

## 2

### **Gerenciamento de Ativos em Sistemas de Energia Elétrica**

Os sistemas de transmissão, geração e distribuição possuem inúmeros ativos físicos, e muitos consideram que as técnicas de gerenciamento de ativos são a melhor forma de administrá-los [IEEE/PES Task Force,1999]. O gerenciamento de ativos é um termo derivado do setor financeiro, aplicado em portfólios de investimentos contendo: ações, obrigações, dinheiro, opções e outros instrumentos financeiros. A questão fundamental do gerenciamento de ativos é a correlação entre risco e retorno. Os investidores estipulam um risco de perdas financeiras aceitável e as técnicas de gerenciamento de ativos são utilizadas com o objetivo de atingirem as metas com os retornos mais altos possíveis [Quak, 2003].

#### 2.1

##### **Gerenciamento de Ativos: Visão Geral**

Técnicas de gerenciamento de ativos do mercado financeiro estão sendo aplicadas ao gerenciamento de ativos físicos de indústrias de infra-estrutura, tais como aviação civil, equipamentos hospitalares de grande tecnologia e usinas nucleares [CIGRE, GT B3.01, 2006]. Um dos objetivos principais é a tomada de todas as decisões relacionadas aos aspectos envolvendo o processo de envelhecimento de um determinado equipamento, tais como: manutenção de equipamentos, momento ideal da substituição do equipamento, entre outros, de acordo com os interesses determinados pelos acionistas principais da companhia. O saldo é resultado de um conjunto de decisões de investimentos capazes de distribuir aos acionistas os lucros devido a estes investimentos [Van der Meijden, 2004]. Estas decisões devem acarretar o máximo rendimento dos ativos, levando-se em consideração a segurança pessoal e ambiental e a garantia da qualidade do produto entregue ao consumidor [Smit, 2002].

No que diz respeito à indústrias de infra-estrutura, o gerenciamento de ativos é de fundamental importância pois está relacionado com a condição atribuída a performances futuras de seus ativos físicos. Entretanto, é completamente

diferente gerenciar os ativos físicos, como por exemplo, de um sistema de transmissão e de distribuição de energia elétrica, do que os ativos do mercado financeiro. Dentre as diferenças, pode-se citar que os ativos físicos requerem manutenção, substituição e, além disso, fazem parte de um sistema interligado complexo [Brown, 2005].

Tipicamente, as empresas de infra-estrutura adotam o gerenciamento de ativos para gerenciar riscos de maneira mais efetiva com o objetivo de fornecer serviços aos consumidores com total confiabilidade, reduzindo gastos e conseqüentemente maximizando o lucro da empresa a longo prazo [Jansen, 2006].

O gerenciamento de ativos possui uma visão ambiciosa da extensão da operação requerendo estatísticas para o apoio, estrutura organizacional, sistemas de informação e cultura corporativa [Brown, 2005].

### **2.1.1**

#### **Filosofia Empresarial**

O gerenciamento de ativos tem uma filosofia organizacional que substituiu a estrutura hierárquica tradicional das empresas. É o resultado da divisão entre os níveis hierárquicos responsáveis pela tomada de decisão envolvendo o desenvolvimento, manutenção e operação dos ativos físicos (setor de planejamento), dos níveis hierárquicos responsáveis pela coordenação de pessoal, materiais e ferramentas (setor de operação) [IEEE/PES Task Force, 1999].

### **2.1.2**

#### **Estrutura Organizacional**

Na forma clássica de gerenciamento de ativos a empresa é dividida em três bases: os donos dos ativos - *Asset Owner*; os gerentes dos ativos – *Asset Manager*; e os prestadores de serviço [Bartlett, 2002]. Os donos dos ativos são responsáveis pela definição dos critérios financeiros, técnicos e de risco. Os gerentes dos ativos são responsáveis por traduzir estas determinações em um projeto. Os prestadores de serviço ficam responsáveis pela execução do projeto

e pelo fornecimento dos resultados envolvendo custos e desempenho (o risco é determinado a partir da variação da performance).

Esta estrutura permite que cada função tenha um foco: os donos na estratégia corporativa; os gerentes no orçamento e planejamento; e os prestadores de serviço na excelência operacional. Esta estrutura é ilustrada na Tabela 2.1 [Van der Meijden, et al, 2004] assim como as principais funções de cada base.

Tabela 2.1 – Estrutura do Gerenciamento de Ativos

Dono dos Ativos	Gerente dos Ativos	Prestador de Serviço
<u>Objetivos Corporativos</u>	<u>Planejamento do Ativo</u>	<u>Relatório dos Dados</u>
Objetivos financeiros	Orçamento	Respostas a interrupções
Regulamentação do gerenciamento	Gerenciamento de risco	Manutenção
Estrutura do capital	Cálculo do ciclo de vida	Monitoração
Estratégia corporativa	Avaliação de projetos	Inspeção
Mérito do negócio	Planejamento da manutenção	Operação
	Planejamento operacional	Construção
	Planejamento do capital	Intervenção

Os donos dos ativos determinam os preços do negócio, a estratégia corporativa e os objetivos financeiros, performance e risco. O gerente de ativo identifica a melhor maneira para articular e alcançar os objetivos, a longo prazo, através de cálculos, planejamentos e avaliações. O prestador de serviço executará o projeto de maneira eficiente e fornecerá os dados de desempenho dos ativos ao processo de gerenciamento de ativos.

O gerenciamento de ativos também trata do processo [Schneider, et all, 2005]. Ao invés de adotar uma estrutura hierárquica onde as decisões e os orçamentos seguem uma cadeia de comando dentro de uma estrutura funcional, o gerenciamento de ativos é um processo único que serve de conexão entre os donos, gerentes e prestadores de serviço de forma a permitir que todas as decisões de investimentos sejam realizadas em conjunto.

Para manter o caráter contínuo deste processo de tomada de decisão é necessário obter-se sempre informações precisas e atualizadas. O gerente de ativos somente poderá identificar as melhores estratégias de manutenção e planejamento, se os dados com os quais ele se baseará forem altamente relevantes. Basicamente existem dois tipos de informações necessárias:

- relativa ao desempenho dos ativos na estrutura;
- relativa ao risco dos ativos.

Entretanto, esta última é puramente dependente das regulamentações locais, de acordo com as legislações de cada país, e da aversão ao risco por parte do proprietário dos ativos. No caso da aviação civil americana, por exemplo, estas informações são utilizadas para o planejamento de investimentos e das atividades de manutenção dos ativos físicos das companhias aéreas. Desta forma, o gerente deve ser considerado como o responsável pelo equilíbrio entre os riscos técnico e econômico envolvidos, com o aperfeiçoamento do rendimento dos ativos dos quais ele é o responsável.

### **2.1.3**

#### **Planejamento com Menor Risco**

O elo envolvendo as necessidades de investimento com os objetivos estratégicos de uma empresa forma a base do gerenciamento de ativos. A condição essencial é o desenvolvimento e a aplicação de um método eficiente e consistente que estreite esta distância, assegurando que somente os investimentos que contribuam ao máximo para o desenvolvimento da empresa sejam os escolhidos [Van der Meijden, et all, 2004].

O ponto de partida para o desenvolvimento de uma estrutura de tomada de decisão é estabelecer a medida de performance ideal dos ativos (retornos maiores com menores custos) de acordo com os interesses dos diretores da empresa. Entretanto, para o funcionamento efetivo do gerenciamento de ativos, esta estratégia não é suficiente. Os riscos estão sempre presentes em qualquer tipo de negócio. Logo, é importante que o gerente de ativos saiba quais são os níveis de aversão ao risco por parte dos proprietários dos ativos para que possa gerenciar o projeto dentro deste nível de tolerância ao risco [Jansen, 2006].

Para que os objetivos possam ser atingidos é necessário que cada empresa desenvolva um modelo padrão de gerenciamento de ativos, quantificando os custos e benefícios de cada proposta de investimento. Esta quantificação pode ser atingida através de uma simples avaliação subjetiva do risco ou através de sofisticada modelagem e cálculo de análise de riscos.

São necessários desenvolvimentos de ferramentas e métodos probabilísticos de análise de riscos para o cálculo de planejamento de projetos, impactos financeiros, impactos na qualidade dos serviços prestados, aperfeiçoamento de técnicas de manutenção, dentre outros [Van der Meijden, et all, 2004]. Estes conjuntos de métodos e ferramentas devem ser documentados para facilitar o treinamento de pessoal e identificação de possíveis falhas no processo gerenciamento de ativos [Jansen, 2006].

## 2.2

### **Gerenciamento de Ativos Aplicado em Sistemas de Energia Elétrica**

O sistema elétrico de muitos países desenvolvidos atravessa problemas devido ao “envelhecimento” de seus ativos [Brown, 2006], uma vez que estes entraram em operação há mais de cinco décadas conforme pode ser observado no gráfico ilustrado na Figura 2.1 [CIGRÉ WG 37.27, 2000].

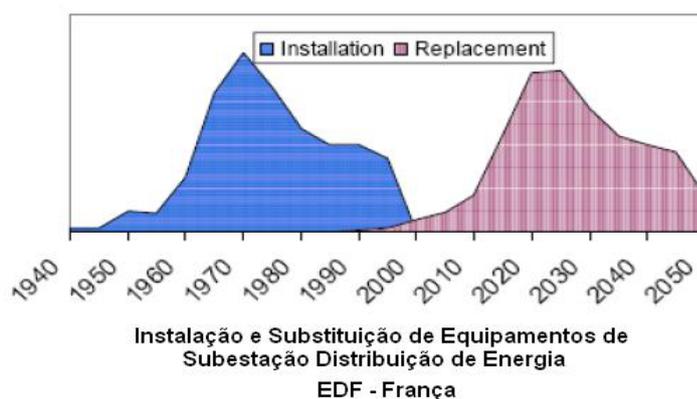


Figura 2.1 – Previsão para a Substituição de Equipamentos do Sistema de Distribuição de Energia da EDF

Na Figura 2.1 mostram-se os períodos em que foram instalados os cabos de alta tensão, atualmente em operação, das subestações do sistema de distribuição francês. Estes ativos têm uma expectativa de vida de aproximadamente cinquenta anos. Analisando-se os dados ilustrados na Figura 2.1, este problema será ainda maior ao final do ano de 2020, onde grande parte dos cabos de alta tensão estarão no final de seu ciclo de vida útil, sendo necessária a substituição dos mesmos. Por outro lado, a alta demanda de serviços requer que este sistema de distribuição opere com sua capacidade máxima. Esta situação limita a possibilidade de substituição ou restauração dos ativos de uma única vez, uma vez que os investimentos necessários seriam muito altos e a demanda seria afetada significativamente [Brown, 2006 e Willis, et all, 2000].

Para balancear os custos e riscos com os orçamentos e os recursos financeiros necessários para o desenvolvimento de projetos que permitam lidar com a substituição ou prolongamento do tempo de vida útil dos ativos, é necessária informação e métodos para reduzir as incertezas que rodeiam tais decisões [Willis, et all, 2000]. Neste propósito, o CIGRÉ e o IEEE vêm desenvolvendo simpósios ao redor do mundo para obter respostas as seguintes perguntas:

Qual a vida residual de um determinado equipamento?

Existem formas de aumentar sua vida útil?

A que custo e por quanto tempo é possível aumentar sua vida útil?

Se as políticas de manutenção atual de cada equipamento forem alteradas, quais as taxas de falha esperadas?

Destacam-se trabalhos técnicos como os de K. Sand [Sand, 2006], que apresenta um estudo de caso da aplicação de técnicas de gerenciamento de ativos para substituição e restauração de equipamentos obsoletos no sistema de distribuição norueguês. Este também é o foco do trabalho de S. Bennoit [Bennoit, 2006]. Já M. Zouti [Zouti, 2006] propôs um método de análise do envelhecimento de cabos e linhas da rede de distribuição da França.

Entretanto, o envelhecimento e a substituição de equipamentos de sistemas de energia elétrica não é o foco principal desta tese. O que se deseja analisar é o intervalo ótimo de manutenção no intuito de reduzir o pagamento da parcela variável. Neste contexto, destacam-se os trabalhos de A. Jayakumar [Jayakumar, 2004] e L. Bertling [Bertling et al, 2005].

Jayakumar modela através de Processo de Markov um componente cujo processo de degradação e sua taxa de falha são aleatórios. O intervalo ótimo de manutenção é determinado relacionando-se a probabilidade do equipamento permanecer em operação (disponibilidade) com o tempo médio de manutenção preventiva. O processo de degradação do equipamento é um evento “invisível” ao operador, uma vez que a transição entre os estados “operação” e “falha” é instantânea. Para contornar este problema, Endrenyi [Endrenyi, 1978] propõe modelos para representar estados de operação com degradação parcial.

Já Bertling [Bertling, et al, 2005] propõe um método para comparação de dados de confiabilidade para diferentes políticas de manutenção. Este método relaciona a teoria de confiabilidade com a experiência obtida através de estudos estatísticos e práticos das taxas de falha quando foram adotadas diferentes políticas de manutenção em cada componente. Este método foi aplicado com bastante êxito para a redução da taxa de falha em cabos do sistema de distribuição rural e urbano da Suécia.

O sucesso do trabalho de Bertling ocorreu devido à utilização de técnicas de Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC ou RCM - *Reliability Centered Maintenance*. Nas próximas seções deste capítulo são mostrados os principais conceitos da MCC.

## 2.3

### **Manutenção Centrada na Confiabilidade**

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT [NBR 5462, 1994 (Filho, 2000)], manutenção é toda ação realizada em um equipamento, conjunto de peças, componentes, dispositivos, circuito ou estrutura que se esteja controlando, mantendo ou restaurando, a fim de que o mesmo permaneça em operação ou retorne a função requerida, ou seja, o conjunto de condições de funcionamento para o qual o equipamento foi projetado, fabricado ou instalado. O equipamento deve desempenhar sua função requerida com segurança e eficiência, considerando as condições operativas, econômicas e ambientais.

A origem da Manutenção Centrada na Confiabilidade está relacionada aos processos tecnológicos e sociais que se desenvolveram após a Segunda Guerra Mundial [Smith, 1992 e Moubray, 1997]. No campo tecnológico, foram decisivas as pesquisas iniciadas pela indústria bélica americana, seguidas pela automação industrial em escala mundial, viabilizadas pela evolução da informática e telecomunicações, presentes em todos os aspectos da sociedade atual.

No campo social, este movimento resultou na dependência da sociedade contemporânea em relação aos métodos automáticos de produção. Sua dimensão atingiu níveis suficientes para afetar o meio ambiente e a própria segurança física dos seres humanos. Em paralelo, evoluiu a consciência mundial de importância da preservação dos recursos naturais, aliado a uma necessidade ascendente de segurança física. Na atualidade exige-se que os processos de projeto e manutenção dos meios de produção não só atendam estes anseios, mas que sejam estruturados de forma transparente, permitindo à sociedade exercer seu papel de promotora e fiscalizadora [Nowlan, 1978].

#### **2.3.1**

##### **A Manutenção, do Prelúdio à Evolução dos Dias Atuais**

A história da manutenção pode ser dividida em três gerações distintas, assim denominadas [Moubray, 1997]:

- **Primeira Geração** – mecanização;
- **Segunda Geração** – industrialização;
- **Terceira Geração** – automação.

Cada geração é caracterizada por um estágio diferente de evolução tecnológica dos meios de produção, e pela introdução de novos conceitos e paradigmas nas atividades de manutenção. Estas gerações estão resumidas na Figura 2.2 [Moubray, 1997].

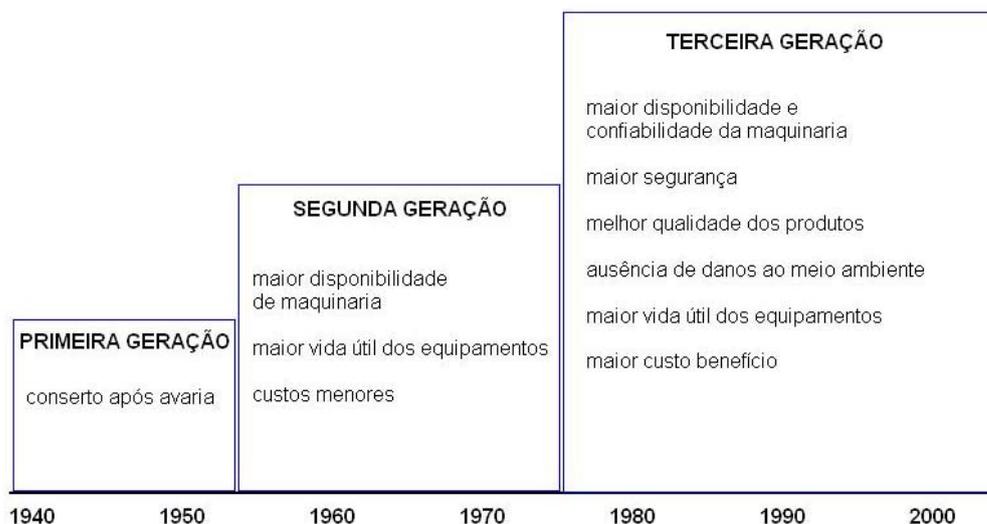


Figura 2.2 – Crescimento das Expectativas de Manutenção

### 2.3.1.1

#### Primeira Geração - Mecanização

Estende-se aproximadamente de 1940 a 1950, com o final da Segunda Guerra Mundial. Neste período, a mecanização da indústria era incipiente, utilizando equipamentos simples. Em consequência, a sociedade da época pouco dependia do desempenho destes equipamentos, exigindo apenas que fossem restaurados quando apresentassem defeitos [Moubray, 1997 e Smith, 1992]].

Por décadas, a sabedoria convencional sugeriu que a melhor maneira de otimizar o desempenho de ativos físicos era de desmontar e revisá-los por completo ou substituí-los a intervalos determinados. Isto era baseado na premissa de que há uma relação direta entre quantidade de tempo que um

equipamento gasta em serviço e a probabilidade de sua falha, conforme ilustrado na Figura 2.3 [Moubray, 1997].

Este pensamento clássico sustentava que o tempo ótimo de substituição do equipamento poderia ser determinado a partir de registros histórico sobre falha do mesmo. Este tipo de relacionamento é de fato verdadeiro para alguns modos de falha.

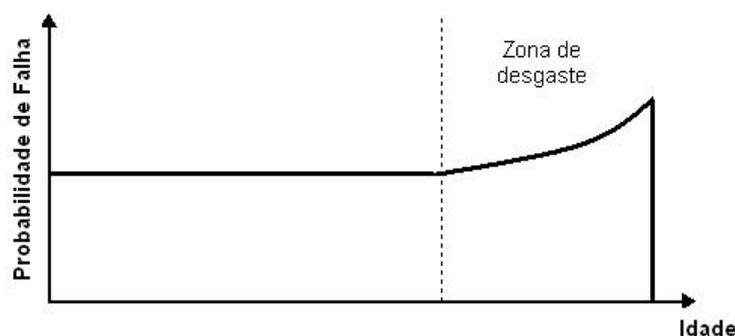


Figura 2.3 – Curva Idade vs Probabilidade de Falha

### 2.3.1.2

#### Segunda Geração - Industrialização

Iniciada aproximadamente em 1950 se estendeu até o ano de 1975. Resultado do esforço de industrialização pós-guerra, esta geração acompanhou a disseminação das linhas de produção contínuas, gerando dependência crescente da sociedade em relação aos produtos e processos industrializados. Nesta época registra-se a primeira onda de escassez de mão-de-obra especializada, decorrente da velocidade de implantação da automação. Isto resultou em um custo crescente de correções das falhas, em especial devido à produção e consumo interrompidos, aumentando as expectativas da sociedade sobre o desempenho da indústria. Maior disponibilidade e vida útil, a um baixo custo tornou-se o objetivo básico de avaliação dos equipamentos no ambiente industrial [Moubray, 1997 e Smith, 1992].

Esses fatos motivaram um esforço científico de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de manutenção preventivas, orientadas para a minimização dos impactos das falhas nos processos e meios de produção.

Uma crescente conscientização de “mortalidade infantil” levou à crença generalizada da segunda geração: a “curva da banheira”, conforme ilustrado na Figura 2.4 [Endrenyi, 1978; Smith, 1992; Moubray, 1997 e Li, 2004].

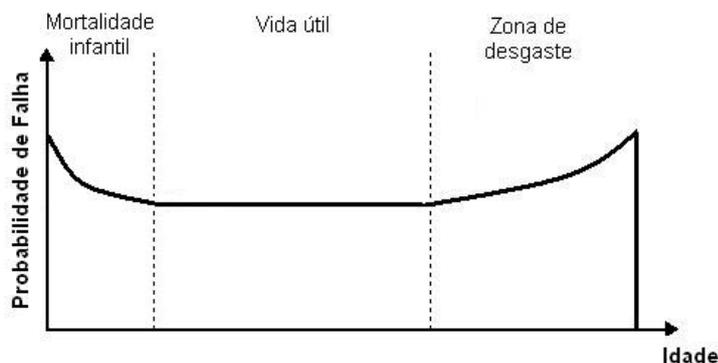


Figura 2.4 – Curva da Banheira

### 2.3.1.3

#### Terceira Geração - Automação

A terceira geração evoluiu da incapacidade das técnicas preventivas frente às exigências da automação ocorrida na indústria a partir de 1975 [Smith, 1992].

Neste período, além dos requisitos de maior disponibilidade, confiabilidade e vida útil dos equipamentos, a sociedade passou a exigir melhor qualidade e garantia de desempenho dos produtos. Serviços essenciais tais como saúde, telecomunicações, energia, saneamento, transporte público, entre outros, passaram a depender totalmente de processos automáticos. Falhas nestes sistemas produzem efeitos sociais muito além da simples avaliação econômica de seus custos. Coincidentemente, evoluiu na humanidade a consciência da importância da preservação do meio ambiente e da garantia de segurança para usuários de processos e produtos industriais, gerando as condições que motivaram o surgimento da Manutenção Centrada na Confiabilidade [Moubray, 1997].

### 2.3.2

#### Cronologia da MCC

O primeiro evento geralmente atribuído à origem da MCC refere-se à necessidade de certificação da linha de aeronaves Boeing 747, pela *Federal Aviation Authority* - FAA nos Estados Unidos [Nowlan, 1978]. Esta aeronave marcou a introdução de níveis de automação jamais vistos na aviação comercial. O uso de métodos tradicionais de manutenção da segunda geração, em máquinas desta complexidade, simplesmente inviabilizava o atendimento às exigências (certificados) das autoridades aeronáuticas americanas. Isto motivou a criação de uma Força-Tarefa na United Airlines, em 1968, conhecida por *Maintenace Steering Group* - MSG-1 [ATA, MSG-1, 1968], encarregada de rever a aplicabilidade dos métodos existentes a estas aeronaves. Dentre as muitas conclusões e aprendizados, duas foram destacadas [Smith, 1992; Jones, 1995 e Moubray, 1997]:

- i. manutenções preventivas obtiveram pouco efeito na confiabilidade total de um equipamento complexo;
- ii. existem muitos equipamentos para os quais não há forma efetiva de manutenção preventiva.

Estas descobertas estão refletidas nas curvas padrões de confiabilidade detalhadas na Figura 2.5 [Smith, 1992 e Moubray, 1997]:

1. somente um pequeno percentual (4%) atualmente correspondem a curva banheira (curva A);
2. mais significativo, somente 6% dos componentes experimentam uma região de desgaste, durante o tempo de vida útil da aeronave (curvas A e B). Especificamente o padrão B caracteriza aeronaves com troca de motores. Acrescentando o padrão C, característica de turbina de aeronaves, tem-se que 11% dos componentes experimentam sintomas de envelhecimento;
3. 89% dos componentes nunca apresentam qualquer envelhecimento ou desgaste durante o tempo de vida útil das aeronaves (padrões D, E e F).

Especificamente os rolamentos se enquadram no padrão *E* e os componentes eletrônicos no padrão *F*;

4. 72% dos componentes experimentam o fenômeno de mortalidade infantil (padrões *A* e *F*);

5. o grupo de maior percentual (68%), começa como curva da banheira e nunca atinge a região de envelhecimento (padrão *F*).

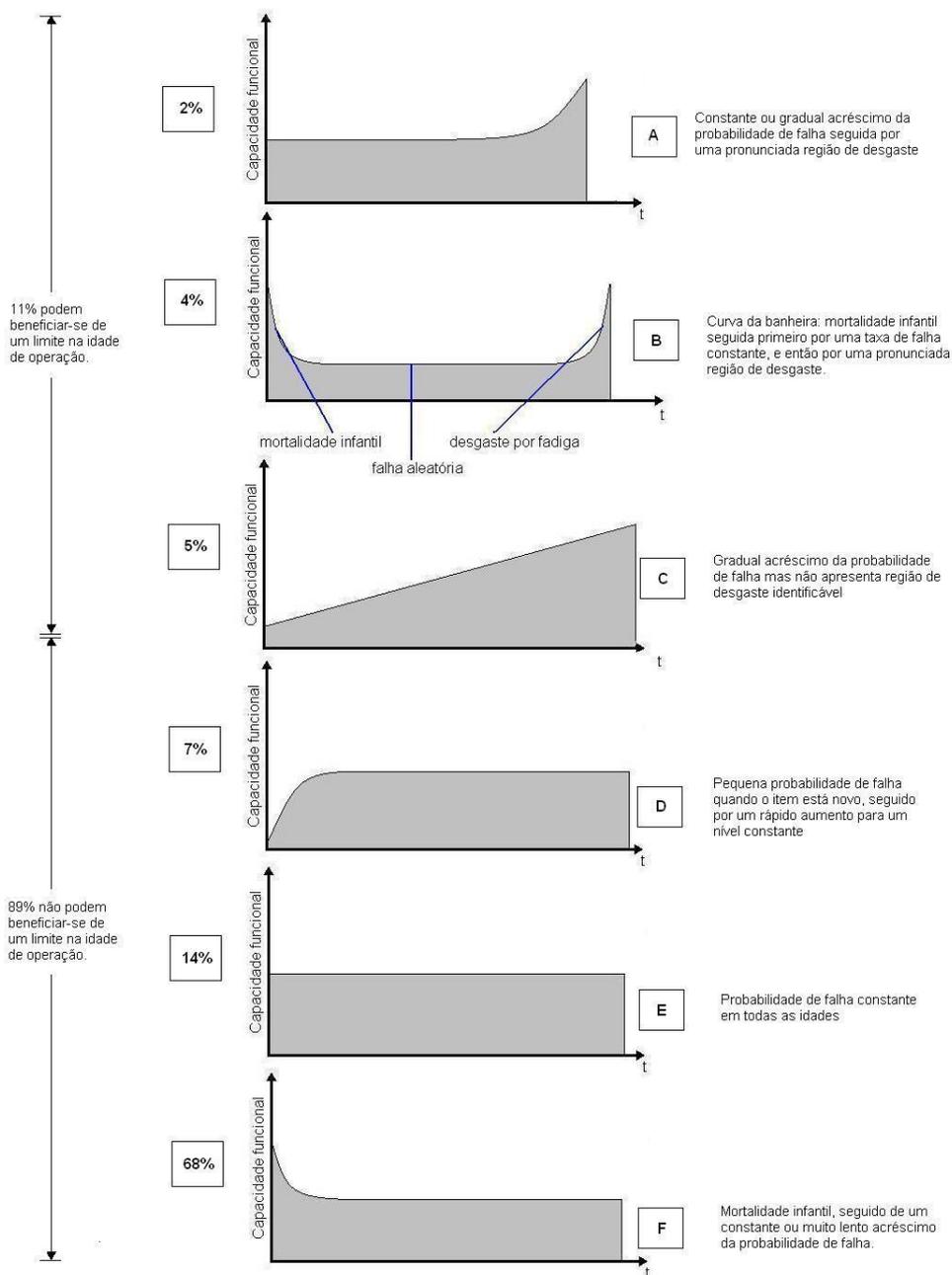


Figura 2.5 – Padrões de Idade-Confiabilidade para Equipamentos Não Estruturais de Aeronaves

O relatório desta comissão introduziu os conceitos de um novo método, denominado posteriormente de *Reliability-Centered Maintenance* – RCM [Nowlan, 1978], em português, Manutenção Centrada na Confiabilidade - MCC. A aplicação do método garantiu a certificação para a operação comercial do primeiro Boeing 747-100, pela FAA, no dia 30 de dezembro de 1969 [Smith, 1992, Jones, 1995 e Moubray, 1997].

À Força-Tarefa MSG-1 seguiram-se dois outros grupos, o MSG-2 em 1970 [ATA, MSG-2, 1970] e MSG-3 em 1980 [ATA, MSG-3, 1980], cuja última versão foi publicada em 2003 [Dubois, 2003], subordinados ao Sub-comitê de Confiabilidade e Manutenibilidade da *Air Transport Association of América* (ATA), sob contratos com o Departamento de Defesa Americano (DoD), para certificação de novos modelos de aeronaves comerciais, entre elas o Douglas DC-10, Concorde, Airbus, Boeing 737, 757 e 767, tornando-se então, por determinação do *DoD*, o método obrigatório para o uso em novas aeronaves.

A rápida disseminação da MCC motivou o desenvolvimento de versões ligeiramente diferentes da versão original dos relatórios MSG-3 [MIL-STD 2173, 1981; NAVAIR 00-24-403, 1983 e NASA TM 4628A, 1985]. A introdução das questões ambientais motivou John Moubray a propor modificações na MCC, chamando esta versão de “RCM2” [Moubray, 1997]. O *Electric Power Research Institute* - EPRI foi o pioneiro da aplicação da MCC nos sistemas de potência americanos, mais especificamente na área de energia nuclear, em 1984 [Douglas, 1996].

Muitos outros documentos foram publicados mantendo os elementos do processo original da MCC, contudo ocorreu uma proliferação do uso do termo MCC e aparecimento de propostas que diferem significativamente da original, com seus proponentes chamando de MCC [Jones, 1995]. Devido a este fato, houve o crescimento de demanda internacional para a padronização de um conjunto de critérios, para que um processo pudesse ser chamado de MCC. Então, em agosto de 1999 a *Society of Automotive Engineers* - SAE dos Estados Unidos, publicou a SAE-JA 1011 intitulada “*Evaluation Criteria for a Reliability-Centered Maintenance Process*”. Este documento descreve os critérios mínimos que qualquer processo possa ser chamado de MCC, porém não define qualquer processo específico de MCC. Esta norma foi complementada em janeiro de 2002

com a publicação da norma SAE-JA 1012 intitulada “*RCM Guidebook: Building a Reliable Plant Maintenance Program*” [August, 2004].

No Brasil as técnicas de MCC começaram a ser adotadas nos sistemas de proteção da rede elétrica da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF, em 1992 sob supervisão do engenheiro Iony Patriota de Siqueira. Em 2005 Siqueira publicou o manual de implementação das técnicas de MCC [Siqueira, 2005] com base em suas experiências adquiridas ao longo dos anos.

### 2.3.3

#### **Objetivos da Manutenção Centrada na Confiabilidade**

A MCC procura estabelecer definições precisas dos objetivos da manutenção conforme definido pelo Código de Regulação Federal - *Code of Federal Regulations* do Reino Unido: “Um agregado de funções requeridas para preservar ou restaurar a segurança, confiabilidade e disponibilidade das estruturas das plantas, sistemas e componentes” [Mc Call, 1965; Geraerds, 1972; Pierskalla, 1976; Gits, 1992; Billinton, 1992].

Segundo A.M. Smith, a manutenção tem como objetivo “preservar as capacidades funcionais de equipamentos e sistemas em operação” [Smith, 1992], enquanto que J. Moubray diz que o objetivo da manutenção é “assegurar que itens físicos continuem a fazer o que seus usuários desejam que eles façam” [Moubray, 1997]. Resultado do esforço de padronização da MCC, a norma SAE-JA 1012 [August, 2004] estabelece que a manutenção deve garantir que “itens físicos continuem a desempenhar suas funções planejadas”.

Existem oito atributos que definem e caracterizam a MCC tornando-a distinta de qualquer processo de manutenção, a saber:

- preservar as funções dos equipamentos, com a segurança requerida;
- restaurar sua confiabilidade e segurança projetada, após a deterioração;
- otimizar a disponibilidade;
- minimizar o custo do ciclo de vida;
- atuar conforme os modos de falha;

- realizar apenas as atividades que precisam ser feitas;
- agir em função dos defeitos e conseqüências da falha;
- documentar as razões para a escolha das atividades.

Estas características e objetivos devem ser perseguidos através de um programa de manutenção que, simultaneamente colete informações necessárias para a melhoria da confiabilidade das funções desejadas. Destaca-se, entretanto, que não cabe a este plano ou às funções da manutenção corrigir deficiências nos níveis inerentes de confiabilidade e segurança dos equipamentos e estruturas, mas apenas minimizar sua deterioração e restaurar aos níveis inerentes ao projeto, alertando as equipes de projeto quando estes níveis não mais atenderem aos requisitos dos usuários [Siqueira, 2005].

#### **2.3.4**

#### **Conseqüências de Falhas**

Esta seção resume o ponto central da filosofia da MCC, segundo a qual uma estratégia efetiva de manutenção concentra-se em evitar ou reduzir as conseqüências significantes de falhas. Ao concentrar o foco nas conseqüências das falhas, a MCC prioriza mais o atendimento às necessidades do processo ou aplicação, em detrimento das necessidades próprias ou individuais dos itens [Moubray, 1997].

Segundo a MCC, conseqüências significantes são aquelas que afetam um dos seguintes aspectos do ambiente operacional:

- segurança de pessoal;
- qualidade do meio ambiente;
- operação do processo;
- economia do processo.

Para reduzir os efeitos adversos das falhas, a MCC adota como objetivos e técnicas principais:

- preservar as funções dos sistemas;

- identificar modos de falha que possam interromper as funções;
- priorizar as necessidades das funções;
- selecionar apenas as tarefas preventivas que sejam aplicáveis e efetivas;
- determinar periodicidades ótimas para estas atividades.

Ou seja, as funções assumem papel preponderante na MCC, como forma de atendimento das necessidades dos usuários, em substituição aos requisitos específicos de cada equipamento. Para atingir estes objetivos, a MCC estabelece como ponto de partida uma série de questões, cujas respostas devem anteceder à definição das atividades de manutenção [Siqueira, 2005].

### 2.3.5

#### Questões Básicas da MCC

No intuito de estabelecer métodos adequados de manutenção, a MCC procura obter respostas corretas e precisas em um conjunto de sete questões, colocadas em ordem seqüencial específica, aplicáveis ao objetivo da manutenção [Moubray, 1997]:

1. Quais as funções a preservar?
2. Quais as falhas funcionais?
3. Quais os modos de falha?
4. Quais os efeitos e causas das falhas?
5. Quais as conseqüências das falhas?
6. Quais as tarefas aplicáveis e efetivas?
7. Quais as alternativas restantes?

Nestas questões, pressupõe-se que a freqüência de execução das tarefas seja definida durante a resposta à sexta pergunta, ou seja, na definição das tarefas aplicáveis e efetivas [Siqueira, 2005]. Na prática, costuma-se acrescentar uma questão adicional, objetivando o cálculo da melhor freqüência das atividades, após a escolha de todas as tarefas de manutenção, ou seja:

## 8. Quais as frequências ideais das tarefas?

Para responder a cada questão, a MCC utiliza muitos métodos e ferramentas de um conjunto aberto de soluções, algumas tradicionais, outras recentes e modernas, segundo uma seqüência estruturada e bem documentada, possível de ser fiscalizada [Smith, 1992; Jones 1995; Moubray, 1997; Li, 2004 e Siqueira, 2005].

A MCC adota uma seqüência estruturada, composta de sete etapas:

1. seleção do sistema e coleta de informações;
2. análise de modos de falha, causas e efeitos;
3. seleção de funções significantes;
4. seleção de atividades aplicáveis;
5. avaliação da efetividade das atividades;
6. seleção das atividades aplicáveis e efetivas;
7. definição da periodicidade das atividades.

Em cada etapa são utilizadas ferramentas de modelagem ou análise de sistemas destinados a responder e, principalmente, documentar os critérios e respostas a cada questão da MCC.

### 2.3.6

#### **Primeira Etapa - Seleção do Sistema e Coleta de Informações**

O primeiro passo no processo de implementação da MCC é definir as funções de cada ativo físico, no contexto operacional, junto com os padrões de desempenho desejados. Estas funções podem ser divididas em duas categorias:

- *funções primárias*: são aquelas que resumem o motivo dos ativos terem sido adquiridos. Elas cobrem questões como velocidade, quantidade, capacidade de transporte ou armazenagem, qualidade do produto, serviços ao cliente entre outras.
- *funções secundárias*: são aquelas que reconhecem o que é esperado do ativo. Elas cobrem as expectativas em áreas como: segurança, controle,

conforto, proteção, contenção, integridade estrutural, economia, conformidade com os regulamentos ambientais e até a aparência do ativo.

### 2.3.7

#### **Segunda Etapa - Análise de Modos de Falha, Causas e Efeitos**

Prevenir e corrigir falhas constituem os objetivos primários da manutenção. Para isto é necessário conhecer as formas como os sistemas falham. O estudo das falhas constitui parte essencial da Manutenção Centrada na Confiabilidade. A MCC propõe analisar as falhas através de sua classificação, identificação e documentação, associando-as às funções do sistema.

#### 2.3.7.1

##### **Classificação das Falhas Segundo a MCC**

Para os objetivos da MCC, as falhas são classificadas, de acordo com os efeitos que provocam sobre uma função do sistema a que pertencem, em duas características básicas:

- **Falha Funcional** – definida pela incapacidade de um item de desempenhar uma função específica dentro de limites desejados de performance;
- **Falha Potencial** – definida como uma condição identificável e mensurável que indica uma falha funcional pendente ou em processo de ocorrência.

As falhas funcionais, por sua vez, são classificadas pela MCC, em três categorias, de acordo com sua visibilidade:

- **Falha Evidente** – a qual, por si só, é detectada pela equipe de operação durante o trabalho normal;
- **Falha Oculta** – uma falha que não é detectada pela equipe de operação durante o trabalho normal;

- **Falha Múltipla** – uma combinação de uma falha oculta mais uma segunda falha, ou evento, que a torne evidente.

Esta classificação é adotada pela MCC para definir a melhor estratégia de manutenção. Para falhas evidentes, a estratégia deverá necessariamente prevenir a consequência de uma falha simples; já para as falhas ocultas, a estratégia deverá concentrar-se em prevenir a consequência de uma falha múltipla. Em última análise, algumas falhas devem ser prevenidas; outras devem ser permitidas. A MCC postula que as consequências da falha determinem a melhor estratégia de manutenção. Antes, porém, elas precisam ser identificadas.

Nota-se que os desvios de desempenho de funções são percebidas como falhas de forma diferente por cada usuário do sistema. Considera-se o exemplo ilustrado na Figura 2.6 [Siqueira, 2005] de uma representação do nível operacional de uma determinada função.

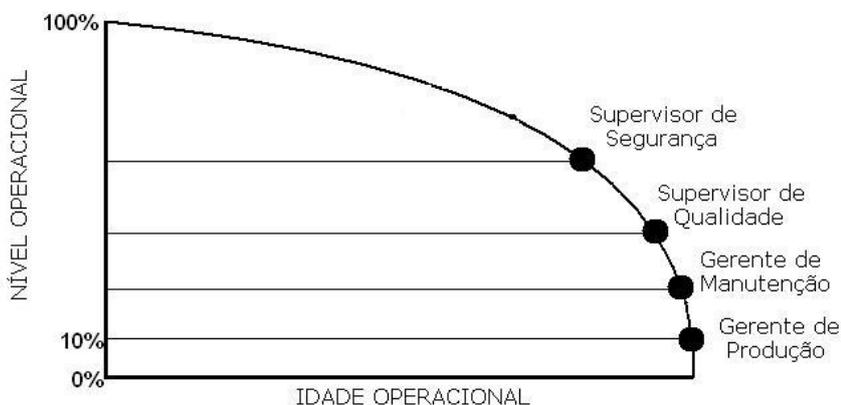


Figura 2.6 – Diferentes Visões sobre Falhas

Dependendo do contexto operacional, um supervisor de segurança poderá considerar variações mínimas de desempenho como ameaças à integridade física das pessoas e processos, classificando-as de falhas funcionais. Ao avaliar o processo, um supervisor de qualidade provavelmente classificará as pequenas variações no nível de desempenho como falhas de qualidade, apenas se elas ultrapassam os limites aceitáveis. O gerente de manutenção considerará que estas variações não justificam uma intervenção, e que as falhas só ocorrem quando o processo apresenta um desvio maior de qualidade. Já o gerente de

produção, preocupado com a queda no nível de operação, considerará que a falha só ocorre quando o desvio chegar praticamente a paralisar a produção.

Caberá ao analista de MCC negociar com estes especialistas e o proprietário da instalação qual a definição de falha que será adotada. Daí a importância da participação deles na equipe de análise, como fontes de informação e decisão sobre as falhas.

### **2.3.7.2**

#### **Caracterização dos Modos de Falha dos Equipamentos**

Identificadas as falhas possíveis em um sistema, o passo seguinte em direção à prevenção ou correção consiste na caracterização da forma como elas ocorrem, ou seja, os modos de cada falha. O estudo e modelagem dos mecanismos de falha específicos de cada tecnologia constituem as ferramentas básicas desta etapa

O estudo dos modos de falha deve iniciar-se pela definição precisa deste termo, segundo a MCC:

- um evento ou condição física, que causa uma falha funcional;
- um dos possíveis estados de falha de um item, para uma dada função requerida.

Ao contrário da falha funcional, usualmente associada a um estado anormal da função do equipamento, o modo de falha está associado ao evento ou fenômeno físico que provoca a transição do estado normal ao estado anormal. Os modos de falha descrevem como as falhas funcionais acontecem, ou seja, o mecanismo de falha ou o que pode falhar. Desta forma, eles também são as chaves sobre as formas adequadas de combate à falha funcional.

### 2.3.7.3

#### Causas de falhas dos Equipamentos

É importante distinguir o modo de falha e causa da falha. O modo descreve **o que** está errado na funcionalidade do item. Já a causa descreve **porque** está errada a funcionalidade do item. Esta distinção é essencial para se entender as finalidades da manutenção e do projeto.

É função da manutenção combater o modo de falha (sempre que ele ocorra), assim como é função do projeto combater a causa da falha (de uma vez por todas). Na impossibilidade de combater um modo de falha, cabe a manutenção indicar, ao projetista, as necessidades de modificações para eliminar a causa da falha.

Em geral, cada componente de um processo pode gerar um conjunto de modos de falha, característicos de sua tecnologia. Cada modo de falha, por sua vez, pode ser originado por um conjunto de causas. Na Tabela 2.2 [Siqueira, 2005], relaciona-se modos e causas de falha típicos de diversos componentes, dependendo da tecnologia.

Observa-se que, de acordo com os conceitos de modo e causa de falha, descritos na Tabela 2.2 identifica-se **o que** pode falhar em cada componente, além da caracterização da causa ou **porque** as falhas ocorrem.

Tabela 2.2 – Modos de Falha Típicos de Componentes Elétricos

Componente	Modo de falha	Causas da falha
Relé	contatos curto-circuitados	contatos soldados
	contatos abertos	sujeira nos contatos
	bobina interrompida	espira aberta
	bobina curto-circuitada	quebra de isolamento
Transformador	enrolamento curto-circuitado	quebra de isolamento
	enrolamento aberto	espira aberta
Motor	mancal aquecido	lubrificação insuficiente
	escovas abertas	escovas desgastadas ou sujas
	enrolamento aberto	espira aberta
	enrolamento curto-circuitado	quebra de isolamento
Servomotor	vazamento	desgaste dos selos
	atuador não retorna	linhas de fluido bloqueadas
Chave	contatos curto-circuitados	contatos soldados
	contatos abertos	sujeira nos contatos
Operador	operação correta no item errado	treinamento insuficiente
	operação errada no item errado	remuneração insuficiente
	operação errada no item certo	supervisão inadequada

#### 2.3.7.4

#### **Análise de Confiabilidade de Componentes**

A definição clássica do conceito de confiabilidade em engenharia é definida como a probabilidade de um componente, sistema ou equipamento cumprir suas funções pré-fixadas dentro de um período de tempo desejado e de baixo de certas condições operativas [Endrenyi, 1978 e Billinton, 1992].

A definição de confiabilidade descrita acima implica em um caso particular, onde a performance do equipamento será considerada adequada se este não falhar

durante o intervalo de tempo programado de serviço. Neste caso não são consideradas as possibilidades de reparos após falhas durante o intervalo de tempo programado para a execução da tarefa. Entretanto, a maioria dos equipamentos, de fato, são reparados na ocorrência de falhas e voltam a operar após a manutenção corretiva. Fica claro que a confiabilidade destes equipamentos deverá ser expressa de maneira diferente da definição clássica. O índice de confiabilidade para o caso de equipamentos reparáveis é denominado **Disponibilidade** (*Availability*), definida como [Endrenyi, 1978]:

*“A disponibilidade de um equipamento reparável é a duração do tempo, a longo prazo, no qual o equipamento permanecerá apto para realizar sua função requerida.”*

A disponibilidade também é uma medida probabilística, ou seja, é igual a probabilidade do equipamento encontrar-se em operação em um determinado instante de tempo escolhido aleatoriamente [Endrenyi, 1978, Billinton, 1992 e Li, 2004].

Desta forma, os componentes podem ser classificados em reparáveis e não-reparáveis:

Componentes não reparáveis: observados somente até falharem, porque não podem ser reparados, ou o reparo é inviável economicamente, ou apenas o histórico até a primeira falha é de interesse.

Componentes reparáveis: histórico alterna períodos de operação e falha. Possui maior interesse em sistemas de potência. Neste caso, o índice mais apropriado da confiabilidade do equipamento ou sistema é denominado “Disponibilidade” e será abordado mais especificamente no Capítulo 3 desta tese.

#### 2.3.7.4.1

### Confiabilidade de Componentes Não-Reparáveis

Na prática, as variáveis normalmente associadas à análise de confiabilidade são descritas por distribuições de probabilidades cumulativas. Isto pode ser

comprovado verificando-se que dificilmente todos os componentes de uma determinada função falharão ao mesmo tempo.

Conseqüentemente, este período para falhas obedece a uma distribuição de probabilidade cumulativa que pode, ou não, ser conhecida e que descreve a probabilidade de um dado componente falhar dentro de um intervalo de tempo específico ou sobreviver após este intervalo de tempo. Esta probabilidade é função do intervalo de tempo especificado [Endrenyi, 1978 e Billinton, 1992].

As principais distribuições de probabilidade cumulativas utilizadas na análise de confiabilidade são:

Distribuições discretas:

Binomial;  
Poisson;  
Geométrica (“sem memória”).

Distribuições Contínuas:

Uniforme;  
Normal;  
Exponencial;  
Weibull;  
Lognormal.

Na análise de confiabilidade de componentes não-reparáveis, a variável aleatória contínua é freqüentemente o tempo. Se em um determinado instante  $t \geq 0$ , o componente ou função estiver operando, então sua probabilidade de falha em  $t=0$  é zero. Quando  $t \rightarrow \infty$ , a probabilidade de falha tende à unidade. Esta característica é equivalente à função distribuição cumulativa e expressa uma medida da probabilidade de falha em função do tempo. Na terminologia de confiabilidade, a função distribuição cumulativa é conhecida como a Função Distribuição de Falhas, ou simplesmente a Distribuição de Falhas Cumulativa, designada por  $Q(t)$  [Billinton, 1992].

Na maioria dos casos é necessário estimar a probabilidade do equipamento “sobreviver” (não falhar) ao longo de um período de tempo, ao invés de estimar a

probabilidade deste equipamento falhar neste mesmo período de tempo. Esta probabilidade é o complemento da probabilidade de falha e conseqüentemente é a função complementar da distribuição de falha cumulativa, denominada Função de Sobrevivência  $R(t)$ .

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (2.1)$$

A derivada da função distribuição cumulativa de uma variável aleatória contínua resulta na função densidade de probabilidade. Para uma variável aleatória contínua, tem-se:

$$f_x(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x < X \leq x + \Delta x]}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Conseqüentemente,  $P[x < X \leq x + \Delta x] \cong f_x(x) \cdot \Delta x$

Na análise de confiabilidade, a derivada da distribuição de falha cumulativa  $Q(t)$ , é a função densidade de falhas  $f(t)$ , onde:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.3)$$

ou

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2.4)$$

e

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.5)$$

Uma função de densidade de falha típica é mostrada na Figura 2.6 [Billinton, 1992], onde os valores de  $Q(t)$  e  $R(t)$  também estão ilustrados.

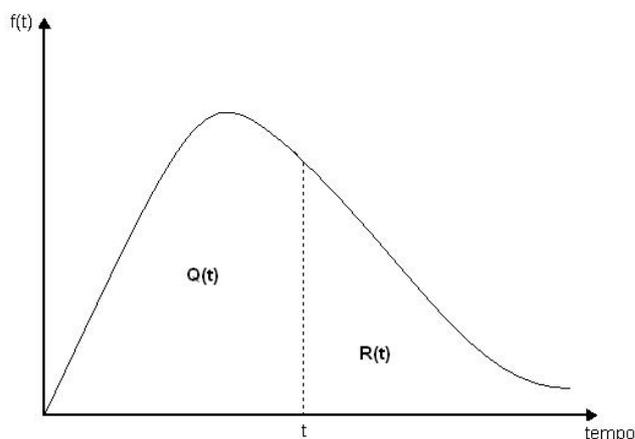


Figura 2.7 – Função Densidade de Falha Hipotética.  $Q(t)$ , Probabilidade do Equipamento Falhar Antes do Instante  $t$ ;  $R(t)$ , Probabilidade do Equipamento Sobreviver Após o Instante  $t$ .

Para finalizar os conceitos básicos de confiabilidade, há uma função denominada Taxa de Risco  $\lambda(t)$  (*Hazard Rate*). Em termos de falha, a taxa de risco é a medida da taxa com que a falha ocorre e neste caso passa a ser denominada de taxa de falha [Endrenyi, 1978 e Billinton, 1992].

Conceitualmente, a taxa de falha é a função densidade de probabilidade de ocorrer falha no instante após  $t$ , dado que sobreviveu até o instante  $t$ .

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t < T \leq t + \Delta t | T > t]}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Utilizando-se os conceitos de probabilidade condicional [Endrenyi, 1978 e Billinton, 1992], tem-se:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{P[t < T \leq t + \Delta t] \cap P[T > t]}{P[T > t]} \quad (2.7)$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{P[t < T \leq t + \Delta t]}{P[T > t]} \quad (2.8)$$

Logo:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.9)$$

onde

$$P[t < T \leq t + \Delta t] \cong f_T(t) \cdot \Delta t$$

$$F(t) = P[T \leq t]$$

Substituindo (2.1) em (2.9):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-Q(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.10)$$

Substituindo (2.3) em (2.10):

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (2.11)$$

Em termos físicos, a função densidade de falha permite que a probabilidade de falha seja avaliada em qualquer período de tempo, enquanto que a taxa de falha permite que a probabilidade de falha seja determinada após o intervalo de tempo  $t$ , dado que o equipamento sobreviveu até este período [Billinton, 1992].

Integrando (2.11):

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) \quad (2.12)$$

Resolvendo (2.12):

$$R(t) = \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (2.13)$$

Para os casos em que  $\lambda$  for constante e independente do tempo, (2.13) é simplificada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

que é a representação de uma função distribuição exponencial.

Qualquer destas funções é suficiente para descrever um mecanismo de falha. Na Tabela 2.3 [Endrenyi, 1978] apresentam-se as relações típicas entre elas, permitindo calcular as três funções restantes conhecendo-se apenas uma delas.

Tabela 2.3 – Modelagem Matemática das Funções Densidades e Distribuições de Probabilidade

Expressão	$f(t)$	$Q(t)$	$R(t)$	$\lambda(t)$
$f(t)$	1	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}$
$Q(t)$	$\int_0^t f(\tau)d\tau$	1	$1 - R(t)$	$1 - \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}$
$R(t)$	$\int_t^\infty f(\tau)d\tau$	$1 - Q(t)$	1	$e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}$
$\lambda(t)$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(\tau)d\tau}$	$\frac{dQ(t)/dt}{1 - Q(t)}$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$	1

Através da taxa de falha é possível classificar os diferentes mecanismos de falha encontrados nos sistemas.

### 2.3.7.5

#### Efeitos de Falhas

Além dos mecanismos de falha, obtidos através da análise de confiabilidade, a Manutenção Centrada na Confiabilidade baseia-se na escolha das atividades preventivas e corretivas nos efeitos adversos decorrentes das falhas, e nas conseqüências sobre a instalação, usuários e meio ambiente. Pesquisar os efeitos das falhas consiste em investigar como os modos de falha se propagam e influem nos objetivos do sistema em análise, e na funcionalidade da instalação.

O estudo de efeitos de falhas deve iniciar-se pela definição precisa deste conceito, segundo a MCC [Smith, 1992; Moubray, 1997; Li, 2004 e Siqueira, 2005]:

**Efeito** – o que acontece quando um modo de falha se apresenta.

Esta definição evidencia a finalidade do estudo dos efeitos das falhas: pesquisar os impactos dos modos de falha nas funções do sistema e na instalação. Nota-se que o efeito pesquisado deverá levar em conta o que ocorreria se nenhuma

tarefa específica de manutenção fosse realizada para antecipar, prevenir ou detectar a falha. Antes, porém, será importante distinguir entre os significados de *sintomas* e *efeitos* da falha.

O sintoma é uma manifestação visível de que uma falha potencial existe. Ele pode ou não indicar exatamente onde a falha potencial está localizada ou seu estágio de evolução para falha funcional. Muitos modos de falha não apresentam qualquer sintoma visível. Uma vez que ocorra falha funcional, qualquer indicação de presença não será mais um sintoma, mas sim um efeito da falha. Dito de outra forma, o sintoma é uma manifestação anterior à falha, enquanto o efeito é uma manifestação posterior à falha.

O efeito de cada modo de falha deverá ser pesquisado e descrito de tal forma que seja suficiente para avaliar suas conseqüências. Uma descrição típica do efeito de um modo de falha deverá conter informações suficientes para avaliar os seguintes aspectos [Siqueira, 2005]:

- **evidência da falha** – como é observado o efeito;
- **impacto na segurança** – que risco apresenta para as pessoas;
- **impacto ambiental** – que danos traz ao meio ambiente;
- **reflexo operacional** – como afeta a facilidade e o nível de produção;
- **resultado econômico** – qual o impacto financeiro que o efeito gera;
- **forma de reparo** – como retornar a função ao normal após a falha;
- **características compensatórias** – projetadas para reduzir o efeito.

Embora não seja obrigatório, recomenda-se [Smith, 1992; Moubray, 1997 e Siqueira, 2005] dividir a descrição do efeito nos seguintes níveis:

- **função** – impacto local na função correspondente;
- **sistema** – impacto no nível superior ao qual pertence;
- **instalação** – efeito na missão da instalação;
- **ambiente** – impacto no meio ambiente;
- **segurança** – ameaça à segurança pessoal da instalação.

Como evidências de falhas, devem ser registrados os meios de supervisão automáticos, tais como alarmes, sinalizadores, dentre outros, assim como sintomas que sensibilizam os sentidos humanos, tais como fumaça, cheiro, ruído entre outros. Os aspectos de segurança incluem, entre outros, riscos de incêndio, explosões, emissão de gases e resíduos tóxicos, eletrocussão, acidentes veiculares, contaminação de alimentos e remédios. Impactos na operação e economia podem decorrer de indisponibilidades de linhas de produção, restrições de capacidade, qualidade dos produtos, satisfação e atendimento ao cliente e nível de produção. Finalmente, a forma e o tempo necessários para restaurar a função após a falha devem ser analisados e registrados.

### **2.3.8**

#### **Terceira Etapa - Seleção de Funções Significantes**

A MCC classifica as conseqüências de uma falha em quatro grupos, como segue [Smith, 1992; Moubray, 1997 e Siquira, 2005]:

- conseqüências de falhas ocultas – as falhas ocultas não tem impacto direto, mas expõem a empresa a falhas múltiplas com conseqüências sérias, freqüentemente catastróficas.
- conseqüências sobre segurança e meio ambiente – uma falha tem conseqüências sobre a segurança se ela puder ferir ou matar alguém. Ela tem conseqüências sobre o meio ambiente se vier a violar qualquer padrão ambiental, seja da própria empresa, regional ou federal.
- conseqüências operacionais – uma falha tem conseqüências operacionais se ela afeta a produção (quantidade, qualidade do produto, serviço ao cliente ou custos operacionais, além do custo direto do reparo).
- conseqüências não operacionais – falhas evidentes que se enquadram nesta categoria não afetam a segurança nem a produção, portanto envolvem apenas o custo direto do reparo.

A classificação dos efeitos de falhas permite ao analista separá-los em classes equivalentes, em função dos impactos causados. O critério normalmente utilizado consiste no estabelecimento de uma associação com uma escala de severidade. Por definição, a severidade é uma medida usada para categorizar os efeitos potenciais de cada modo de falha. Através do nível de severidade, pode-se estabelecer, a priori, os limites de aceitabilidade de riscos e conseqüências de falhas, os quais nortearão as medidas corretivas e preventivas adotadas na manutenção. Assim, os limites de aceitabilidade são usados tanto para determinar os modos de falha que serão analisados como para desenvolver os requisitos de manutenção preventiva que impeçam ou limitem as conseqüências das falhas a níveis aceitáveis.

O primeiro destes objetivos serve para filtrar os modos de falha que não produzem efeito adverso na instalação, ou apenas efeitos imperceptíveis ou insignificantes, e para os quais a organização não precisa tomar qualquer medida preventiva. Os demais modos deverão ser avaliados quanto à gravidade dos seus efeitos, objetivando definir as medidas preventivas ou corretivas pertinentes, em função da avaliação dos riscos decorrentes.

### 2.3.8.1

#### **Avaliação de Risco**

O efeito de um modo de falha pode ser medido por uma avaliação de risco. Em geral, esta avaliação utiliza a expressão clássica [Nowlan, 1978, Billinton, 1994 e Li, 2004]:

$$Risco = Severidade \times Freqüência Relativa \quad (2.15)$$

Ou seja, o nível perceptível do risco é proporcional à freqüência com que os eventos ocorrem, ponderados pela severidade dos danos produzidos por cada evento. É comum acrescentar nesta equação uma ponderação adicional do risco em função da dificuldade em sua detecção [Siqueira, 2005], ou seja:

$$Risco = Severidade \times Freqüência \times Detectabilidade \quad (2.16)$$

Esta dificuldade pode ser estimada por uma escala de níveis de detectabilidade, escolhida e padronizada pela organização.

### 2.3.8.1.1

#### Níveis de Detectabilidade

A dificuldade na detecção de eventos de risco normalmente pode ser avaliada através de uma escala de cinco níveis, conforme ilustrado na Tabela 2.4 [Siqueira, 2005]. Neste caso, o nível de detectabilidade é associado à atividade necessária para sua detecção e falha.

É próprio da natureza humana ponderar os riscos em função do nível de informação disponível, e na frequência de ocorrência, justificando o interesse ao que possa ser perceptível.

Tabela 2.4 - Níveis de Detectabilidade de Risco

Nível	Detectabilidade	Descrição
1	Fácil	Falha detectável por procedimento operacional
2	Razoável	Falha detectável por inspeção operacional
3	Difícil	Falha detectável por ensaio funcional
4	Muito difícil	Falha detectável apenas por desligamento
5	Impossível	Falha totalmente oculta

### 2.3.8.1.2

#### Níveis de Frequência

Além da detectabilidade de cada falha, a análise de risco considera também a frequência de sua ocorrência, expressa continuamente, ou escalonada em níveis. Em uma das formas mais simples de análise de risco, a frequência de ocorrência de modos de falha pode ser medida numa escala de seis níveis, definidos conforme descrito na Tabela 2.5 [Siqueira, 2005].

Tabela 2.5 – Níveis de Frequência de Modos de Falha

<b>Frequência</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplo</b>
Freqüente	Esperado ocorrer freqüentemente Falha ocorrerá continuamente	$\geq 10^{-1}$ / ano
Provável	Ocorrerão várias vezes Falha ocorrerá com freqüência	$< 10^{-1}$ / ano $\geq 10^{-2}$ / ano
Ocasional	Possível ocorrer várias vezes Falha esperada ocorrer ocasionalmente	$< 10^{-2}$ / ano $\geq 10^{-3}$ / ano
Remoto	Esperada ocorrer algumas vezes Falha razoavelmente esperada	$< 10^{-3}$ / ano $\geq 10^{-4}$ / ano
Improvável	Possível de ocorrer, mas improvável Falha ocorrerá excepcionalmente	$< 10^{-4}$ / ano $\geq 10^{-5}$ / ano
Inacreditável	Essencialmente inesperada ocorrer Falha praticamente não ocorrerá	$< 10^{-5}$ / ano

Outras escalas podem ser utilizadas, especializadas por tecnologia, ou ramo de negócio da instalação, com maior ou menor número de classes. Em outros casos, pode ser suficiente usar diretamente uma escala qualitativa de severidade.

### 2.3.8.1.3

#### Níveis de Severidade

Muitas escalas de severidade são possíveis, dependendo da disponibilidade de recursos para análise. A prática da MCC tem evidenciado que uma escala de quatro ou cinco categorias de severidade é suficiente para classificar adequadamente o efeito de falhas. Estas categorias são derivadas da norma militar americana MIL-STD-882D<sup>1</sup>, conforme descrito na Tabela 2.6 [Siqueira, 2005], associando-as aos possíveis danos ambientais, pessoais ou econômicos da falha.

Cada categoria pode ser associada a um valor numérico, o qual é utilizado em (2.15) e (2.16), para ponderar o risco de acordo com a severidade do efeito. As

<sup>1</sup> Standard Practice for System Safety Program Requirements.

seções seguintes descrevem o significado de cada categoria de efeito, segundo sua severidade [Siqueira, 2005].

Tabela 2.6 – Níveis de Severidade de Risco

Categoria	Severidade	Valor	Dano		
			Ambiental	Pessoal	Econômico
I	Catastrófico	5	Grande	Mortal	Total
II	Crítico	4	Significante	Grave	Parcial
III	Marginal	3	Leve	Leve	Leve
IV	Mínimo	2	Aceitável	Insignificante	Aceitável
V	Insignificante	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente

Uma falha produz um efeito catastrófico se ela pode causar a morte de seres humanos, ou perda do sistema principal, ou grande dano ao meio ambiente. A morte de seres humanos é evidentemente inaceitável em qualquer empreendimento controlado. A perda do sistema principal poderá decorrer de incêndio, explosões ou qualquer outro efeito que produza a indisponibilidade irrecuperável de toda uma instalação ou processo. Este caso depende, evidentemente, da importância do sistema em estudo. Se não existirem sistemas adequados de proteção, o projeto terá que ser modificado invariavelmente.

Uma falha produz um efeito crítico quando ela pode causar ferimento severo ou mesmo a morte, ou dano significativo ao sistema ou meio ambiente, resultando na perda da missão da instalação. Embora menos grave que a morte, a possibilidade de ferimentos severos em seres humanos exige medidas também críticas. Já a dimensão dos danos significantes, e suas conseqüências, dependerão da aplicação e importância do sistema.

Uma falha produz efeito marginal quando pode causar ferimento leve ou dano pequeno no sistema ou meio ambiente, resultando em demora ou degradação de sua missão. A aceitabilidade de ferimentos de pequeno porte dependerá da frequência prevista, e da possibilidade ou não de adoção de medidas preventivas e corretivas. Os danos pequenos, que apenas degradem ou atrasem o cumprimento de uma missão/função, também deverão ser avaliados em relação à gravidade da própria missão/função.

Uma falha resulta em efeito mínimo quando provoca conseqüências reduzidas na operação, meio ambiente e segurança, abaixo dos níveis máximos permitidos das normas legais, demandando recursos econômicos mínimos para restauração à condição original.

Finalmente, uma falha produz efeito insignificante quando for insuficiente para causar ferimentos em seres humanos, ou danos ao sistema, ou impactos no meio ambiente insuficientes para infringir qualquer norma ambiental.

#### 2.3.8.1.4

##### **Aceitabilidade de Risco**

As escalas de severidade acima representam um nível resumido de avaliação de efeito, suficiente para análise dos sistemas mais simples. Caso não envolva risco de perda de vida humana, pode-se associar cada nível de severidade a uma escala numérica, que pode medir a conseqüência econômica, tal como perda financeira, material, temporal, entre outras, de interesse da organização. Se o efeito oferece risco de vida, a mensuração da gravidade às vezes limita-se à comparação com outros riscos incontroláveis, tais como as catástrofes e acidentes naturais, com os quais os seres humanos já convivem.

A aceitabilidade ao risco deverá ser definida pelo gestor da instalação ou organização, sendo comum à adoção de classes de aceitabilidade, como as descritas na Tabela 2.7 [Moubray, 1997], baseadas na atitude e ação consciente da organização diante de sua ocorrência ou possibilidade.

Tabela 2.7 - Níveis de Aceitabilidade de Risco

<b>Aceitabilidade</b>	<b>Descrição</b>	<b>Ação</b>
Intolerável	Inaceitável	Deve ser eliminado
Indesejável	Impraticável reduzir	Exige aprovação
Tolerável	Permite controle adicional	Exige aprovação
Desprezível	Permite controle adicional	Não exige aprovação

Se os componentes de risco (frequência, severidade e detectabilidade), conforme (2.15) e (2.16) forem definidos numericamente, será possível estabelecer faixas de valores para os diversos níveis de aceitabilidade, através de uma matriz de risco [Siqueira, 2005].

### 2.3.8.1.5

#### Matriz de Riscos

Combinando os níveis de frequência dos modos de falha, com os níveis de severidade e aceitabilidade já definidos, é possível construir uma matriz de riscos como a ilustrada na Tabela 2.8 [Siqueira, 2005]:

Tabela 2.8 - Matriz de Riscos

<u>Severidade:</u>	<b>Insignificante</b>	<b>Mínima</b>	<b>Marginal</b>	<b>Crítica</b>	<b>Catastrófica</b>
<u>Frequência:</u>					
<b>Frequente</b>	Indesejável	Indesejável	Intolerável	Intolerável	Intolerável
<b>Provável</b>	Tolerável	Indesejável	Indesejável	Intolerável	Intolerável
<b>Ocasional</b>	Tolerável	Tolerável	Indesejável	Indesejável	Intolerável
<b>Remoto</b>	Desprezível	Desprezível	Tolerável	Indesejável	Indesejável
<b>Improvável</b>	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Tolerável	Tolerável
<b>Inacreditável</b>	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível

Nota-se que esta matriz produz, para cada par de valores de severidade e frequência, um nível de aceitabilidade do risco classificado entre as opções da Tabela 2.8, para as quais já foi definida, *a priori*, a atitude da organização. Nesta matriz fica fácil traçar a linha divisória que separa as células toleráveis e desprezíveis das células indesejáveis e intoleráveis. Tal linha pode representar o limite de aceitabilidade de risco, sendo particulares e específicos de cada organização.

Novamente, se a severidade tiver sido quantificada em uma escala numérica, tal como o valor da perda econômica, e se a frequência for quantificada também em uma escala numérica, tal como a frequência mensal, anual, entre outras, então será possível atribuir uma escala numérica ao risco de cada falha através de

(2.15). Neste caso, a análise se resumirá a uma comparação numérica com uma escala de aceitabilidade.

### 2.3.9

#### Quarta Etapa

Nesta etapa são introduzidos os processos lógicos usados para determinar as ações que podem ser tomadas para prevenir ou corrigir cada modo de falha das funções significantes. A decisão final será tomada quando da análise de efetividade de cada atividade proposta, a ser estudada na quinta etapa.

Para que uma atividade de manutenção seja aplicável a um modo de falha, ela deve assegurar um conjunto de requisitos de natureza técnica e de ordem prática. Segundo a MCC, uma atividade de manutenção, para ser aplicável, deve garantir um dos seguintes objetivos:

- prevenir modos de falha;
- reduzir a taxa de deterioração;
- detectar a evolução das falhas;
- descobrir falhas ocultas;
- suprir necessidades e consumíveis do processo;
- reparar o item após a falha.

Qualquer atividade que consiga prevenir a ocorrência de um modo de falha será naturalmente preferida, sob ponto de vista técnico. Entretanto, a prevenção nem sempre é possível, por razões técnicas ou econômicas, sendo substituída por medidas paliativas destinadas à redução da taxa de deterioração nos modos de falha sujeitos a desgastes progressivos, ou a redução de taxa de falha, nos demais modos.

Nos modos de falha com evolução visível, pode ser viável a detecção precoce antes da falha. Em alguns casos, embora não seja possível detectar a evolução de uma falha, pode ser possível prever ou antecipar sua evolução através de modelos de deterioração e viabilizar a restauração ou substituição antes da falha funcional. Quando não são possíveis de detectar, ou antecipar, alguns modos de

falha devem ser “descobertos” após a ocorrência por não serem evidentes ao operador. Outros componentes exigem a execução de atividades operacionais periódicas, visando controlar a incidência da falha, tais como lubrificação ou reabastecimento de combustível, como forma de evitar que falhem. Em última instância, quando não for possível detectar, antecipar, controlar ou descobrir uma falha, ou seja, quando a prevenção não conseguir evitar, então será necessário recorrer a atividades corretivas para restaurar ou reparar a funcionalidade de um item, ou “reprojetar” a função, se for justificável.

### **2.3.9.1**

#### **Classificação de Atividades**

Para estudar a aplicabilidade das tarefas de manutenção, é usual dividi-las em atividades programadas (executadas em intervalos pré-determinados), e não-programadas (executadas quando da ocorrência de defeitos ou falhas funcionais). Vários critérios de programação podem ser utilizados, de acordo com o comportamento do modo de falha.

#### **Atividades Programadas**

A MCC subdivide as atividades programadas em quatro classes distintas, segundo o critério de programação:

- atividades direcionadas por tempo;
- atividades direcionadas por condição;
- atividades direcionadas por falhas;
- atividades direcionadas para operação.

As atividades direcionadas por tempo devem ser executadas em datas ou ciclos limites de operação. São adequadas para modos de falha com desgastes progressivos ou vida útil previsível, para as quais é possível antecipar o instante futuro da falha.

Já as atividades direcionadas por condição são recomendadas para modos de falha observáveis e evolutivos (deterioração). As técnicas preditivas são

utilizadas largamente nestes casos, quando se consegue detectar a evolução futura da falha.

As atividades direcionadas por falhas destinam-se essencialmente a descobrir a ocorrência de modos de falha ocultos, visando evidenciar sua existência e prevenir sua evolução para falhas múltiplas.

Finalmente, as atividades orientadas para operação visam suprir o processo de materiais consumíveis, tais como combustíveis e lubrificantes, e preservar o ambiente da instalação, tais como limpeza, conservação de iluminação entre outros.

### **Atividades Não-programadas**

Por sua vez, a MCC classifica as atividades não programadas em duas classes distintas, segundo o motivo da execução:

- atividades de correção de defeitos;
- atividades de correção de falhas.

As atividades de correção de defeitos são executadas quando da identificação de um estado de deterioração funcional (pela manutenção programada, por uma análise de dados e desempenho operacional, ou pela equipe de operação), visando corrigir o defeito antes de sua evolução para uma falha.

As atividades de correção de falhas são executadas após uma falha, visando restaurar, substituir ou reparar a capacidade funcional do item.

#### **2.3.9.1.1**

### **Denominação das Atividades**

Para facilitar a referência, esta seção classifica e padroniza a denominação das tarefas de manutenção da MCC através das seguintes siglas e nomes:

A *Substituição Preventiva* - **SP** consiste na reposição programada de um item em operação, em determinada idade limite, para prevenir sua falha funcional. Aplica-se principalmente a equipamentos com vida útil pré-definida, tais como

baterias seladas, células de combustível nuclear, entre outros, para os quais seja impossível ou anti-econômica a operação. Para ser efetiva, a substituição preventiva deve ocorrer antes do período de desgaste, e se a falha afetar a segurança, a tarefa deverá garantir a ausência de falha, ou seja, repor o equipamento a uma condição próxima ao estado inicial antes da falha.

A *Restauração Preventiva* - **RP** consiste na correção programada do desgaste ou desvio de um item em operação, em determinada idade limite, para prevenir sua falha funcional. Aplica-se principalmente a equipamentos sujeitos a desgastes progressivos, para os quais seja possível e econômica sua recuperação. Para ser efetiva, uma restauração preventiva deve ocorrer antes do início do período de desgaste. Se a falha ameaçar a segurança física, a tarefa deverá garantir a ausência de falha.

A *Inspeção Preditiva* - **IP** consiste na verificação programada, por sentido humano ou instrumental, do estado de evolução de uma falha potencial, como objetivo de detectar e corrigir antes da evolução para uma falha funcional. Dois requisitos básicos compõem o critério de efetividade da inspeção preditiva:

- a) refere-se à viabilidade de se executar a tarefa em intervalos que possibilitem a eliminação da falha, antes que ela ocorra. Logicamente, se a inspeção preditiva só detectar a evolução de uma falha quando ela não puder ser mais evitada, então será desnecessária.
- b) refere-se à frequência de inspeção necessária para prevenir a falha. Para ser efetivo, o intervalo entre inspeções não poderá ser superior ao tempo de evolução entre a detecção da falha potencial e a falha funcional, conforme pode ser visualizado na curva de degradação da resistência à falha do item, reproduzida na Figura 2.8 [Siqueira, 2005].

Por definição, o intervalo de inspeção - **PF** corresponde ao espaço de tempo (ou ciclo operacional) entre o instante em que se caracteriza uma condição de falha potencial definida e o ponto onde se caracteriza uma condição de falha funcional definida. A inspeção preditiva terá um intervalo razoável se este for inferior ao intervalo **PF**. Quanto maior o intervalo **PF**, melhor será a efetividade da inspeção preditiva, com maior tempo para prevenção da falha.

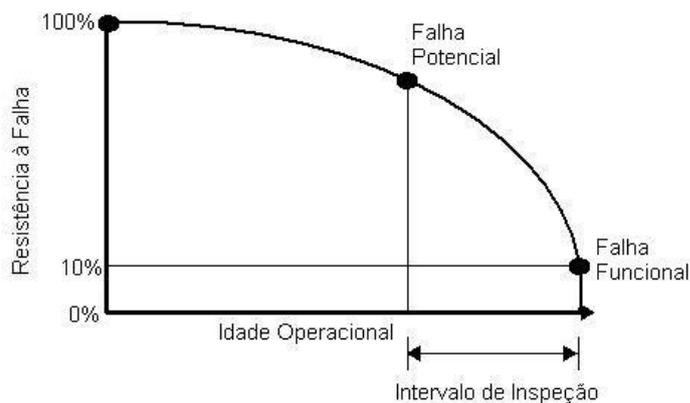


Figura 2.8 – Curva de Degradação da Resistência à Falha

A *Inspeção Funcional* - **IF** consiste na verificação programada do estado funcional de um item, visando descobrir uma falha funcional que já tenha ocorrido, mas que não seja visível para a equipe de operação. Envolve invariavelmente testar a funcionalidade de um item. A garantia de efetividade reside na escolha do intervalo de inspeção. Segundo a MCC, o critério de escolha depende se uma falha múltipla impacta a segurança ou apenas a operação/economia do processo. Se afetar a segurança, o intervalo deve ser tal que reduza a probabilidade de falha múltipla a um nível aceitável. Caso contrário, um estudo de custo/benefício deve avaliar o intervalo que produza o melhor resultado operacional/econômico, considerando a falha múltipla.

O *Serviço Operacional* - **SO** consiste na lubrificação ou reabastecimento de combustíveis usados na operação normal do equipamento, e outras atividades repetitivas, tais como a conservação e limpeza do ambiente, destinadas a controlar a incidência de falhas. Para ser efetivo, um serviço operacional de manutenção deve ser possível de execução, com uma frequência razoável para as disponibilidades operacionais, e suficiente para atender aos padrões de higiene e conservação ambientais aplicáveis à instalação.

A *Manutenção Corretiva* - **MC** consiste na restauração não-programada da capacidade funcional de um item, visando corrigir defeitos ou falhas potenciais detectadas por uma atividade programada ou outro meio, antes que evolua para uma falha funcional.

O *Reparo Funcional* - **RF** consiste na recuperação não-programada da capacidade funcional de um item, visando reparar falhas funcionais já ocorridas, não prevenidas pelas atividades programadas.

### **Atividades Default**

Uma atividade *default* é recomendada pela MCC apenas quando nenhuma outra atividade preventiva for aplicável e efetiva para prevenir uma falha funcional. Esta situação pode ocorrer por motivos tecnológicos, quando o projeto do item impossibilita a manutenção, ou por falta de informação da equipe de análise sobre o projeto ou mecanismo de falha. Neste último caso, a escolha da tarefa *default* justifica-se apenas como forma de dar continuidade às demais etapas, devendo ser reavaliada quando os dados se tornarem disponíveis.

Duas atividades são classificadas como *default* pela MCC:

- mudança de projeto;
- reparo funcional.

Entende-se por mudança de projeto qualquer atividade que altere as especificações funcionais do item, sejam elas de natureza construtiva ou operacional.

O reparo funcional (ou simplesmente reparo) corresponde à decisão de operar o item sem manutenção preventiva ou mudança de projeto, até a ocorrência de uma falha, quando então será realizada sua restauração ou substituição. Para ser efetiva, além da atividade em relação à mudança de projeto, esta opção deverá obrigatoriamente, ser aceitável em termos de segurança e preservação do ambiente. Caso contrário, apenas uma mudança de projeto será admissível.

### **2.3.10**

#### **Quinta Etapa**

A quinta etapa, avaliação da efetividade das atividades, constitui-se em um processo estruturado para determinar se uma tarefa de manutenção preventiva é efetiva para reduzir, a um nível aceitável, as conseqüências previstas para uma

falha. Como resultado deste processo, uma das seguintes opções deverá ser escolhida:

- manutenção preventiva é recomendada;
- manutenção preventiva é desnecessária;
- outra ação alternativa (*default*) sugerida.

Note-se que uma atividade pode ser considerada aplicável, na quarta etapa, a um determinado modo de falha, em termos técnicos, mas não efetiva em termos econômicos e operacionais.

### 2.3.11

#### Sexta Etapa

Na sexta etapa, seleção das tarefas aplicáveis e efetivas, utiliza-se um processo estruturado para determinar a melhor tarefa, baseada em:

- resultado do processo;
- impactos operacionais;
- segurança física;
- impactos ambientais.

Dois sub-processos são utilizados nesta etapa:

- uma Árvore de Decisão é usada para classificar a consequência de cada modo de falha.
- esta classificação é usada por uma Lógica de Decisão para gerar o Plano de Manutenção contendo as atividades aplicáveis e efetivas para cada modo de falha.

Os resultados do processo, em geral, serão medidos por uma variável econômica, ou qualquer outro indicador escolhido pela entidade proprietária da instalação. Como produto deste processo, obtém-se a lista das tarefas escolhidas para compor o Programa de Manutenção de cada item analisado.

### 2.3.12

#### Sétima Etapa

Finalmente, na sétima etapa, estabelecem-se os métodos para definição da periodicidade ou frequência de execução das atividades selecionadas, assim como o planejamento e estruturação do processo de implementação do método na empresa. Quatro sub-processos são utilizados nesta etapa:

- análise de confiabilidade – determinação das estatísticas descritivas de confiabilidade da população dos componentes;
- análise da manutenção – determinação das estatísticas descritivas da manutenção da população dos componentes;
- análise da produtividade - determinação das estatísticas descritivas de resultados gerados pela manutenção e falha dos componentes;
- otimização – cálculo do intervalo ótimo de cada atividade do plano de manutenção.

As estatísticas são obtidas preferencialmente por amostragem no histórico de desempenho dos equipamentos ou base de dados similares, ou por estimativas baseadas no conhecimento de especialistas.

## 2.4

### MCC no Setor Elétrico Brasileiro

Em 1992, a CHESF foi a empresa pioneira do setor elétrico brasileiro a adotar as técnicas de MCC [Siqueira, 1999]. Desde então algumas das principais companhias do setor começaram a realizar projetos pilotos para a implementação da MCC conforme pode ser observado na Tabela 2.9 [CIGRÉ GT B3.01, 2006].

Tabela 2.9 – MCC no Setor Elétrico Brasileiro

Empresa	início	Programa
CHESF	1992	Proteção da transmissão
COPEL	1995	Todas as usinas
	1996	Todas as usinas
FURNAS	1999	45 subestações – projeto piloto na UHE Itumbiara e SE Adrianópolis
CEMIG	2003	Projeto piloto em 7 subestações – 1 por região
Transmissão Paulista	2004	Todas as instalações – projeto piloto SE Ribeirão Preto
ELETROSUL	2004	Todas as subestações – projeto piloto SE Blumenau
CHESF	2006	Centros de operação
CHESF	2006	Disjuntores – projeto de P&D
CPFL Energia	2006	Rede primária – projeto piloto na distribuição de Sertãozinho
ELETRONORTE	2006	Projeto piloto na SE Imperatriz – compensador síncrono

Na Figura 2.9 [CIGRÉ GT B3.01, 2006], apresenta-se os critérios adotados pelas empresas para a determinação do intervalo entre manutenções. Observa-se através da análise dos dados apresentados na Figura 2.9, que somente 8% dos critérios de periodicidade estão sendo adotados com dados estatísticos de confiabilidade dos equipamentos.

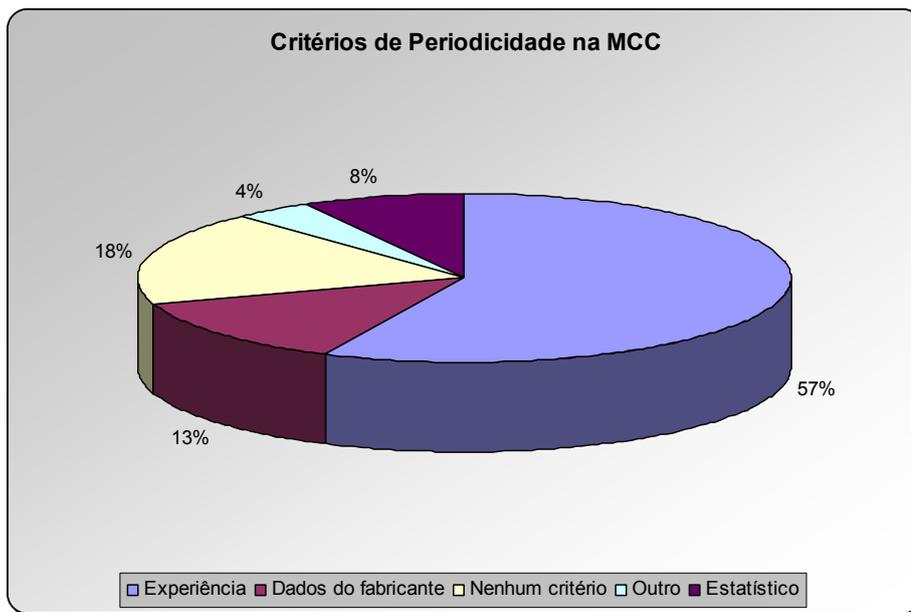


Figura 2.9 – Critérios de Periodicidade na MCC

A maioria das empresas estão adotando a experiência como critério para estabelecer o melhor momento de realizar as manutenções porque estas não possuem uma base de dados históricos do funcionamento dos equipamentos. Para realizar este levantamento de dados, e montar uma estrutura de dados suficiente para estabelecer o melhor critério de periodicidade da manutenção, é necessário um grande período de tempo para coletar todas as informações a respeito de dados de confiabilidade dos equipamentos.

Este longo caminho pode gerar uma certa inconveniência para as empresas, por isto a preferência por levar em conta a experiência para a determinação do melhor intervalo de manutenção. Por outro lado, a adoção do critério de periodicidade com base na experiência da utilização do equipamento pode levar a resultados pouco precisos.

## 2.5

### Projetos de Pesquisa em MCC

No intuito de estabelecer resultados mais precisos na adoção do método de MCC, algumas empresas ao redor do mundo estão recorrendo a projetos de pesquisa para obterem os dados de confiabilidade de seus equipamentos.

O EPRI (*Electric Power Research Institute*) foi o pioneiro da aplicação de RCM nos sistemas de potência americanos. Em 1996, o EPRI publicou na Internet um histórico de seu trabalho e pesquisa sobre MCC intitulado “A Revolução da Manutenção” (Douglas, 1996), do qual serão destacados alguns pontos:

O EPRI foi o pioneiro na utilização da MCC, em 1984, nas plantas nucleares e, recentemente, em 1994, nos sistemas de distribuição.

Aplicando novas tecnologias de diagnóstico está obtendo uma habilidade de monitoria da condição do equipamento e estabeleceu um programa de manutenção preditiva que permite a utilitária tomar decisões a respeito de manutenção com maior tempo e prevenção de custos devido à falha dos equipamentos.

Desde 1986, o EPRI tem operado em cooperação com a estação geradora da PECO ENERGY, o *Monitoring & Diagnostic Center*, em Eddystone, Pensilvânia, para avaliar sistemas de diagnósticos que aperfeiçoem a operação e manutenção de plantas fósseis. Foi desenvolvida uma *workstation* que usa uma arquitetura de sistema aberto e recebe informações de várias fontes da planta como vibração, óleo lubrificante, termografia entre outros.

Em 1994, o EPRI estabeleceu o *Instrumentation & Control Center* em Kingston, Tennessee, para desenvolver novos sensores e sistemas de controle, permitindo que estas tecnologias sejam usadas no controle automático das plantas. A intenção é trabalhar com os fabricantes para desenvolver novos sensores que atendam as necessidades específicas do setor elétrico e aos integrados nos programas de manutenção preditiva.

O EPRI tem construído sua experiência com MCC ao longo das últimas décadas, e na atualidade prepara suas filiais para os rigores da competição, que considera um processo organizado de técnicas de tomada de decisão.

Cita-se também o método desenvolvido por Lina Bertling do Royal Institute of Technology da Suécia. Conforme já mencionado nesta tese, este método está

sendo aplicado nos estudos envolvendo sistemas de distribuição de energia suecos: linhas sobrecarregadas na região rural do sudeste da Suécia, e linhas subterrâneas no centro de Estocolmo, o sistema *Birka* [Bertling, et all. 2005]:

Na primeira etapa deste estudo agruparam-se os componentes de acordo com seu tipo a partir dos dados das taxas de falha de cada componente e foram calculados os índices de confiabilidade resultantes para o sistema considerando cargas diferentes. Esta análise foi repetida para diversos níveis de tensão e carga. O resultado forneceu uma listagem, em ordem de prioridade, dos equipamentos que necessitariam de manutenção.

Em seguida foram identificadas as causas da falha através da análise da função do componente e dos modos de falha. Determinou-se o percentual que cada causa de falha contribui para o total do número de falhas do componente e por último, identificou-se os possíveis efeitos de adoção de uma estratégia de manutenção alternativa.

Finalizando, foi elaborada uma análise de custo-benefício para cada estratégia de manutenção com relação aos custos de interrupção e de manutenção para cada equipamento.

Já o Centro de Pesquisa da Eletrobrás – CEPEL, vem desenvolvendo, sob supervisão do engenheiro Carlos Julio Dupont, vários projetos de P&D realizados para as empresas do grupo Eletrobrás e a Light na área de desenvolvimento de técnicas, ensaios e software para análise e diagnóstico de equipamentos. A integração destes trabalhos resultou no Projeto CME - DianE [Dupont, 2008].

Dentre as principais diretrizes deste projeto constam:

Evoluir o Sistema DianE - Sistema de Análises e Diagnóstico de Equipamentos de sistemas elétricos para permitir a análise simultânea de todos os equipamentos da empresa.

Estabelecer e consolidar o conceito de CME – Central de Monitoramento de Equipamentos

Gerar um sistema aberto que seja um integrador de outros sistemas e que seja modular e evolutivo;

Usar o processo MCC para lidar com o problema de encontrar o que é importante analisar e o que fazer quando uma falha funcional for detectada, considerando o impacto negativo das causas das falhas;

Obter uma integração de sintomas, diagnósticos e indicadores de graus de risco, gerando listas ordenadas

Consolidar a questão do monitoramento e análise de condição de equipamentos de sistemas elétricos em rede corporativa: aquisição de dados; pré-processamento; banco de dados histórico; análise de evidências e riscos; diagnóstico;

Na Tabela 2.10 [CIGRÉ GT B3.01, 2006] apresentam-se alguns programas importantes que estão sendo implementados ou em fase de conclusão no setor elétrico ao redor do mundo.

Tabela 2.10 – Projetos de Pesquisa em MCC

Empresa	início	País	Programa
EDF	1992	França	Optimization de la Maintenance par la Fiabilité – OMF Workstation
EPRI	1996	EUA	RCM Technical Reference and Workstation for Power Delivery
Royal Institute of Technology	2005	Suécia	Projeto RCAM – Reliability Centered Asset Maintenance
CEPEL	2000	Brasil	Projeto DianE – RCM Diagnósticos de Equipamentos
CIGRÉ	2005	Brasil	Manutenção Centrada na Confiabilidade de Subestações
ANEEL	2005	Brasil	Padronização de Mensagens RCM na Gestão Interorganizacional de Ativos
PSerc	2006	EUA	Métodos de Otimização da RCM

## 2.6

### Conclusão do Capítulo

O gerenciamento de ativos é a arte de balancear custos, riscos e performance. Para atingir este balanço é necessário o apoio de três pilares: gerenciamento, engenharia e informação. Iniciativas podem ser tomadas por qualquer um dos pilares, mas é fundamental a coordenação com os outros dois pilares.

Especificamente no setor elétrico, no ambiente de crescimento da demanda por energia e de pressões econômicas para diminuir os custos de manutenção, possíveis falhas em um sistema de transmissão podem trazer consequências catastróficas no balanço da empresa transmissora.

O gerenciamento de ativos é capaz de lidar com os mais importantes aspectos de um sistema de transmissão e de distribuição de energia: envelhecimento da infra-estrutura, confiabilidade, utilização dos ativos, planejamento, automação, manutenção, seleção de projetos e análise de riscos.

O gerenciamento de ativos pode ser um processo extremamente eficaz desde que seja elaborado com base em três funções: processo único, sistemas de apoio eficaz e parceria entre os responsáveis pela administração, engenharia e informação.

Para que se possa definir uma boa estratégia de operação de ativos físicos, deve-se fazer uma análise dos equipamentos e dos custos incorridos por estas medidas de aperfeiçoamento.

A análise de risco talvez seja o aspecto mais complexo do gerenciamento de ativos. Muitos executivos observam este tópico em termos de gerenciamento de risco financeiro, onde métodos estatísticos já estão bem estabelecidos [IEEE/PES Task Force, 1999 e Bartlett, 2002]. Neste caso, a relação entre o risco e o retorno é quantitativa e o risco pode ser identificado através de diversificações de ações, opções, mercados futuros, *swaps* e outros instrumentos financeiros.

No gerenciamento de ativos físicos do setor elétrico, a análise de risco pode ser descrita como um conjunto de ganhos financeiros da empresa versus o nível de perdas devido a uma ocorrência de uma determinada falha [Brown, 2005]. Uma avaliação completa do risco envolve conseqüências estratégicas e econômicas de uma determinada interrupção do fornecimento de energia. Em termos econômicos, são levadas em consideração as penalidades devido a interrupções do sistema, bem como custos por indisponibilidades de circuitos. As conseqüências estratégicas são altamente influenciadas pelo processo de manutenção adotado pela empresa.

O tratamento adequado ao risco requer o conhecimento das condições dos equipamentos, os impactos de estratégias de manutenção e operação nos equipamentos e a probabilidade de ocorrência de falha de um equipamento. Também são necessários sistemas de informação que auxiliem na mitigação do risco na forma de inspeção, manutenção, operação, substituição de equipamentos e modificações de sistemas.