. A., Rio de Janeiro, 1980, 4ª Edição- Tradução.
- [7] RAIFFA, HOWARD, Decision Analysis, Addison- Wesley Publishing Company, 1970.
- [8] DeGROOT, MORRIS H., Optimal Statistical Decision, Mc Graw-Hill, 1970.
- [9] Almeida, A. T., [1986] - *Avaliação de Desempenho de Sistemas*, Publicações Técnicas CHESF
- [10] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] – *Pesquisa Operacional Aplicada na Avaliação de Desempenho*. VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica; Mai/1986; São Paulo-SP: SP/GTL/02
- [11] Almeida, A. T. e Souza, F. M. C. de, [1986] – *Bayes-Like Decisions in Reliability Engineering. International Conference on Information Processing and Management of*

*Uncertainty in Knowledge-Based Systems*; June 30-July 4, 1986; Paris-France. Paris 87-90

- [12] Carter, A. D. S., [1986] - *Mechanical Reliability*, MacMillan.
- [13] Kapur, K. C., [1977] - *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc.
- [14] O'Connor, P. D. T., [1985] - *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd.



# SELEÇÃO DE CONTRATOS DE MANUTENÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

*Adiel Teixeira de Almeida  
Rogério Augusto Coelho Fernandes  
Caroline Maria Guerra de Miranda*

## 1. Introdução

O problema tratado está relacionado ao estabelecimento de critérios para Contratação de Manutenção. No atual momento de restrições de recursos, com a tendência de contratação de serviços ou terceirização, a contratação de manutenção tem sido objeto de análise e discussão nas Empresas e em várias reuniões em congressos nacionais.

Os gerentes tem se defrontado com diversas dúvidas, algumas de natureza estrutural, outras de natureza específica. A questão específica a ser objeto de estudo se refere aos critérios de custo e desempenho a serem estabelecidos na contratação. Estes critérios caracterizam opções de prazos de atendimento pela contratada e os custos associados ao contrato. Para cada condição de prazo a ser estipulada há um custo de contrato de manutenção. Várias regras são estabelecidas. Por exemplo, em geral, estabelece-se um tempo de atendimento razoavelmente pequeno e para alguns casos específicos de falhas os prazos são bem maiores (cláusulas contratuais); estes casos, geralmente, envolvem altos custos de provisão de sobressalentes ou de equipes disponíveis para um atendimento mais imediato.

A questão para o decisor está relacionada às opções de prazo e custo para estabelecer o melhor contrato. Como analisar

este problema, considerando uma modelagem das conseqüências para o contexto específico? A abordagem estudada envolve modelagem de preferências nas variáveis que representam os objetivos, e a modelagem probabilística para quantificar as chances de ocorrência das diversas alternativas.

## **2. Decisão Multicritério**

Os referenciais de escolha num processo decisório são relevantes na definição do Sistema de Apoio à Decisão que será utilizado, há problemas decisórios onde o resultado esperado é aquele que satisfaça um conjunto de critérios, onde os decisores almejam alcançar mais de um objetivo. A este tipo de escolha com mais de um critério chamamos de multicritério, multiatributo ou multiobjetivo.

Num processo decisório podemos ter que escolher apenas uma ação que satisfaça mais de um critério de escolha - critério preliminar-, há de se prever que dificilmente o resultado esperado maximizará todos os critérios, e este pode não ser o objetivo do decisor, numa decisão multicritério há uma relação complexa de benefício-perda entre os critérios, cada ação implicará numa combinação própria, estas combinações serão comparadas, e só então é feita a escolha final, o critério de escolha final - critério final- não é explícito objetivamente, a comparação, por vezes, será difícil de ser encarada de forma objetiva, há problemas em que comparar-se-ão; valores quantitativos com qualitativos, de diferente ordem de grandeza, ou ainda de unidades diferentes, o critério de escolha final será a preferência, a ação adotada será a combinação preferida, esta faz parte do aspecto cognitivo do decisor ou da modelagem cognitiva de um grupo de decisores. A modelagem de preferências do decisor é utilizada nas diversas abordagens de uma decisão multicritério.

Há vários métodos de decisão multicritério. Alguns métodos fazem uma decomposição hierárquica do conjunto de ações possíveis, dividindo-a em categorias pré-definidas; melhores ações, piores ações, ações para reconsideração, como resultado pretende encontrar um sub-conjunto pequeno e restrito de ações satisfatórias, se possível apenas uma ação. Este conjunto de ações satisfatórias pode ainda ser tratado com outras ferramentas de um sistema de apoio a decisão, como simulação e análise de cenários.

A ordenação entres as alternativas pode ser realizada com a ajuda dos conceitos de dominância e eficiência. Uma alternativa domina a outra, a domina b, se  $g_j(a) \geq g_j(b)$ ,  $j=1,2,\dots,n$ , na maior parte das vezes as relações de dominância de forma restrita são poucas ou inexistente. As relações de dominância, simplificando o problema, podem ser enriquecidas. Uma alternativa é eficiente quando não é dominada por nenhuma outra ação.

A comparação Inter Critérios implica que dentro de cada critério a modelagem de preferências será estruturada através de comparação entre duas ações, todas as ações dentro de cada critério será comparada em pares, vamos supor que num conjunto A de ações possíveis, temos as ações { a, b, c}, para um critério x os pares comparados serão {[a,b], [a,c], [b,c]}. O decisor pode expressar preferência (P), quando prefere uma ação a outra, indiferença (I), quando não há preferência entre as duas e incomparabilidade (J), quando o decisor tem dificuldade em compará-las, não expressando nem preferência nem indiferença.

Na comparação entre Critérios, a preferência do decisor, analisando agora todo o conjunto de ação para todos os critérios é estruturada através da divisão em classes, esta relação é realizada através de uma análise de “outrankink”, (S), a relação também é binária, uma alternativa irá desclassificar a outra se houver uma relação de preferência ou indiferença entre elas, Esta desclassificação implica que  $g(a) \geq g(b)$ .

Se houver uma única ação eficiente a escolha será esta ação, no caso da obtenção de um sub-conjunto de ações, podemos descrever as conseqüências e utilizar mais uma ferramenta de apoio à decisão a simulação para prever vários cenários auxiliando o decisor na escolha.

## **2.1. - Teoria da Decisão**

A construção dos Modelos de Decisão é baseada em Teoria da Decisão, incluindo Teoria da Utilidade Multiatributo para modelar as preferências dos decisores. A metodologia, em seu enfoque Bayesiano permite ainda tratar as incertezas inerentes aos problemas a serem analisados através do uso de conhecimento a priori de especialistas no sistema de produção.

Os problemas são tratados sob a ótica dos ingredientes básicos em Teoria da Decisão: Estado da Natureza ( $\theta$ ), ações que o decisor pode adotar ( $a$ ), Conseqüências -  $\mathcal{P}$  - (Keeney e Raiffa, 1976; Bel et al, 1988; Howard, 1988; Berger, 1985; Smith, 1988). O comportamento do Estado da Natureza será avaliado com base na análise estatística dos dados do sistema, incorporando também o conhecimento a priori dos especialistas através de distribuição de probabilidade a priori  $\pi(\theta)$ . (Berger, 1985; Smith, 1988).

A definição de ações é algumas vezes uma das etapas mais difícil do processo decisório. E que muito pouco vem sendo pesquisado para esta importante etapa do processo decisório. Um conjunto de ações é considerado um conjunto de decisões a ser explorado durante o processo decisório. E pode ser definido de duas formas (Vincke, 1992): a) Interpretando seus elementos quando o mesmo é finito e suficientemente pequeno para que possa ser enumerável; b) Determinando as propriedades as quais caracterizam seus elementos quando o conjunto é infinito ou finito tão grande que não seja enumerável. É importante, salientar ainda a

distinção quando um conjunto de ações é considerado globalizado ou fragmentado. O primeiro pode ser definido como um conjunto de ações em que cada elemento pertencente ao mesmo exclui um outro elemento, já o segundo é assim definido quando o processo de decisão resulta da combinação que envolve vários elementos do conjunto de ações (Vincke, 1992).

O elemento Conseqüência representa os resultados que podem ser obtidos, e sobre os quais se estabelecem os objetivos. Sobre o conjunto de conseqüências é desenvolvida a modelagem de preferências através de uma função Utilidade  $U(C)$  (Keeney e Raiffa, 1976; Bel et al, 1988). Esta informação será incorporada na forma de função utilidade Multiatributo (Keeney e Raiffa, 1976; Keeney, 1982). Esta função é obtida através de procedimentos de elicitación já aplicados anteriormente junto a decisores da CHESF para o tratamento de outros problemas (Almeida et al, 1992b; Almeida, 1996).

A robustez dos modelos é testada através de procedimentos que envolvem análise de sensibilidade aos parâmetros estimados (Kadane, 1984).

## **2.2. - Teoria da Utilidade Multiatributo**

A modelagem da estrutura de preferências é um dos aspectos mais importantes na tomada de decisão. A preferência é considerado como um elemento essencial na vida de qualquer indivíduo, assim como a comunicação. Sua modelagem é uma etapa indispensável não apenas para tomar decisões, mas também na política econômica, na sociologia, na psicologia, na pesquisa operacional, etc. Uma das principais e mais importante propriedades no estudo das preferências (Vincke, 1992) é quando o decisor é levado a comparar entre duas determinadas ações ( $a_1, a_2$ ) de um respectivo conjunto de ações, esta capacidade de comparar resultará neste trabalho em um dos dois caminhos a seguir:

1. Preferência por uma das duas ações;
2. Indiferença entre as duas ações.

Estes dois caminhos podem ser representados através de símbolos da forma abaixo:

$a_1Pa_2$  se  $a_1$  é preferível a  $a_2$ , ou  $a_2Pa_1$  em caso contrário;

$a_1Ia_2$  se  $a_1$  é indiferente a  $a_2$ .

Preferência e Indiferença, estas duas relações são respectivamente os conjuntos de par ordenados  $(a_1, a_2)$ , desde que  $a_1Pa_2$  ou  $a_1Ia_2$ . Estas são as duas relações que serão mais encontradas durante o processo de modelagem da estrutura de preferências.

A Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT - Multiple Attribute Utility Theory) é uma abordagem multicritério para problemas de decisão, particularmente em situações de incerteza (Keeney e Raiffa, 1976). MAUT surgiu da Teoria da Utilidade, a qual trata da quantificação de preferências do decisor para valores de uma única variável (conseqüência). Neste estudo uma variável típica está relacionada ao custo C. Neste caso a função utilidade de C,  $U(C)$  estabelece valores para cada custo dentro da faixa de interesse. A Teoria da Utilidade surgiu associada com a Teoria da Decisão (Berger, 1985; Raiffa, 1970; Bell et al, 1977).

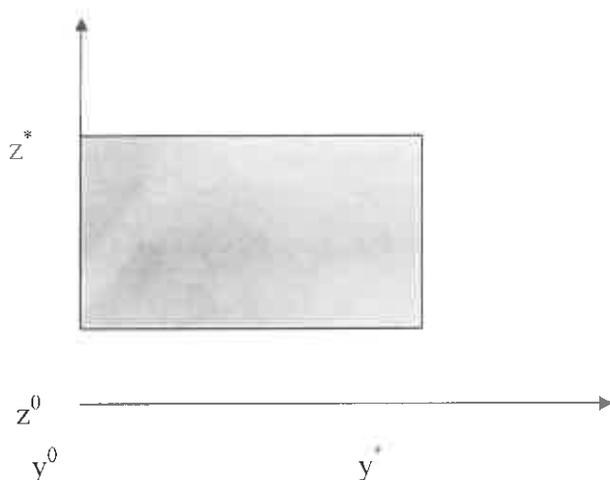
Dado um problema de decisão avaliamos a função utilidade  $u( )$  para dois atributos Y e Z que será representada por  $u(y, z)$ , sendo  $(y, z)$  um ponto qualquer no espaço de conseqüências. Para cada atributo são dados um conjunto de alternativas  $Y=(y^1, y^2, \dots, y^n)$  e  $Z=(z^1, z^2, \dots, z^n)$ .

A alternativa menos preferível será denominada  $y^0$  e  $z^0$  e a alternativa mais preferível por  $y^*$ ,  $z^*$ , desta forma as possíveis

conseqüências serão notadas por um conjunto chamado espaço de conseqüências

$Y \times Z = \{(y^0, z^0), (y^0, z^1), (y^1, z^0), \dots, (y^*, z^*)\}$ , figura a seguir.

Se  $(y^0, z^1)$  é preferível a  $(y^0, z^0)$ , então  $(y^0, z^1) P (y^0, z^0)$ ; se  $(y^0, z^1)$  é indiferente a  $(y^0, z^0)$ , então  $(y^0, z^1) \sim (y^0, z^0)$ ; se temos uma loteria 50-50, então



**Figura - espaço de conseqüências.**

Um aspecto importante da aplicação da Teoria é a avaliação e estudo das condições de independência em preferência. A forma de avaliação corresponde a encontrar uma forma analítica para função utilidade multiatributo. Estas funções apresentam formas funcionais se na estrutura de preferências do decisor verificamos os axiomas de independência para os atributos. O ideal seria nós obtermos uma representação da função utilidade da forma  $u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n))$ .

A independência em utilidade detecta uma independência das preferências do decisor entre os atributos, de maneira a simplificar bastante os cálculos para obtenção da função utilidade. Podemos considerar que um atributo é independente de outro em utilidade quando as preferências condicionais para loterias no primeiro atributo não dependem de um nível particular de  $z$ .

A Independência Aditiva consiste em outra condição mais restritiva para a estrutura de preferências do decisor e leva a forma da Função Utilidade Aditiva:

$$u(y, z) = K_y u_y(y) + K_z u_z(z),$$

onde  $K_y$  e  $K_z$  são constantes de escala positivas,

Quando  $Y$  e  $Z$  são mutuamente independentes em utilidade então  $u(y, z)$  pode ser expressa pela representação multilinear.

$$u(y, z) = K_y u_y(y) + K_z u_z(z) + K_{yz} u_y(y) u_z(z); \text{ ou}$$

$$u(y, z) = u(y, z^0) + u(y^0, z) + K u(y, z^0) u(y^0, z)$$

onde:

a)  $u(y, z)$  é padronizado por  $u(y^0, z^0)=0$  e  $u(y^1, z^1)=1$

b)  $u_y(y)$  é a função utilidade condicional em  $Y$  padronizado por  $u_y(y^0)=0$  e  $u_y(y^1)=1$

c)  $u_z(z)$  é a função utilidade condicional em  $Z$  padronizado por  $u_z(z^0)=0$  e  $u_z(z^1)=1$

d)  $K_y = u(y^1, z^0)$

e)  $K_z = u(y^0, z^1)$

f)  $K_{yz} = 1 - K_y - K_z$  e  $K = K_{yz} / K_y K_z$

O procedimento para elicitaco da função utilidades multiatributo pode ser descrita em cinco etapas (Keeney e Raiffa, 1976):

1. Introduzir as terminologias e idéias a serem utilizadas durante todo o processo de elicitação;
2. Identificar as relevantes suposições de independência entre os atributos que irão compor a função utilidade multiatributo;
3. Inferir as funções de utilidades condicionais dos respectivos atributos ou curvas de isopreferência;
4. Inferir as constantes de escalas que compõem a função utilidade multiatributo;
5. Checar o resultado obtido através de testes de consistência e de repetição.

A primeira etapa deste consiste em familiarizar o decisor com a metodologia a ser aplicada no processo de elicitação. É realizada após toda uma preparação junto ao decisor para que o mesmo possa entender todo o procedimento, assim como estar motivado para participar do mesmo.

A etapa referente a independência tem por objetivo verificar a existência de interdependência entre os atributos segundo a preferência do decisor, ou seja checar se um atributo é independente do outro e vice-versa. Pois tal comprovação torna o processo de elicitação menos complexo, devido a certas propriedades e características comuns as funções utilidade Aditiva, funções em que os atributos são interdependentes.

Após a etapa anterior o analista que realiza o processo de elicitação faz a inferência da função utilidade condicional de cada um dos atributos,  $u_Y(y)$  e  $u_Z(z)$ , que vai compor a função utilidade multilinear (Keeney e Raiffa, 1976):

$$u(y, z) = k_Y u_Y(y) + k_Z u_Z(z) + k_{YZ} u_Y(y) u_Z(z)$$

O próximo passo é determinar as constantes de escalas,  $k_Y$ ,  $k_Z$  e  $k_{YZ}$ , que compõem a função utilidade multilinear. A idéia

básica é obter as constantes através de um sistema de três equações independentes e três incógnitas.

E por último realiza-se o cheque de consistência, existe inúmeros cheques de consistência que podem ser usados para detectar erros que possam existir na função utilidade do decisor. Por erro se entende que a função utilidade inferida junto ao decisor não representa as suas preferências quando testada para exemplos hipotéticos.

Após transcorridas todas estas etapas com sucesso, o analista pode apresentar a função utilidade multilinear que representa a estrutura de preferência do decisor para o problema em estudo. Alternativa a etapa 2 pode indicar que a estrutura de preferências do decisor está relacionada a uma função aditiva.

### **2.3. - Resultados do Processo de elicitación**

A aplicações desenvolvidas para os Modelos de Decisão foram baseadas na modelagem de preferências dos decisores, mais especificamente na elicitación de função utilidade dos decisores em relação ao custo  $C$  e a variável risco de quebra de estoque  $\alpha$  para o primeiro problema analisado. Os resultados indicaram independência aditiva, permitindo a aplicação da função utilidade aditiva para  $U(\alpha, C)$ .

Para o problema de contratação de manutenção, foram desenvolvidas mais de uma aplicação sendo encontrado para a maioria dos decisores a condição de independência aditiva, levando a aplicação da função utilidade aditiva para  $U(TI, C)$ . Alguns casos indicaram apenas independência em utilidade entre os atributos, levando a aplicação da função utilidade multilinear para  $U(TI, C)$ .

### **3. Modelos de Decisão para Seleção de Contratação de Manutenção**

Relativamente pouco trabalho tem sido encontrado na literatura sobre a questão de contratação de manutenção. Observa-se que os trabalhos encontrados na literatura não exploram os recursos de decisão multicritério para apoiar o decisor na seleção de alternativas de contrato.

Parte dos trabalhos desenvolvidos associam este problema de contrato com outros, tais como garantia (Ritchken & Tapiero, 1986; Jammernegg & Kischka, 1994)). Kennedy, 1993 apresenta alguns aspectos qualitativos relacionados a contratos. Badger & Kashiwagi (1991) apresentam algumas considerações sobre procedimentos e condições a serem adotados em contratos de manutenção. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresentam considerações qualitativas sobre o problema sem tratar diretamente a questão de apoio a decisão. Page (1994) apresenta uma abordagem quantitativa para estabelecer a seleção de contratos analisando o comportamento do decisor em relação a aversão ou propensão ao risco, sem considerar a questão multicritério, típica neste tipo de problema

Os gerentes tem se defrontado com diversas dúvidas, algumas de natureza estrutural, outras de natureza específica. A questão específica que foi objeto de estudo se refere aos critérios de custo e desempenho a serem estabelecidos na contratação. Estes critérios caracterizam opções de prazos de atendimento pela contratada e os custos associados ao contrato. Para cada condição de prazo a ser estipulada há um custo de contrato de manutenção. Várias regras são estabelecidas. Por exemplo, em geral, estabelece-se um tempo de atendimento razoavelmente pequeno e para alguns casos específicos de falhas os prazos são bem maiores (cláusulas contratuais); estes casos, geralmente, envolvem altos custos de

provisão de sobressalentes ou de equipes disponíveis para um atendimento mais imediato.

A questão para o decisor está relacionada às opções de prazo e custo para estabelecer o melhor contrato. Como analisar este problema, considerando uma modelagem das conseqüências para o contexto específico? A abordagem a ser estudada envolve modelagem de preferências nas variáveis que representam os objetivos, e a modelagem probabilística para quantificar as chances de ocorrência das diversas alternativas.

Assim, para a modelagem de preferências é aplicada uma função utilidade multiatributo, baseada em estudo realizado com decisores e gerentes atuando na área de manutenção. Aspectos de aplicação e uso desta abordagem são descritos.

A modelagem probabilística é efetuada com base no conhecimento a priori sobre a Empresa a ser contratada, e sobre o desempenho dos equipamentos objeto da contratação. Para os equipamentos é considerada a característica de confiabilidade do mesmo. Para a Empresa, considera-se a característica de seu desempenho em termos de resposta na manutenção. Assim, a questão da Empresa é formulada, tecnicamente, como uma característica de manutenibilidade.

A partir da estrutura de preferências do decisor, representada pela função utilidade e da formulação probabilística do desempenho dos equipamentos e da Empresa a ser contratada, são estabelecidos os critérios mais adequados para a contratação em termos de compromisso de tempos de resposta e custos associados, de modo a atender aos objetivos da Contratante.

### **3.1. - O Problema Básico**

Vários problemas de contratação de manutenção podem ser analisados na abordagem desenvolvida. Assim, alguns problemas

básicos são apresentados para formulação e desenvolvimento do estudo.

As alternativas de ação no problema de decisão estão relacionadas às opções contratuais, envolvendo: critérios de atendimento (envolve especialmente o prazo constante no contrato), níveis de desempenho, custos e outros aspectos associados.

O desempenho pode ser representado pela disponibilidade do sistema em questão (O'Connor, 1985). A disponibilidade envolve as características: confiabilidade e a manutenibilidade (Barlow & Proschan, 1967; Goldman & Slattery, 1977). A disponibilidade pode ser representada pelo Tempo de interrupção no sistema (TI). A variável aleatória TI corresponde a uma das consequências no problema de decisão. TI está diretamente relacionada ao estado da natureza (Berger, 1985; Raiffa, 1970; Smith, 1988) que corresponde a confiabilidade e a manutenibilidade.

No caso da confiabilidade, admite-se que a situação é a mesma para cada opção de contrato. Isto é, cada opção de contrato envolve os mesmos equipamentos. Assim, este fator não influi na escolha entre as alternativas de contrato, para o tipo de problema proposto.

O estado da natureza para este problema corresponde, então, à manutenibilidade da empresa contratante. Para a manutenibilidade é considerado o modelo exponencial, sendo representada por  $u$ , que é o inverso do MTTR -tempo médio para reparo - (Goldman & Slattery, 1977).

Portanto, este problema básico consiste na escolha de um contrato de manutenção, dentre várias propostas de contrato, onde a diferença básica está no custo do contrato e na condição de tempo de atendimento para efetuar a manutenção após a reclamação.

Este tempo de atendimento  $T_a$  está relacionado ao tempo de interrupção no sistema.  $T_I$  também está relacionado ao tempo para reparo  $TTR$ , que segue uma distribuição de probabilidade de acordo com a mantabilidade do fornecedor do serviço. Ou seja:

$$T_I = T_a + TTR.$$

Assim, cada opção de contrato terá um  $T_a$  e um custo  $C$  específico.

As alternativas de ação no problema básico decisão consistem no tempo de atendimento  $T_a$ . Assim, o conjunto de ações é representado por  $a_1, a_2, \dots, a_n$ .

Em relação as consequências no problema de decisão, dois atributos são considerados: os custos do contrato e a disponibilidade do sistema, representada pelo tempo de interrupção do sistema.

No processo decisório um elemento fundamental é a modelagem de preferências, donde se obtém a função utilidade  $U(T_I, C)$ . A função  $U(T_I, C)$  agrega as utilidades unidimensionais para os dois atributos:  $U(T_I)$  e  $U(C)$ .

Através da associação probabilística entre a combinação de  $(\theta, a)$  e as variáveis consequências  $T_I$  e  $C$ , considerando o modelo probabilístico exponencial para mantabilidade, obtém-se a função utilidade  $U(\theta, a)$ . No caso,  $\theta$  representa os dois aspectos do estado da natureza:  $\lambda$  e  $u$ .

A solução é encontrada para a ação que maximize a utilidade esperada  $U(\theta, a)$ . A utilidade esperada para  $U(\theta, a)$  é obtida em função da probabilidade a priori  $\pi(u)$ , fornecendo assim uma solução Bayesiana para o problema (Martz & Waller, 1982). Ou seja:

$$\text{Max}_a \int_u U(u, a) \pi(u) du$$

### **3.2. - Modelos de Decisão para Contratação de Manutenção**

Vários problemas podem ser analisados na abordagem desenvolvida (Almeida, 1997, Almeida, 2000). Três tipos básicos de problemas foram encontrados, em função de praticidade ou exigências de implementação. Estes problemas foram classificados em função da forma como o estado da natureza relativo a manutenibilidade é tratado, considerando também o tempo de atendimento  $T_a$ , também chamado de tempo de atraso. A seguir a classificação e as características dos problemas analisados:

- Tempo de atraso  $T_a$  fixo; neste caso  $TI = T_a + TTR$ , sendo que  $T_a$  é considerado fixo.
- Tempo de atraso  $T_a$  aleatório; neste caso  $TI = T_a + TTR$ , sendo que  $T_a$  é considerado uma variável aleatória, seguindo o modelo exponencial com parâmetro  $w$ .
- Tempo de atraso implícito, neste caso  $T_a$  é considerado parte integrante de  $TTR$ , de modo que  $TI = TTR$ .

Cada um destes problemas pode ser analisado a partir de duas considerações para a função utilidade multiatributo relativa a  $(TI, C)$ : função aditiva e multilinear. A seguir é apresentada a formulação para cada modelo decisão já desenvolvido (Almeida, 2000), considerando-se as seguintes hipóteses comuns:

- I. Será admitido que  $TI$  e  $C$  apresentam independência estatística.
- II. Admitir-se-á que a função densidade de probabilidade estabelecida para o tempo de interrupção do sistema segue um comportamento exponencial.

III. Foram consideradas as seguintes funções condicionais (a partir de avaliações de várias condições de comportamento de decisores neste contexto (Almeida, 2000):

$$U(TI) = e^{-A_1 TI} \text{ e } U(C) = e^{-A_2 C} .$$

Em função das hipóteses I acima, tem-se: que TI e C são variáveis aleatórias independentes entre si, então:  $\Pr((TI, C) | (\theta, a)) = \Pr(TI, C) + \Pr(TI)\Pr(C)$ .

### **3.3. - Modelo 1 - Tempo de Atraso Fixo**

Neste modelo de decisão considera-se a seguinte hipótese: para cada contrato de manutenção será admitido um tempo de atendimento (TA) fixo, e será estabelecido um custo( $C_j$ ) para cada ação( $a_j$ ) adotada.

Se ambos os atributos envolvidos, TI e C, apresentam independência aditiva,  $U(TI)$  e  $U(C)$ , pode-se utilizar uma função multiatributo aditiva,  $U(TI, C)$ , dada por:

$$U(TI, C) = K_{TI} U(TI) + K_C U(C)$$

Desenvolvendo tem-se (Almeida, 2000):

$$U(\theta, a_j) = \frac{\mu K_{TI} e^{-A_1 TA}}{(A_1 + \mu)} + K_{Cj} e^{-A_2 Cj}$$

A solução é encontrada para a ação que maximizar o valor da utilidade esperada  $U(\theta, a_j)$ , para tanto, utilizamos o conhecimento a priori do especialista,  $\pi(\theta)$ , sobre o estado da natureza  $\theta = u$ . Tem-se:

$$\text{Max } E U(\theta, a_j) = \int U(\theta, a_j) \pi(\theta) d\theta .$$

### **3.4. - Modelo 2 - Tempo de Atraso Aleatório**

Neste modelo de decisão considera-se a seguinte hipótese: para cada contrato de manutenção será admitido um tempo de atendimento ( $TA_i$ ), que é uma variável aleatória com distribuição exponencial e será estabelecido um custo ( $C_i$ ) para cada ação ( $a_i$ ) adotada.

Através do teorema para adição de variáveis aleatórias independentes, dado que  $TI = TA + TTR$ :

$$\Pr(TI) = \frac{\omega\mu}{\mu - \omega} (e^{-\omega TI} - e^{-\mu TI}), \text{ para } TI \geq 0$$

Para hipótese de utilidade aditiva, donde desenvolvendo tem-se (Almeida et al, 1999):

$$U(\theta, a_i) = K_{TI} \frac{\mu\omega}{(A_1 + \omega)(A_1 + \mu)} + K_{Ci} e^{-A_2 Ci}$$

### **3.5. - Modelo 3 - Tempo de Atraso Implícito em TTR**

Neste modelo de decisão considera-se a seguinte hipótese: para cada contrato de manutenção será admitido um MTTR (com o tempo de atendimento  $TA$  implícito em  $TTR$ ), e será estabelecido um custo ( $C_i$ ) para cada ação ( $a_i$ ) adotada.  $TI$  é uma variável aleatória com distribuição exponencial, sendo expresso por:  $TI = TTR$ .

Para a hipótese de utilidade aditiva, desenvolvendo tem-se (Almeida et al, 1998):

$$U(\theta, a_i) = \frac{\mu K_1}{(A_1 + \mu)} + \frac{\mu K_3 e^{-A_2 C_i}}{(A_1 + \mu)} + K_2 e^{-A_2 C_i}$$

#### 4. Conclusão

Três modelos básicos utilizando utilidade multiatributo para seleção de contratos foram apresentados. Outros modelos foram desenvolvidos e encontram-se em desenvolvimento utilizando-se visões diferentes de decisão multicritério (Almeida, 2000).

Por fim, deve-se salientar a importância do uso de métodos multicritério de apoio a decisão (Gomes et al, 2002) na área de manutenção.

Como resultado dos estudos desenvolvidos alguns softwares têm sido desenvolvidos para dar suporte a decisão em problemas de decisão ([www.ufpe.br.gpsid](http://www.ufpe.br.gpsid)) de modo que o gerente pode avaliar qual a melhor alternativa para as condições de seu sistema.

#### Bibliografia

- ALMEIDA, A. T. de. Multicriteria Decision Making on Maintenance: Spares and Contracts Planning. *European Journal of Operational Research*, Holanda, v.129, n.2, p.235-241, 2001.
- ALMEIDA, A. T. de (2000) Decisão Multicritério na Engenharia de Manutenção – Modelos de Decisão e Aplicações In: Almeida A. T. de & Souza, F.M.C., *Produtividade e competitividade: aplicações e inovações*. Editora Universitária, p255-299.
- ALMEIDA, A T. de. Repair Contract Decision Model Through Additive Utility Function. *Journal Of Quality In Maintenance Engineering*, Londres, v.7, n.1, p.42-48, 2001.

- ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Combinando Teoria da Utilidade e Método ELECTRE na Seleção de Contratos de Manutenção. Organizado por MEDEIROS, Denise Dumke de, RAMOS, Francisco de Souza. *Gestão Industrial*. Recife, 2000, v.1, p.117-133.
- BOHORIS, G. A., ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Decision Theory In Maintenance Decision Making. Organizado por Martin, h. *new developments in maintenance - an international view*. Amsterdam, Holanda, 1995, v.1, p.265-275.
- GOMES, Luiz Flávio Autran Monteiro, GOMES, Carlos Francisco Simões, ALMEIDA, Adiel Teixeira de. TOMADA DE DECISÃO GERENCIAL: O Enfoque Multicritério (no prelo). Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2002.
- Almeida, A. T. de, (1997b); Decision Analysis of Maintenance Contract Problem Considering Reliability, Maintainability and Cost Criteria. EURO XV - INFORMS XXXIV Joint International Meeting; Barcelona, Spain, July 14-17, 1997
- Almeida, A. T. de; Bohoris, G. A.; (1995). Decision Theory in Maintenance Decision Making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 1 (1) pp. 39-45. ISSN 1355-2511.
- Almeida, A. T. de; Brandt, F. A.; Fernandes, R. A. C.; (1999); Modelling a Repair Contract Problem with Administrative Time Trough an Additive Utility Function, ICIL'99 – International Conferenc of Industrial Logistics, São Petersburgo, Rússia, June 28 to July 1, 1999, pp. 79-84.
- Almeida, A. T. de; Fernandes, R. A. C.; Araujo, M. S. (1998); Modelling a repair contract problem trough additive utility function, CLAIO 98 - Congresso Ibero-Latino-Americano de Pesquisa Operacional, Buenos Aires, Argentina, August 31 to September 4, 1998, pp. 1-8.
- Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C. de; Bohoris, G. A.; (1992b) Preference Elicitation in Reliability Engineering. IFORS/IFAC Workshop on Support Systems for Decision

- and Negotiation Process. 24-26 June 1992; Warsaw - Poland; 2pp.11-16.
- Almeida, A. T. de; Souza, F. M. C.de; (1993) Decision Theory in Maintenance Strategy for a Two-Unit Redundant Standby System. IEEE Trans. Reliability. 42(3)pp.401-407.
- Almeida, A. T., (1997); Decision Analysis of Maintenance Contract Problem Considering Reliability, Maintainability and Cost Criteria. EURO XV - INFORMS XXXIV Joint International Meeting; Barcelona, Spain, July 14-17, 1997.
- Almeida, A. T., (1998b); Maintenance Contract Problems Based on decision Theory; Third IMA (The Institute of Mathematics and its Applications) International Conference on Mathematical Models in Maintenance, Edinburgo - Escócia; 6-8 april 1998
- Almeida, A.T. de (1997a) Apoio a Decisão para Estabelecimento de Contratação de manutenção. XIV SNPTEE - Seminario Nacional de Producao e Transmissao de Energia Eletrica; 26-30 Out. 1997; Belém-PA. BL/GMA/15/01-04.
- Alpert, M.; Raiffa, H. A.; (1982) A Progress Report on the Training of Probability Assessors. In Judgment Under Uncertainty - Heuristics and Biases (Kahneman,D.;Slovic,P. and Tversky,A. eds) Cambridge University Press. pp.294-305.
- Ascher, H.; Feingold, H.; (1984) Repairable Systems Reliability - Modelling, Inference, Misconception and their Causes. Marcel Dekker,Inc.
- Barlow, R. E.; Proschan, F.; (1967) Mathematical Theory of Reliability. John Willey & Sons,Inc.
- Bell, D. E.; Keeney, R. L.; Raiffa, H.; (1977) Conflicting Objectives in Decisions. John Wiley & Sons, ISBN: 0-471-99506-1.
- Bell, D. E.; Raiffa, H.; Tversky, A. Ed; (1988) Decision Making, Descriptive, Normative and Prescriptive Interations. Cambridge University Press
- Berger, J. O.; (1985) Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. Springer-Verlag.

- Drenick, R. F.; (1960) The Failure Law of Complex Equipment. J. of the Soc. for Ind. and Applied Math. 8pp.680-690.
- Fernandes, R. A. C.; Almeida, A. T. de, Miranda, C. M. G; Seleção de Contratos de Manutenção Empregando Função Utilidade Aditiva com Tempo de Interrupção Exponencial. III Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha. Rio de Janeiro 16-17 de dezembro de 1999. Anais em CD-ROM pp. 1-12.
- Fernandes, R. A. C.; Brandt, F. A.; Almeida, A. T. de (1998) Utilidade aditiva na escolha de alternativas de contrato de manutenção. XXX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Curitiba-PR, 25-27/Nov/1998.
- Geraerds, W. M. J.; (1992) The EUT Maintenance Model. International Journal of Production Economics. 24pp.209-216.
- Gits, C. W.; (1986) On the Maintenance Concept for the Technical System: II Literature Review. Maintenance Management International. 6(3)pp.181-196.
- Goldman, A. S.; Slattery, T. B.; (1977) Maintainability: A Major Element of System Effectiveness. Robert E. Krieger Publishing Company, ISBN: 0-88275-292-8.
- Howard, R. A.; (1988) Decision Analysis: Practice and Promise. Mang. Science. 34(6)pp.679-695.
- Jammerneegg, Werner, and Kischka, Peter. (1994) Optimal decisions for an insurance contract with experience rating. Annals of OR. Vol.: 52 Issu: 1; Pp: 85-96
- Kadane, J. B.(Ed); (1984) Robustness of Bayesian Analysis. North-Holand,
- Kapur, K. C.; Lamberson, L. R.; (1977) Reliability in Engineering Design. John Wilwy & Sons, pp.586 p. ISBN: 0-471-51191-9.
- Keeney, R. L.; (1982) Decision Analysis: An Overview. Opens. Res.(US). 30(5)pp.803-838.

- Keeney, R. L.; Raiffa, H.; (1976) Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs. John Wiley & Sons.
- Keeney, R. L.; von Winterfeldt, D.; (1991) Eliciting Probabilities from Experts in Complex Technical Problems. IEEE Trans. on Engineering Management. 38(3)pp.191-201.
- Kennedy, W.J. (1993) Modeling in-house vs contract maintenance with fixed costs and learning effects. IJPE. Vol.: 32, Issu: 3; Pp: 277-283
- Martz, H. F.; Waller, R. A.; (1982) Bayesian Reliability Analysis. John Wiley & Sons, pp.745p.
- O'Connor, P. D. T.; (1985) Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons, pp.398p. ISBN: 0-471-90551-8.
- Raiffa, H.; (1970) Decision Analysis. Addison-Wesley.
- Ritchken, Peter H.; Tapiero, Charles S.; (1986) Warranty Design Under Buyer and Seler Risk Aversion. Naval Research Logistic Quartely. 33(n.4)pp.657-671.
- Smith, J. Q.; (1988) Decision Analysis - A Bayesian Approach. Chapman and Hall.
- Vincke, P.; (1992) Multicriteria decision-aid. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-93184-5.
- Wright, G.; (1984) Behavioural Decision Theory. Penguin Books

Montado e impresso nas oficinas gráficas da

Editora  
Universitária  UFPE

Rua Acadêmico Hélio Ramos, 20 • Várzea  
Fone: (0xx81) 3271.8397 • (0xx81) 3271.8930  
Fax: (0xx81) 3271.8395 • CEP 50740-530  
Recife • PE

# Gestão Da Manutenção

Na Direção da Competitividade

A manutenção tem uma relação direta com a percepção que o cliente tem da qualidade do produto para todos os tipos de sistemas de produção. Na produção de serviços este impacto está diretamente associado com o atendimento ao cliente. Na produção de bens, as exigências cada vez mais crescentes de desempenho competitivo dos sistemas de produção, requerem que os sistemas estejam disponíveis para fornecer os produtos em tempo hábil, atendendo a credibilidade nos prazos comprometidos. Neste contexto, este livro constitui numa contribuição para a competitividade na gestão da manutenção. Os temas foram agrupados em quatro blocos:

- Conceitos básicos, incluindo: "Engenharia de manutenção"; "Confiabilidade e Manutenibilidade na manutenção" e "Avaliação de Desempenho de Sistemas - Conceitos Básicos"
- Métodos de gestão, englobando: "Procedimentos estatísticos para o desenvolvimento da avaliação de desempenho de sistemas"; "Tpm - manutenção produtiva total: Da concepção conceitual à implantação"; "Sistemas de custeio para apoio à gestão da manutenção"; "O dimensionamento de sobressalentes"; "Terceirização da Manutenção"; "Teste de confiabilidade de Equipamentos"; e "Modelos de manutenção - Ênfase na confiabilidade e manutenibilidade"
- Substituição e manutenção de prevenção, agrupando os temas: "Gerenciamento da substituição e manutenção programada de equipamentos na indústria"; "Applying level of repair analysis to a condition monitoring problem"; "Otimização da periodicidade da manutenção centrada na confiabilidade; e "Manutenção de software: "Monitoramento: controle estatístico de processo em uma aplicação de tempo real.
- Modelos de decisão em manutenção, envolvendo os seguintes temas: "Modelos de Decisão em Problemas de Manutenção Baseados em Teoria da Decisão"; "Teste de Confiabilidade Baseado em Teoria da Decisão"; "Seleção de Contratos de Manutenção através de Modelos de Decisão Multicritério".

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEP  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - DEP  
GRUPO DE PESQUISA EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E DECISÃO - GPSID  
INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - IDEP



ISBN 85-7315-273-7



9 788573 115273 9