UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS: UMA PROPOSTA PARA USO DE ANÁLISE DE RISCO NO DIAGRAMA DE DECISÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AUTOR: **JOSÉ LUIS OLIVEIRA RAPOSO**

ORIENTADOR: **PROF. DR. NIRALDO ROBERTO FERREIRA**

SALVADOR, BAHIA - BRASIL

2004

JOSÉ LUIS OLIVEIRA RAPOSO

MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS: UMA PROPOSTA PARA USO DE ANÁLISE DE RISCO NO DIAGRAMA DE DECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

SALVADOR, BAHIA - BRASIL

2004

MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS: UMA PROPOSTA PARA USO DE ANÁLISE DE RISCO NO DIAGRAMA DE DECISÃO

JOSÉ LUIS OLIVEIRA RAPOSO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica.

_____

Prof. Amauri Oliveira, Dr.
Coordenador do Programa

BANCA EXAMINADORA:

_____

Prof. Niraldo Roberto Ferreira, Dr.
Orientador -Universidade Federal da Bahia (UFBA)

_____

Prof. Edgardo Guillermo Camacho Palomino, Dr.
Examinador Interno - Universidade Federal da Bahia (UFBA)

_____

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, Dr.
Examinador Externo - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Salvador, 03 de dezembro de 2004

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia

Raposo, José Luis Oliveira
R219m Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão. / José Luis Oliveira Raposo. - Salvador, 2005.

134 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira.
Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2005.

1. Sistemas elétricos. 2. Sistemas de energia elétrica - Proteção. I. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. II. Ferreira, Niraldo Roberto. III. Título.

CDD 20.ed. 621.317

A Deus, pela sua presença constante na minha vida.

A minha esposa Socorro e aos meus filhos, Gabriela e Luis Henrique, pela compreensão e incentivo nos momentos que exigiram dedicação ao trabalho.

Aos meus pais Osvaldo e Maria Lúcia, pelo incentivo e dedicação à educação de seus filhos, base de todo este trabalho.

À Profª M.Sc. Maria José de Freitas Mendes, pelo incentivo em momentos importantes nas etapas do trabalho.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja registrar os agradecimentos àqueles que contribuiram para tornar realidade este projeto.

Ao Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira, por sua orientação e incentivo durante o curso de mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica.

Ao Eng. M.Sc. Jaime Eduardo Pinto Lima da DET NORSKE VERITAS, pelos comentários e colaboração durante a realização do trabalho.

Ao Eng. M.Sc. Salomão David de Araújo Alves Ferreira, pela sua colaboração e incentivo com o fornecimento de material didático.

Aos demais componentes da equipe de trabalho do MCC do TG-8301: Rogéria Q. de Oliveira, Andrei G. Fraga, Ana Cleude R. da Silva, Adalberto S. Magalhães, Antônio Cardoso Pereira, Flávio Rony Ribeiro, João Rosa e Flávio L. B. Diniz.

À PETROBRAS, uma prova da capacitação técnica da engenharia brasileira, pelo reconhecimento e oportunidade para realizar este trabalho.

RESUMO

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) , em inglês Reliability Centered Maintenance (RCM), é um enfoque sistemático para o planejamento da manutenção, considerando aspectos de confiabilidade. Inúmeros benefícios são apresentados na literatura decorrentes da aplicação da MCC em programas de manutenção. Há diversos casos de sucesso na sua aplicação, inclusive em programas de manutenção de sistemas e equipamentos elétricos. Entre os principais benefícios proporcionados pelo uso da Manutenção Centrada na Confiabilidade tem-se: redução das atividades de manutenção preventiva, redução dos custos dos programas de manutenção, aumento da disponibilidade dos sistemas, aumento da vida útil dos equipamentos, redução do número de itens de sobressalentes, especialização de pessoas e motivação para o trabalho em equipe.

Apesar de reconhecidamente vantajosa quanto a sua aplicação, estudos realizados indicaram a possibilidade de acrescentar melhorias na sistemática da MCC. As melhorias citadas na bibliografia consultada mostram, por exemplo: a necessidade da MCC ser apoiada através de modelos probabilísticos na definição das estratégias de manutenção, alguns pontos falhos da MCC no tratamento dos riscos de segurança envolvidos em atividades de manutenção, a existência de um vazio entre a MCC e a análise de riscos, a falta de uma lógica detalhada na determinação do intervalo apropriado para realizar cada tarefa de manutenção escolhida, ficando o mesmo dependente da experiência do analista, incertezas envolvidas durante o seu uso, a necessidade de comparar a eficiência relativa de cada tática de manutenção possível, a falta de desenvolvimento de conhecimento dos especialistas envolvidos na sistemática e a possibilidade de erros decorrentes da adoção de premissas falsas no início do trabalho de MCC.

Este trabalho de dissertação mostra uma aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade no sistema elétrico de uma unidade industrial de grande porte com introdução de melhorias na sua metodologia. A contribuição ao método resultou da identificação e implementação de uma ferramenta que pudesse agregar melhorias na sistemática tradicional da MCC, de modo a reduzir sua dependência de julgamentos subjetivos do especialista na etapa de classificação dos modos de falha no diagrama de decisão, criando mecanismos que auxiliem a definição da existência de impacto na segurança industrial, saúde ou meio ambiente. Lista de verificação e Análise Preliminar de Riscos foram introduzidas na sistemática estabelecendo um elo com o diagrama de decisão da metodologia.

ABSTRACT

Reliability Centered Maintenance (RCM) is a sistematic approach to maintenance planning, regarding reliability aspects. Several benefits are presented in the bibliography in consequence of RCM aplications on maintenance programs. Many successful cases have been found including electrical equipments and systems maintenance programs. The decrease of preventive maintenance activities and maintenance programs cost, increase of system availability and equipment life time, besides the decrease of spare parts quantity, technicians specialization and team's work motivation are some of the main benefits caused by the RCM use.

In spite of being known as an advantageous technique , recent studies pointed the possibility of adding improvements on RCM methodology. Improvements mentioned in the searched literature shows the necessity of RCM to be supported by probabilistic models in the definition of maintenance strategies, some RCM weak spots in safety risks treatment involved in maintenance activities, the existence of a gap between RCM and hazard assessment, the lack of a detailed logic to define an appropriated interval to execute each selected maintenance task becoming dependent on the analyst experience, involved uncertainties during the use, the necessity to compare the relative efficiency of each possible maintenance tactics, the lack of knowledge development of specialists involved in the systematic and possibility of mistakes caused by false premises in the beginning of RCM tasks.

This work shows an application of Reliability-Centered Maintenance on an electrical system of a large size industry with introduction of improvements on its methodology. The contribution to RCM came from identification and implementation of a tool that could add improvements on its traditional methods to reduce its dependence on a specialist subjetive judgment in the failure modes classification stage, creating helpful mechanisms to define the impact suffered by the environment, health or safety. Checklist and Preliminary Hazard Analysis were introduced and connected with the RCM logic tree.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS

Página

LISTA DE TABELAS

Página

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC - Análise de Causa e Consequência (*Cause-Consequence Analysis*)

ACB - Análise de Custo-Benefício

AE - Análise por Árvore de Eventos (*Event Tree Analysis*)

AF - Análise por Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis*)

AGREE - Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment

AH - Análise Histórica

AIChE - American Institute of Chemical Engineers

APR - Análise Preliminar de Risco

AQR - Análise Quantitativa de Risco

AV - Análise de Vulnerabilidade (Vulnerability Models)

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

CCPS - Center for Chemical Process Safety

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

COPPE - Coordenação do Programa de Pós-graduação de Engenharia da UFRJ

DNV - Det Norske Veritas

EPI - Equipamento de Proteção Individual

EPRI - Electric Power Research Institute

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos (*Failure Modes and Effect Analysis*)

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

HAZOP - Análise de Perigos e Operabilidade (*Hazard and Operability Analysis*)

IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers

KBC - KBC Advanced Technologies Inc.

LV - Lista de Verificação

MASSI - Meio Ambiente, Saúde Ocupacional e Segurança Industrial

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

MIL - Série de normas americanas para fins militares (*U.S. Military Standards)*

MTTF - Tempo de vida médio (*Mean Time to Failure*)

MTBF - Tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failures*)

MTTR - Tempo médio para reparo (*Mean Time to Repair*)

MSG - Maintenance Steering Group

PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A.

PSP - Programa de segurança de processo

RCFA - Análise de Causa-Raiz de Falha (*Root Cause Failure Analysis*)

RCM - Reliability-Centered Maintenance

RLAM - Refinaria Landulpho Alves - Mataripe

TG - Turbo-gerador

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p - Custo anual de produção;

C_M - Custo anual de manutenção preventiva;

ΔC_p - Amostra do custo anual de produção;

ΔC_M - Amostra do custo anual de manutenção preventiva;

$d(t)$ - Tempo de manutenção (*Down time or mean forced outage time)*;

D - Disponibilidade;

$f(x)$ ou *fdp* - função densidade de probabilidade de uma variável x;

$f(t)$ - função densidade de falha, densidade de falha ou função densidade no tempo t;

f_i - frequência de um tipo de acidente em acidente em potencial;

$F(x)$ ou *fda* - função distribuição acumulada de uma variável x;

$F(t)$ - função distribuição de probabilidade de falhas ou função distribuição acumulada de falhas no tempo t;

$g(t)$ - função densidade de probabilidade de tempo de reparo.

$h(t)$ - taxa de falha ou taxa de falha instantânea. Mesmo que $z(t)$.

$H(t)$ - função de falha acumulada;

k - número inteiro;

$M(t)$ - função manutenibilidade ou probabilidade de execução do reparo no tempo t;

n - número inteiro;

N - número total de pessoas sob o risco;

$n_s(t)$ - número de equipamentos sobreviventes;

$n_f(t)$ - número de equipamentos em falha;

r - taxa de risco calculado;

$R(t)$ - Confiabilidade, função confiabilidade ou probabilidade de sobrevivência no tempo t;

$Q(t)$ - não confiabilidade de sobrevivência, probabilidade de falha no tempo t ou função distribuição de falha;

t - variável tempo;

t_o - período ótimo de manutenção preventiva;

t_e - tempo esperado para realizar manutenção de emergência;

t_s - tempo esperado para realizar manutenção programada;

$u(t)$ - Tempo de disponibilidade (*Up Time*);

x_i - número de mortes em um tipo de acidente em potencial;

$z(t)$ - taxa de falha ou taxa de falha instantânea;

$\lambda(t)$ - taxa condicional de falha , função de risco ou taxa de falha em função do tempo;

$\Gamma(x)$ - Função Gama;

λ - taxa de falha constante;

$\mu(t)$ - taxa de reparos (números de reparos efetuados por total de horas de reparo do equipamento).

! - fatorial;

μ -média;

σ - desvio padrão;

α, β, b, c, λ, n, μ_1, μ_2, γ_1, γ_2, θ, k, p, q - parâmetros diversos usados em funções distribuição.

1 - INTRODUÇÃO

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) , traduzido da expressão em inglês Reliability Centered Maintenance (RCM), é um enfoque sistemático para o planejamento da manutenção, considerando aspectos de confiabilidade. O objetivo desta ferramenta é assegurar que um sistema ou item continue a preencher as suas funções requeridas. A ênfase é determinar a manutenção preventiva necessária para manter o sistema funcionando, ao invés de restaurar o equipamento a uma condição ideal. As tarefas de manutenção são otimizadas através da análise das conseqüências de suas falhas funcionais (operacionais), sob o ponto de vista de segurança, meio ambiente, qualidade e custos (LAFRAIA, 2001), (MOUBRAY, 1992).

A MCC começou a ser desenhada na década de 60 com a necessidade de revisar por que e como aplicar programas de manutenção na indústria aeronáutica. Grupos de trabalho denominados MSG-1, MSG-2 e MSG-3 desenvolveram novas técnicas para a estruturação de programas de manutenção preventiva a fim de preservar funções críticas de aeronaves comerciais. Em 1972, o Departamento de Defesa do Estados Unidos iniciou a utilização destas novas técnicas para aeronaves militares e em 1975 passou a denominar o conceito do MSG de "Reliability-Centered Maintenance". Em 1978, F. Stanley Nowlan e Howard F. Heap escrevem um relatório para o Departamento de Defesa americano intitulado "Reliability-Centered Maintenance". A partir do início dos anos 80, a MCC começou a ser utilizada em estudos pilotos em plantas de geração de energia nuclear.

Inúmeros benefícios são apresentados na literatura decorrentes da aplicação da MCC em programas de manutenção, por exemplo: redução das atividades de manutenção preventiva, redução dos custos dos programas de manutenção, aumento da disponibilidade dos sistemas, aumento da vida útil dos equipamentos, redução do número de itens de sobressalentes, especialização de pessoas e motivação para trabalho em equipe. Diversos autores como Endrenyi et. al. (2001), D'Addio; Firpo e Savio (1998), Reder e Flaten (2000), Adjaye (1994) e Bertling; Eriksson e Allan (2000) apresentam casos de sucesso na sua aplicação, inclusive em programas de manutenção de sistemas e equipamentos elétricos.

Apesar de reconhecidamente vantajosa quanto a sua aplicação, têm sido identificados pontos para melhorias na sistemática da MCC. D'Addio; Firpo e Savio (1998) mostram a necessidade da MCC ser apoiada através de modelos probabilísticos na definição das estratégias de manutenção. Em Hauge e Johnston (2001) e em Hauge (2002), são relacionados alguns pontos falhos da MCC quando aplicados no programa espacial americano,

especialmente no tratamento dos riscos de segurança envolvidos em atividades de manutenção. Os autores apontam a existência de um vazio entre a MCC e a análise de riscos. Também identificam a falta de uma lógica detalhada para determinação do intervalo apropriado para realizar cada tarefa de manutenção escolhida, ficando o mesmo dependente da experiência do analista. Johnston (2001, 2002a e 2002b), menciona as incertezas envolvidas durante o uso da MCC, a necessidade de comparar a eficiência relativa de cada tática de manutenção possível, a falta de desenvolvimento do conhecimento dos especialistas envolvidos na sistemática e possibilidade de erros decorrentes da adoção de premissas falsas no início de trabalho da MCC. Desta forma justificam-se estudos para a introdução de melhorias na metodologia da MCC.

Esta dissertação propõe-se ao estudo da aplicação da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade sobre um caso escolhido: turbo-gerador de uma unidade industrial de grande porte. São introduzidas melhorias na metodologia de forma a reduzir a subjetividade no julgamento do especialista na etapa de classificação dos modos de falha no Diagrama de Decisão, criando-se mecanismos que auxiliem a definição da existência de impacto na segurança industrial ou meio ambiente. A proposta é introduzir uma contribuição ao método através da implementação de listas de verificação e da Análise Preliminar de Riscos, estabelecendo um elo com o diagrama de decisão da metodologia. Os dados obtidos com a metodologia tradicional da MCC serão comparados com os resultados provenientes da MCC com as melhorias propostas.

O texto da dissertação está estruturado em mais 6 capítulos distribuídos da seguinte maneira: no Capítulo 2 são apresentados conceitos e expressões básicos da engenharia da confiabilidade; no Capítulo 3 são apresentados os conceitos e a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, dentro do contexto de evolução da manutenção; o Capítulo 4 contém uma visão geral das principais técnicas de Análise de Risco; o Capítulo 5 mostra a proposta de melhoria na metodologia da MCC no que se refere à identificação das falhas que afetam o meio ambiente, a saúde ocupacional e a segurança industrial; no Capítulo 6 são apresentados os resultados da aplicação da sistemática proposta sobre um caso escolhido, comparando-se com os resultados da MCC original; no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

1.1 - OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma contribuição para a melhoria da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), visando reduzir a subjetividade no julgamento do especialista na etapa de classificação dos modos de falha com impacto no meio ambiente, saúde ocupacional ou segurança industrial no Diagrama de Decisão.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Mostrar a afinidade entre os objetivos da MCC e da Análise de Risco e estabelecer um elo entre as duas metodologias.
- Criar uma sistemática de análise de risco dentro da metodologia da MCC;
- Identificar e classificar os modos de falhas da etapa da FMEA da MCC conforme o grau de risco envolvido;
- Identificar os componentes do equipamento que apresentam maior grau de risco em caso de falha sob o ponto de vista de MASSI (meio ambiente, saúde ocupacional e segurança industrial).

1.2 - RESULTADOS ESPERADOS

Com este trabalho espera-se tornar a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) menos dependente da experiência do analista e reduzir pontos falhos da MCC citados na literatura, no que diz respeito ao tratamento dos riscos de segurança envolvidos em atividades de manutenção. Além disto, espera-se:

- Obter informações detalhadas sobre os riscos envolvidos nas atividades de manutenção dos sub-sistemas elétricos do TG-8301, turbo-gerador da Refinaria Landulpho Alves da PETROBRAS.
- Classificar o grau de risco envolvido nos modos de falha de cada componente dos sub-sistemas Gerador, Corrente Alternada e Corrente Contínua de um turbo-gerador a gás.
- Obter uma sistemática para uso da Análise de Risco no Diagrama de decisão da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade.

2 - CONCEITOS BÁSICOS

2.1 - ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE:

2.1.1 - Conceito

A engenharia de confiabilidade é a disciplina que está relacionada com o tratamento probabilístico de falhas em sistemas (LEES, 1991, v.1, p.77). Vários fatores influenciam no risco existente no desenvolvimento de um produto ou sistema. Entre eles pode-se relacionar : competição, pressão dos prazos e cronogramas, rápida evolução dos materiais, complexidade dos métodos e sistemas, necessidade de redução de custos, considerações de segurança e legislação. A engenharia de confiabilidade vem se desenvolvendo em resposta ao desafio da necessidade de controlar estes riscos (O'CONNOR; NEWTON; BROMBLEY, 1998, p.2).

Hoje muitas indústrias, agências governamentais e outras entidades possuem especialistas, engenheiros, líderes de grupos e gerentes de confiabilidade. O campo da confiabilidade tem evoluido em muitos ramos, como por exemplo: confiabilidade de *software*, confiabilidade mecânica, confiabilidade humana, confiabilidade de sistemas de potência, engenharia de manutenção, custo do ciclo de vida, otimização da confiabilidde, etc. Áreas como engenharia de manutenção e engenharia de segurança estão diretamente relacionadas com a engenharia de confiabilidade. Conhecimento destes assuntos são essenciais para engenheiros quando envolvidos em projeto e operação de sistemas (DHILLON, 1982, p.2).

2.1.2 - Breve histórico

Segundo Lafraia (2001, p.6), com o surgimento da indústria aeronáutica após a Primeira Guerra Mundial, Henley e Kumamoto desenvolveram os primeiros estudos de análise de confiabilidade. Na década de 40, desenvolveram-se as teorias matemáticas relacionadas aos problemas de confiabilidade e o matemático Robert Lusser desenvolveu uma equação associada à confiabilidade de um sistema em série.

Dhillon (1982, p.2) descreve que os primeiros estudos de confiabilidade foram realizados durante a Segunda Guerra Mundial, quando seus conceitos foram introduzidos pelos alemães no desenvolvimento dos foguetes V-1 e V-2. Entre 1945 e 1950, foram conduzidos vários estudos nas forças armadas dos Estados Unidos sobre reparos em equipamentos, custos de manutenção, falhas de equipamentos eletrônicos e outros, resultando

na criação de um comitê de confiabilidade pelo Departamento de Defesa americano em 1950. Em 1952 este comitê foi transformado em um grupo permanente e conhecido como *Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment* (AGREE). No início dos anos 50, surgiram o IEEE *Transactions on Reliability* e o *Proceedings of the National Symposium on Reliability and Quality Control* resultados da preocupação crescente com a confiabilidade. Em 1957, o AGREE publicou um relatório que posteriormente tornou-se um guia de especificação de equipamentos eletrônicos militares. Em 1965 o Departamento de Defesa americano emitiu a norma MIL-STD-785-Reliability Programs for Systems and Equipment, a qual tornou obrigatória a integração de um programa de atividades de engenharia de confiabilidade com as atividades de engenharia tradicionais de projeto, desenvolvimento e produção.

No Brasil, nos anos 70, algumas universidades como por exemplo a Federal de Santa Catarina, já tinham nos currículos de seus cursos de pós-graduação em engenharia elétrica a disciplina "Confiabilidade aplicada a sistemas de potência" e concessionárias de geração e transmissão de energia elétrica possuiam em seus quadros de planejamento e expansão de sistema, pessoal capacitado no assunto.

Na área da indústria nuclear, a engenharia de confiabilidade ganhou impulso a partir de 1979 quando foi criado um grupo de pesquisas na COPPE/UFRJ com incentivo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), para pesquisa e desenvolvimento de técnicas de Engenharia de Confiabilidade e Análise de Riscos, com vistas a sua aplicação a questões de segurança de centrais nucleares. Em 1984 foi criado o Laboratório de Análise de Segurança na COPPE/UFRJ que constituiu-se em importante centro de formação de pesquisadores nas áreas de Engenharia de Confiabilidade e Análise de Riscos.

Na área de petróleo e petroquímica, os primeiros contatos com estudos de engenharia de confiabilidade ocorreram no início da década de 80. Em 1985, a PETROBRAS em parceria com a COPPE/UFRJ promoveu o seu primeiro curso básico de aplicação de técnicas de confiabilidade, o qual foi repetido em 1986 e 1987. Exatamente nestes anos surgiram as primeiras aplicações de técnicas de confiabilidade na indústria de processos realizadas pelo pessoal do Laboratório de Análise de Segurança da COPPE/UFRJ. Em 1987, a PETROBRAS promoveu o seu 1° Encontro Técnico de Engenharia de Confiabilidade, evento que despertou grande interesse das empresas brasileiras. A partir do final dos anos 80, diversas empresas brasileiras iniciam programas de formação de pessoal na área de engenharia de confiabilidade e multiplicaram-se os trabalhos de aplicação das técnicas desta atividade da engenharia.

Na década de 90, a utilização da Manutenção Centrada em Confiabilidade ganha impulso no Brasil como base do planejamento da atividade de manutenção, visando maior

racionalização e otimização de recursos (SEIXAS DE OLIVEIRA, 1995, p. 2-8). Em 2004, a PETROBRAS prossegue com o incentivo à área de confiabilidade, promovendo o II Seminário de Engenharia de Confiabilidade com a participação de diversos especialistas internos e de outras empresas.

2.2 - CONCEITOS E EXPRESSÕES BÁSICAS

Nesta seção aborda-se de maneira breve conceitos básicos, terminologias e expressões úteis na engenharia da confiabilidade. São informações básicas para o tratamento probabilístico de falhas em sistemas e úteis para o planejamento de manutenção sob o enfoque de confiabilidade.

2.2.1 -Variáveis aleatórias

O parâmetro *X* de um evento probabilístico que está sendo medido (por exemplo, taxa de falha de um componente, intervalo de tempo de reparo, valor de um resistor, força mecânica de um componente) varia aleatoriamente no tempo e/ou espaço. Então, este parâmetro *X* é definido como uma variável aleatória ou randômica. Uma variável aleatória pode ser definida como uma variável contínua ou discreta.

Uma variável aleatória discreta é aquela que pode assumir somente um número discreto de estados ou determinado número de valores. Uma variável aleatória continua é aquela que pode assumir um número infinito de valores dentro de um certo intervalo possível. (BILLINTON; ALLAN, 1992, p.42)

2.2.2 - Função densidade de probabilidade

Se *X* é uma variável aleatória contínua, a função densidade de probabilidade, *fdp,* de *X*, é uma função $f(x)$, tal que para dois números reais a e b, com $a \leq b$, tem-se:

$$P(a < x \leq b) = \int_a^b f(x).dx \tag{2.1}$$

2.2.3 - Função distribuição acumulada

A função distribuição acumulada, *fda*, é uma função $F(x)$ de uma variável aleatória X, definida para um número real x por:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^{x} f(x).dx \qquad \textbf{(2.2)}$$

Ou seja, para um dado valor de x, $F(x)$ é a probabilidade de que o valor observado de X seja no máximo x.

A figura 2.1 contém a representação gráfica da função densidade de probabilidade $f(x)$ e da função distribuição acumulada F(x) de uma variável aleatória contínua.

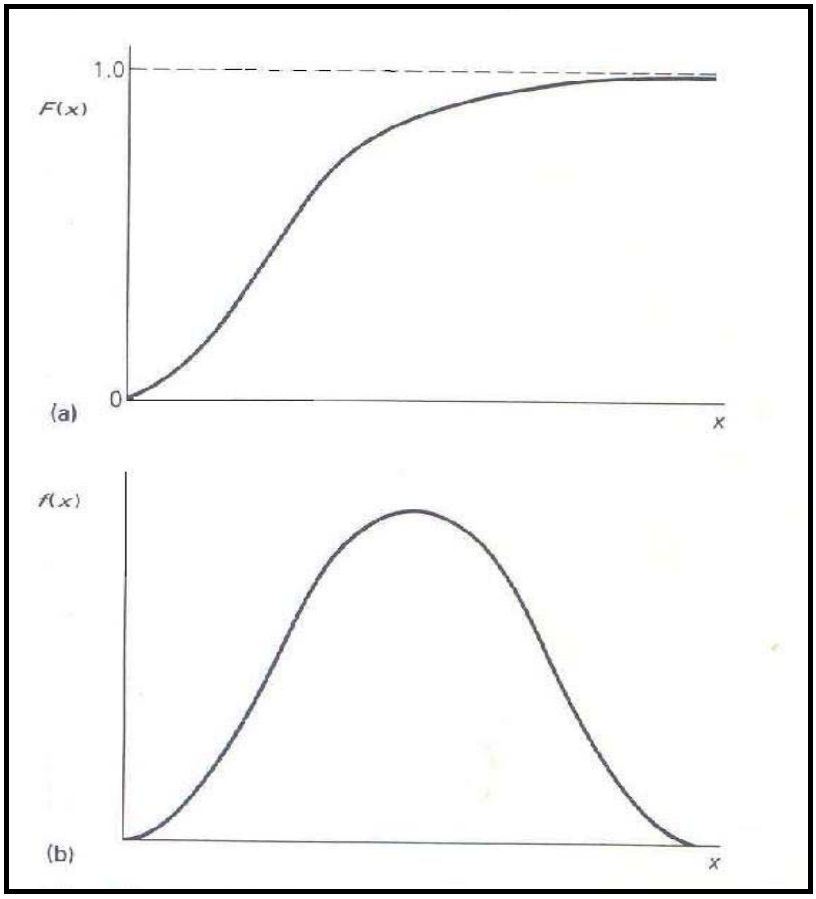


Fig. 2.1: Variável aleatória continua.
(a) Função *F*(*x*) (b) Função *f*(*x*)
Fonte: Billinton; Allan (1992, p.46)

2.2.4 - Confiabilidade ou função confiabilidade

Confiabilidade ou função confiabilidade $R(t)$ é a probabilidade de um componente ou sistema desempenhar sua função adequadamente por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas. (LEES, 1991, v.1, p.80); (SMITH, 1993, p.28)

Se n equipamentos operam sem substituição, então depois de um tempo t, o número de equipamentos sobreviventes e em falha são $n_s(t)$ e $n_f(t)$ respectivamente. A probabilidade de sobrevivência ou confiabilidade, $R(t)$ é:

$$R(t) = 1 - \frac{n_f(t)}{n} \tag{2.3}$$

Seja $Q(t)$ a não confiabilidade ou probabilidade de falha no tempo t, logo:

$$Q(t) = \frac{n_f(t)}{n_f(t) + n_s(t)} \tag{2.4}$$

$$Q(t) + R(t) = 1 \tag{2.5}$$

pois são eventos mutuamentes exclusivos e complementares como mostrado na figura 2.2.

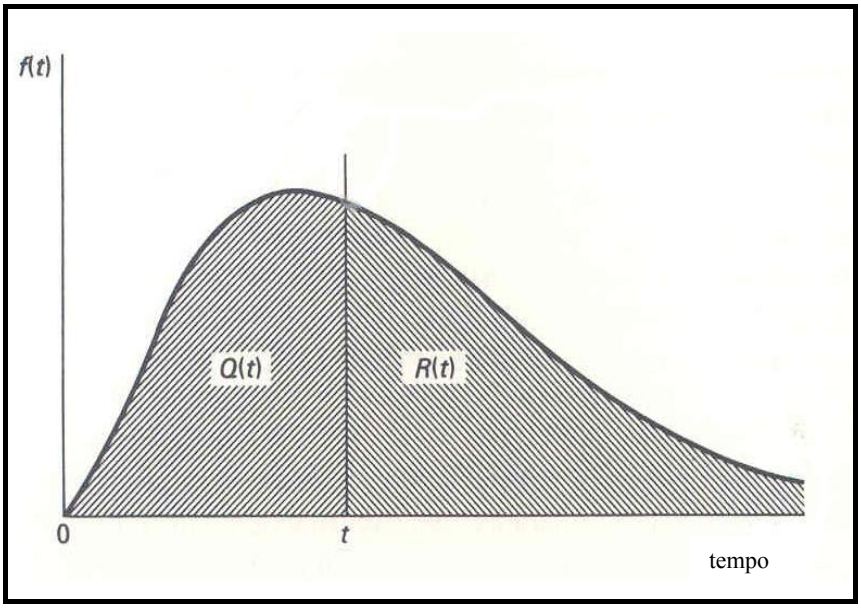


Fig. 2.2 - Função densidade de falha hipotética e as funções *Q*(*t*) e *R*(*t*).
Fonte: Billinton; Allan (1992, p.61)

2.2.5 - Taxa de falha ou taxa de falha instantânea

Falha é a impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua função no nível especificado ou requerido.

Taxa de falha ou taxa de falha instantânea $z(t)$ é a relação entre a quantidade de componentes em falha e o número de componentes sobreviventes no instante t. É a freqüência de falha por item no intervalo de tempo Δt em relação à população sobrevivente no início do intervalo, Δt.

$$z(t) = \left[\frac{1}{n - n_f}\right].\frac{dn_f(t)}{dt} = \left[\frac{1}{R(t)}\right].\frac{dR(t)}{dt} \qquad \textbf{(2.6)}$$

A função de falha acumulada $H(t)$ é:

$$H(t) = \int_0^t z(t).dt \qquad \textbf{(2.7)}$$

Pode-se observar que,

$$R(t) = e^{(-\int_0^t z(t).dt)} = e^{-H(t)} \qquad \textbf{(2.8)}$$

A função densidade de falha (densidade de falha ou funçao densidade) $f(t)$ expressa como uma função do número original de equipamentos é:

$$f(t) = \frac{1}{n}.\frac{dn_f(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \qquad \textbf{(2.9)}$$

O complemento da confiabilidade, ou a não confiabilidade $Q(t) = 1 - R(t)$ é também chamada de função distribuição de falha (função distribuição ou função distribuição acumulada) e é então comumente escrita como $F(t)$.

2.2.6 - Relações básicas entre as funções distribuição

As seguintes relações podem ser derivadas das equações 2.6 à 2.9 acima e são bastante utilizadas:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{2.10}$$

$$z(t) = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \tag{2.11}$$

$$R(t) = \int_{t}^{\infty} f(t).dt \tag{2.12}$$

$$Q(t) = F(t) = \int_{0}^{t} f(t).dt \tag{2.13}$$

2.2.7- Parâmetros importantes

Tempo de vida médio - *Mean Time to Failure (*MTTF*)* é definida como o primeiro momento da função densidade de falha. Fornece a medida do tempo médio até a falha para componentes não reparáveis.

$$m = \int_{0}^{\infty} t.f(t).dt \tag{2.14}$$

Tempo médio entre falhas - *Mean Time Between Failures* (MTBF) é uma medida do intervalo de tempo médio em que um sistema ou item tem um desempenho como especificado antes que uma falha ocorra. É aplicável a componentes reparáveis.

$$\text{MTBF} = \int_{0}^{\infty} t.f(t).dt \tag{2.15}$$

onde $f(t)$ representa a função densidade de falha.

Tempo médio para reparo - *Mean Time to Repair* (MTTR) é uma medida do intervalo de tempo médio para trazer o sistema ou item para a condição de operação após a ocorrência da falha. É dado pela seguinte expressão (DHILLON, 1982 p.260):

$$\text{MTTR} = \frac{\left\{ \sum_{j=1}^{k} t_j . \lambda_j \right\}}{\sum_{j=1}^{k} \lambda_j} \qquad \textbf{(2.16)}$$

onde λ_j representa a taxa de falha constante do *j*-ésimo componente reparável do sistema.

t_j representa o tempo requerido para reparo do sistema ou equipamento em caso de falha do *j*-ésimo componente.

k representa o número de componentes reparáveis.

Tempo de manutenção (*Down time or mean forced outage time)* $d(t)$ é o tempo total durante o qual o item, componente ou sistema está em um modo operacional não satisfatório. Representa o somatório do MTTR com os demais tempos envolvidos na manutenção do equipamento: localização do defeito, diagnóstico, acesso, espera de sobressalentes, ajustes e testes, etc.

Tempo de disponibilidade (*Up Time*) $u(t)$ é o intervalo de tempo que o sistema ou equipamento está operando ou em um estado de alerta ou retorno à operação.

Disponibilidade (D) é a probabilidade de encontrar o componente, item ou sistema em estado operacional em um intervalo de tempo. A disponibilidade também pode representar a relação entre o tempo que o sistema ou item ficou disponível para produzir e o tempo total.

$$D = \frac{u(t)}{u(t) + d(t)} \qquad \textbf{(2.17)}$$

$$D = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \qquad \textbf{(2.18)}$$

Redundância ativa é o termo usado quando todas as unidades redundantes estão funcionando simultaneamente.

Redundância passiva (*stand-by*) é o termo usado quando existem unidades adicionais que são ativadas somente quando há falha de unidades em operação.

Manutenibilidade é a probabilidade de um item ou sistema em falha ser restaurado para o seu estado operacional satisfatório em um certo intervalo de tempo.

$$M(t) = \int_0^t g(t).dt = 1 - e^{\left[-\int_0^t \mu(t).dt\right]} \tag{2.19}$$

onde :

$M(t)$ é a função manutenibilidade (probabilidade de execução do reparo no tempo t).

$g(t)$ é função densidade de probabilidade de tempo de reparo.

$\mu(t)$ é taxa de reparos ou números de reparos efetuados em relação ao total de horas de reparo do equipamento.

t é o tempo previsto de reparo.

Uma relação fundamental é:

$$g(t) = \mu(t).e^{\left[-\int_0^t \mu(t).dt\right]} \tag{2.20}$$

Para uma função densidade de distribuição exponencial:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{2.21}$$

onde μ = 1/ MTTR , é a taxa de reparo constante.

2.3 - DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

A função densidade de falhas $f(t)$ representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo. A função acumulada de falhas ou função distribuição de probabilidade $F(t)$ representa a probabilidade de falha em um período de tempo entre t_1 e t_2. A relação entre $f(t)$ e $F(t)$ é dada pelas equações 2.22 e 2.23;

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{2.22}$$

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t).dt \tag{2.23}$$

A probabilidade de que um item sobreviva a um dado intervalo de tempo representa a confiabilidade. A função confiabilidade $R(t)$ é dada por:

$$R(t) = \int_{t}^{\infty} f(t).dt = 1 - \int_{-\infty}^{t} f(t).dt = 1 - F(t) \qquad \textbf{(2.24)}$$

A taxa condicional de falha $\lambda(t)$ é a probabilidade condicional de falha no intervalo t a $t + dt$, considerando que não houve falha em t. Esta função também é conhecida como função de risco ou taxa de falha, representada pela equação 2.25;

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \qquad \textbf{(2.25)}$$

A figura 2.3 mostra a relação gráfica entre os parâmetros $R(t)$, $\lambda(t)$ e $f(t)$:

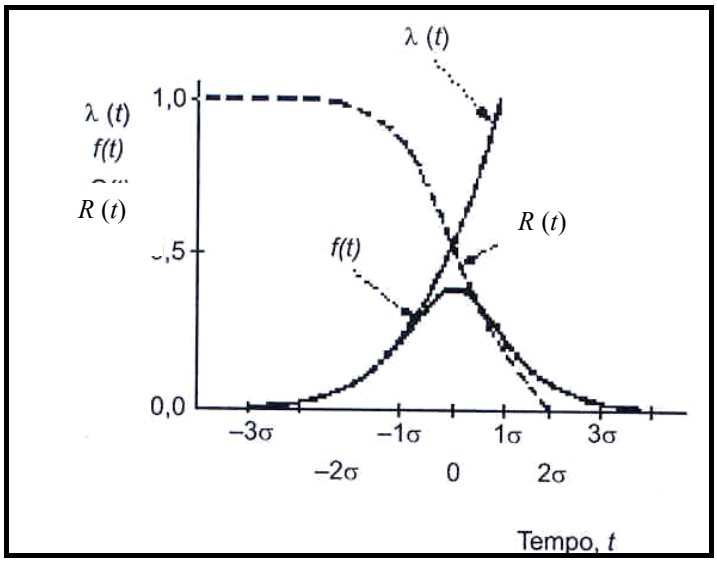


Fig. 2.3 - Relação gráfica entre os parâmetros de confiabilidade
Fonte: Lafraia (2001, p. 20)

As funções densidade de probabilidade e distribuição de probabilidade mais usadas, segundo Dhillon (1982, p.10), na engenharia de confiabilidade são descritas a seguir:

2.3.1 - Distribuição exponencial

A função densidade de probabilidade é definida como:

$$f(t) = \lambda.e^{-\lambda t} \qquad \lambda > 0,\ t \geq 0 \qquad \textbf{(2.26)}$$

A função distribuição de probabilidade pode ser obtida aplicando-se a equação 2.26 na equação 2.25:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(2.27)}$$

onde t é o tempo e λ é a taxa de falha constante.

2.3.2 - Distribuição da taxa de falha da curva da banheira

Esta distribuição pode representar taxas de falhas crescentes, decrescentes e da curva da banheira como mostrado na figura 2.4.

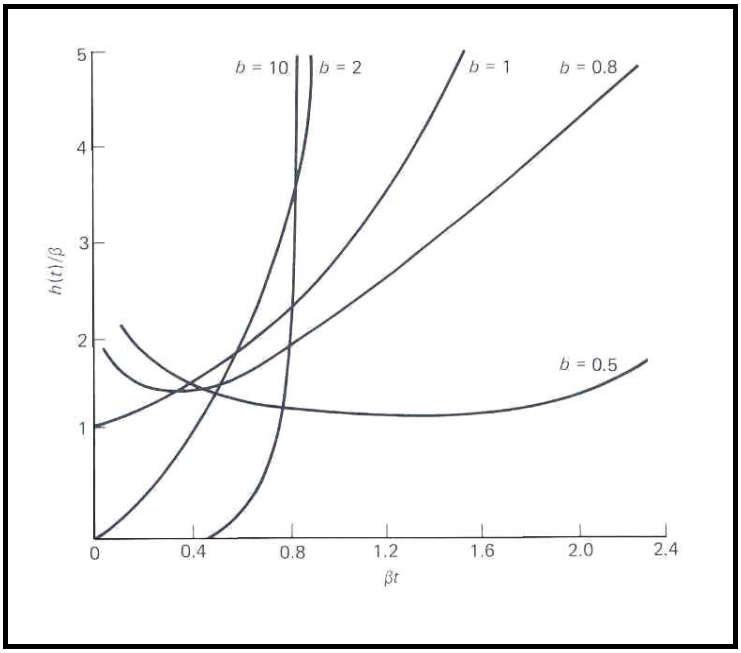


Fig. 2.4 - Curvas de taxa de falha (banheira)
Fonte: Dhillon (1982, p.24**)**

A função densidade de probabilidade desta distribuição é definida como:

$$f(t) = b.\beta.(\beta.t)^{b-1}.e^{-\left[e^{(\beta t)^{b}} - (\beta t)^{b-1} - 1\right]} \qquad \text{para } \beta,\ b > 0 \text{ e } t \geq 0 \qquad \textbf{(2.28)}$$

onde β é o parâmetro de escala, b é o parâmetro de forma e t é o tempo.

$$F(t) = 1 - e^{-\left[e^{(\beta t)^{b}} - 1\right]} \qquad \textbf{(2.29)}$$

Casos especiais desta distribuição são a distribuição do valor extremo (para $b = 1$) e a curva da banheira (para $b = 0,5$).

2.3.2.1- Conceito da curva da banheira

A curva obtida para b = 0.5, mostrada na figura 2.4 no item 2.3.2 é a curva de taxa de falha, conhecida como curva da banheira pelo seu formato característico. Dhillon (1982, p.24) menciona que esta curva é usada para representar padrões de taxa de falha de componentes.

Diferentes tipos de componentes podem exibir variações significativas na forma da curva. A figura 2.5 mostra uma curva típica de componentes eletrônicos, onde pode-se observar uma extensa vida útil (região II) em comparação com aquela mostrada na figura 2.6, típica para componentes mecânicos. A região I em que a taxa de falha é decrescente com o tempo, é conhecida como região de mortalidade infantil, fase de *de-bugging*, *burn-in period* ou *brek-in period*, devido aos erros de fabricação ou de projeto. A região II caracterizada com uma taxa de falha constante, é conhecida como fase de operação normal ou período de vida útil. Nesta fase as falhas ocorrem de modo aleatório e a distribuição exponencial é válida. A região III é caracterizada por um rápido crescimento da taxa de falha com o tempo, representando o final da vida útil ou fase de fadiga do material, conhecida como *wear-out region*. A figura 2.7 mostra a curva típica para programas de computador, onde a taxa de falhas é decrescente em qualquer região do gráfico.

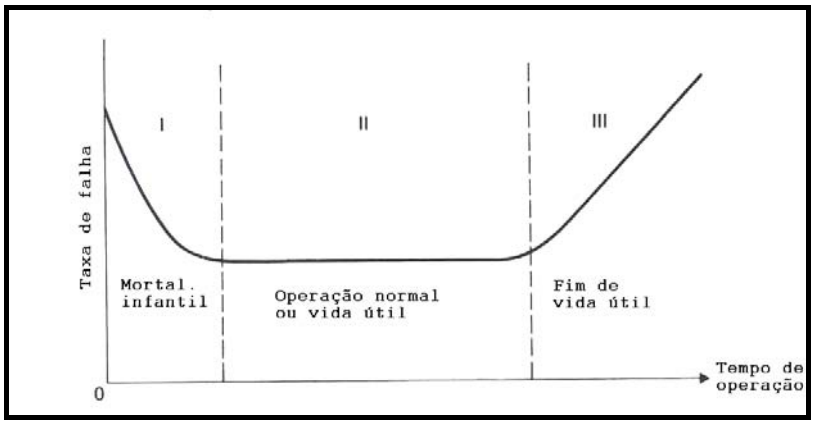


Fig. 2.5 - Curva típica de taxa de falha para componentes eletrônicos em função da idade.
Fonte: Billinton; Allan (1992, p.166)

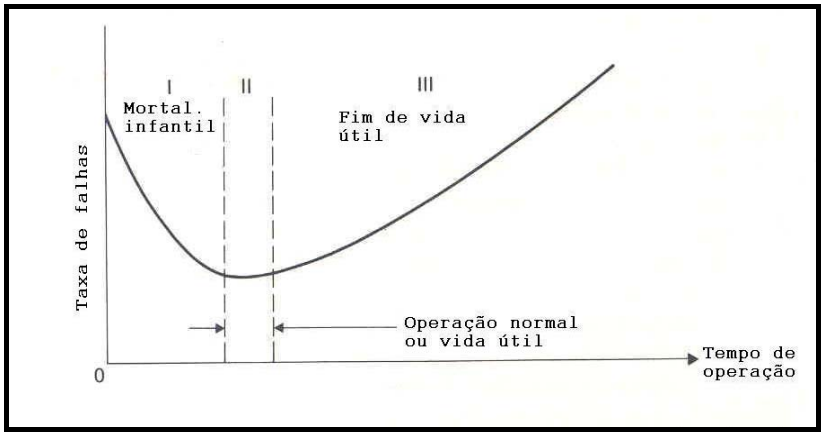


Fig. 2.6 - Curva típica de taxa de falha para componentes mecânicos em função da idade.
Fonte: Billinton; Allan (1992, p.166)

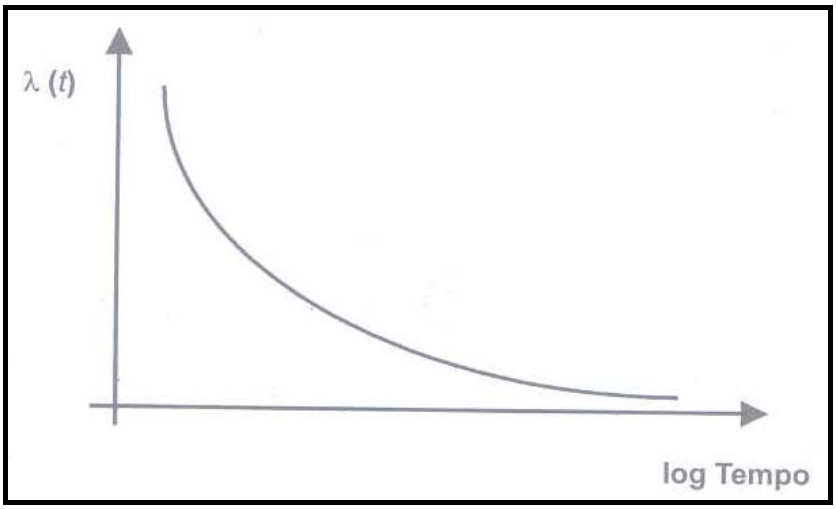


Fig. 2.7 - Curva típica de taxa de falha para programas de computador em função da idade.
Fonte: Lafraia (2001, p. 18)

Segundo Dhillon (1982, p.24) a curva de taxa de falha no formato típico da banheira, pode ser obtida a partir da equação abaixo:

$$\lambda(t) = b.\beta.(\beta t)^{b-1}.e^{(\beta t)^b} \qquad \text{para } \beta,\ b > 0 \text{ e } t \geq 0 \qquad \textbf{(2.30)}$$

onde β é o parâmetro de escala, b é o parâmetro de forma e t é o tempo.

2.3.3 - Distribuição de valores extremos

É usada no estudo de falhas em componentes mecânicos. A função densidade de probabilidade desta distribuição é definida como:

$$f(t) = \beta.e^{-\left[e^{(\beta t)}-1\right]} \qquad \text{para } \beta > 0 \text{ e } t > 0 \qquad \textbf{(2.31)}$$

onde β é o parâmetro de escala e t é o tempo.

2.3.4 - Distribuição uniforme

A função densidade de probabilidade é definida como:

$$f(t) = \frac{1}{(\beta - \alpha)} \qquad \alpha < t < \beta \qquad \textbf{(2.32)}$$

onde α, β são constantes e t é o tempo.

2.3.5 - Distribuição normal ou de Gauss

A função densidade de probabilidade é definida como:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})}.e^{-\left[\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \qquad \sigma > 0, \quad -\infty < t < \infty \qquad \textbf{(2.33)}$$

onde σ é o desvio padrão, μ é a média e t é o tempo.

2.3.6 - Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é baseada em três parâmetros. É uma das distribuições mais flexíveis, e é usada para representar vários tipos de fenômenos físicos (DHILLON, 1982, p. 12). A função densidade de distribuição é definida por:

$$f(t) = \frac{b}{\beta}.(t-\alpha)^{b-1}.e^{-\left[\frac{(t-\alpha)^b}{\beta}\right]} \qquad \text{para } t > \alpha \text{ e } b, \beta, \alpha > 0 \qquad \textbf{(2.34)}$$

onde α, β, b são os parâmetros de localização, escala e forma, respectivamente. t é o tempo.

Pode-se observar que as distribuições de Rayleigh e exponencial são casos especiais da distribuição de Weibull para $b = 2$, $\alpha = 0$ e $b = 1$, $\alpha = 0$ respectivamente.

2.3.7 - Distribuição lognormal

Esta é uma distribuição adequada para representar tempos de reparo de sistemas em falha (DHILLON, 1982, p. 13). A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{(t-\alpha)\sigma\sqrt{2\pi}}.e^{-\left[\frac{(\log(t-\alpha)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \qquad \text{para } \sigma > 0,\ t > \alpha > 0 \qquad \textbf{(2.35)}$$

onde α é uma constante, σ é o desvio padrão do tempo (log) para falha, μ é a média do tempo (log) para a falha e t é o tempo.

2.3.8 - Distribuição beta

Esta é outra distribuição de dois parâmetros que também tem aplicações em engenharia de confiabilidade. A função densidade de probabilidade, $f(t)$, é definida como:

$$f(t) = \frac{(\alpha+\beta+1)!}{\alpha!\,\beta!}.t^{\alpha}\cdot(1-t)^{\beta} \qquad \text{para } \beta > -1,\ \alpha > -1,\ 0 < t < 1 \qquad \textbf{(2.36)}$$

onde α e β são os parâmetros de distribuição e t é o tempo.

2.3.9 - Distribuição de taxa de falha - modelo I

Esta é uma distribuição de dois parâmetros que tem taxas de falha crescente e decrescente, como representado na figura 2.8. A taxa de falha, $h(t)$ é definida como:

$$h(t) = \frac{\lambda(b+1)[\ell n(\lambda t+\alpha)]^{b}}{(\lambda t+\alpha)} \qquad \text{para } b \geq 0,\ \lambda > 0,\ \alpha \geq 1,\ t \geq 0 \qquad \textbf{(2.37)}$$

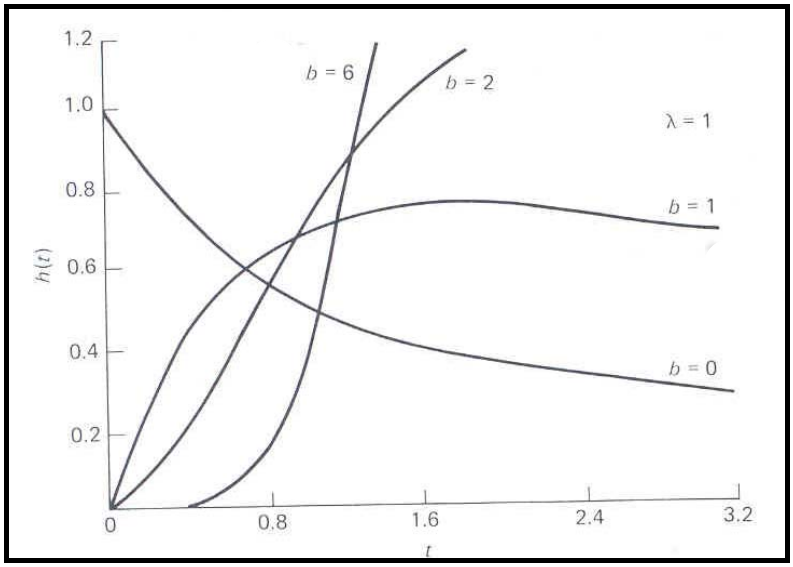


Fig. 2.8 - Função taxa de falha (modelo I). λ=1
Fonte: Dhillon (1982, p. 14)

onde b é o parâmetro de forma, λ é o parâmetro de escala, α é o terceiro parâmetro e t é o tempo. Para $\alpha = 1$, a função distribuição de confiabilidade é;

$$R(t) = e^{-[\ell n(\lambda t+1)]^{b+1}} \qquad \textbf{(2.38)}$$

2.3.10 - Distribuição de taxa de falha - modelo II

É uma distribuição de dois parâmetros com taxas de falha crescente e decrescente, como mostrado na figura 2.9. A taxa de falha, $h(t)$, e a função distribuição de confiabilidade $R(t)$, são definidas como:

$$h(t) = \frac{n.\lambda.t^{n-1}}{\lambda.t^{n}+1} \qquad \text{para} \quad n \geq 1, \quad \lambda > 0, \quad t \geq 0 \qquad \textbf{(2.39)}$$

onde n é o parâmetro de forma, λ é o parâmetro de escala e t é o tempo.

$$R(t) = e^{-[\ell n(\lambda t^{n}+1)]} \qquad \textbf{(2.40)}$$

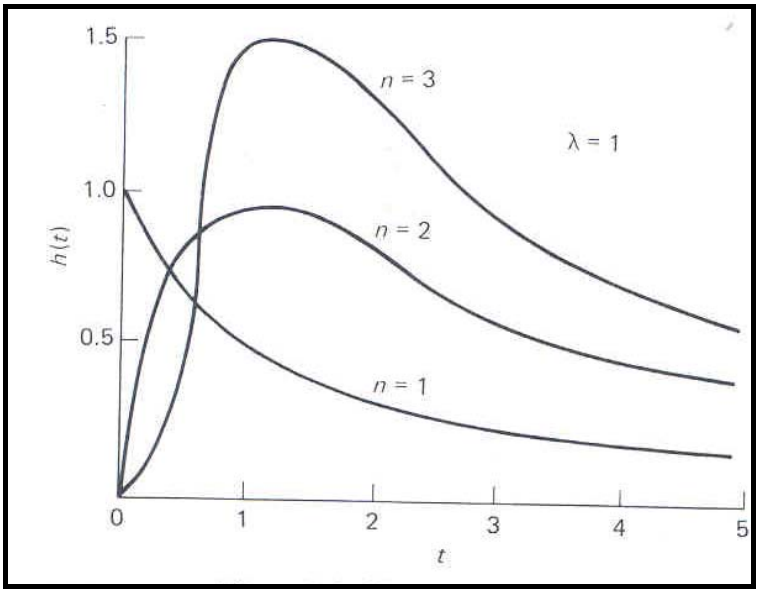


Fig. 2.9 - Curvas de taxa de falha - Modelo II para λ = 1 e diferentes valores de *n*
Fonte: Dhillon (1982, p.15)

2.3.11 - Distribuição associada de Weibull

Esta distribuição foi aplicada por Kao (DHILLON, 1982, p. 15), para avaliar a confiabilidade de tubos de *elétrons*. A densidade de probabilidade, $f(t)$, e a função de distribuição acumulada, $F(t)$, são escritas como:

$$f(t) = \frac{c\gamma_1}{\mu_1} \cdot \left(t/\mu_1 \right)^{\gamma_1 - 1} \cdot e^{\left(t/\mu_1 \right)^{\gamma_1}} + \frac{(1-c)}{\mu_2} \cdot \gamma_2 \cdot \left[(t-\theta)/\mu_2 \right]^{\gamma_2 - 1} \cdot e^{\left\{ -\left[(t-\theta)/\mu_2 \right]^{\gamma_2 - 1} \right\}} \tag{2.41}$$

para $\mu_1, \mu_2 > 0$, $0 < \gamma_1 < 1$, $\gamma_2 > 1$, $\theta > 0$, $0 \leq c \leq 1$, onde $\mu_1, \mu_2, \gamma_1, \gamma_2, \theta$ e c são parâmetros da distribuição e t é o tempo.

$$F(t) = c.\left\{ 1 - e^{\left[-(t/\mu_1)^{\gamma_1} \right]} \right\} - (1-c).\left\{ 1 - e^{\left[-(t-\theta)/\mu_2 \right]^{\gamma_2}} \right\} \tag{2.42}$$

2.3.12 - Distribuição de vida-fadiga

Esta distribuição foi criada por Birnbaum e Saunders (DHILLON, 1982, p. 16) e é usada para caracterizar falhas causadas por fadiga. A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{\left(t^2 - \mu^2\right)}{2\sqrt{2\pi}\,\beta^2 \mu t^2 \left(t/\mu\right)^{1/2} - \left(\mu/t\right)^{1/2}} \cdot e^{\left[-\left(1/2\beta^2\right).(t/\mu + \mu/t - 2)\right]} \tag{2.43}$$

para $\beta, \mu > 0$, $t > 0$, onde β é o parâmetro de forma, μ é o parâmetro de escala e t é o tempo.

2.3.13 - Distribuição de Rayleigh

É uma função estatística com aplicação nas áreas de confiabilidade e teoria de som. É um caso especial da distribuição de Weibull quando $\alpha = 0$ e $b = 2$. A função densidade de probabilidade de Rayleigh é definida por:

$$f(t) = \frac{2}{\beta} \cdot t \cdot e^{-\left(t^2/\beta\right)} \qquad \text{para } t \geq 0 \text{ e } \beta > 0 \tag{2.44}$$

onde β é o parâmetro de escala e t é o tempo.

2.3.14 - Distribuição Gama

A distribuição gama é usada em problemas de teste de vida. A função densidade de probabilidade é definida por:

$$f(t) = \frac{\lambda.(\lambda t)^{\beta - 1}}{\Gamma(\beta)}.e^{-(\lambda t)} \qquad \text{para } \lambda, \beta > 0,\ t \geq 0 \tag{2.45}$$

onde β é o parâmetro de forma, λ é o parâmetro de escala e t é o tempo. Para $\beta = 1$, a distribuição gama transforma-se na distribuição exponencial.

2.3.15 - Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é aplicada para variáveis aleatórias discretas. Aplica-se quando há interesse na probabilidade de ocorrência de um mesmo tipo de evento. A função densidade de probabilidade, $f(k)$, é definida como:

$$f(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot e^{-(\lambda t)} \qquad \text{para} \quad k = 0, 1, 2, 3,.... \qquad \textbf{(2.46)}$$

onde λ é uma taxa constante, k é o número de eventos de um mesmo tipo e t é o tempo.

2.3.16 - Distribuição binomial

A distribuição binomial também é comumente usada para variáveis aleatórias discretas. Sua aplicação na engenharia de confiabilidade ocorre em situações que lidam com eventos que possuem dois resultados possíveis: sucesso ou falha. A função densidade de probabilidade, $f(x)$, é definida como:

$$f(x) = \frac{k!}{x!(k-x)!} \cdot p^x \cdot q^{x-k} \qquad \text{para } x = 0, 1, 2, 3,.... k \qquad \textbf{(2.47)}$$

onde k é o número total de tentativas ou provas, x é o número de falhas, p é a probabilidade de sucesso em uma única tentativa e q é a probabilidade de falha em uma única tentativa.

2.4 - OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Um importante aspecto de um plano de manutenção é a periodicidade de execução da manutenção preventiva de um sistema ou componente. Apresenta-se a seguir uma abordagem matemática, segundo Dhillon (1983, p.126) para busca do ponto ótimo de manutenção preventiva.

Considerando que a manutenção preventiva deva ser realizada depois do equipamento operar por t_o horas sem uma falha, as seguintes premissas são assumidas:

- Quando o valor de t_o é muito alto, a manutenção preventiva não é programada.

- Uma manutenção é realizada imediatamente, se o equipamento funciona mal ou falha antes de t_o horas de operação. Após o reparo, a manutenção preventiva é reprogramada.
- Após sofrer algum tipo de manutenção ou substituição, o equipamento assume o mesmo estado de um novo.
- Falhas são estatisticamente independentes.
- A taxa de falhas do sistema ou componente sob estudo é estritamente crescente.

A expressão da taxa de falhas de sistema ou componente é dada pela equação 2.48:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \qquad \textbf{(2.48)}$$

onde t representa o tempo, $f(t)$ é função densidade de probabilidade de falha do sistema ou componente, $R(t)$ representa a confiabilidade do sistema ou componente e $F(t)$ é a função distribuição acumulada.

O período ótimo t_o de manutenção preventiva é obtido quando a seguinte expressão é satisfeita:

$$z(t_0).y - F(t_0) = t_s / (t_e - t_s) \qquad \text{, se } t_e > t_s \qquad \textbf{(2.49)}$$

onde t_e representa o tempo esperado para realizar manutenção de emergência,

t_s representa o tempo esperado para realizar manutenção programada

$$y = \int_0^{t_0} R(t).dt$$

Quando t_e é igual a t_s **,** t_o é muito alto ou infinito. Isto indica que a manutenção programada nunca será realizada.

Uma outra abordagem é apresentada por Monchy(1987, p.412) em função da análise do custo do ciclo de vida de um equipamento (*Life cycle cost - LCC*) como mostrado na figura 2.10. É uma abordagem mais global e útil para a gestão do orçamento de manutenção de uma empresa.

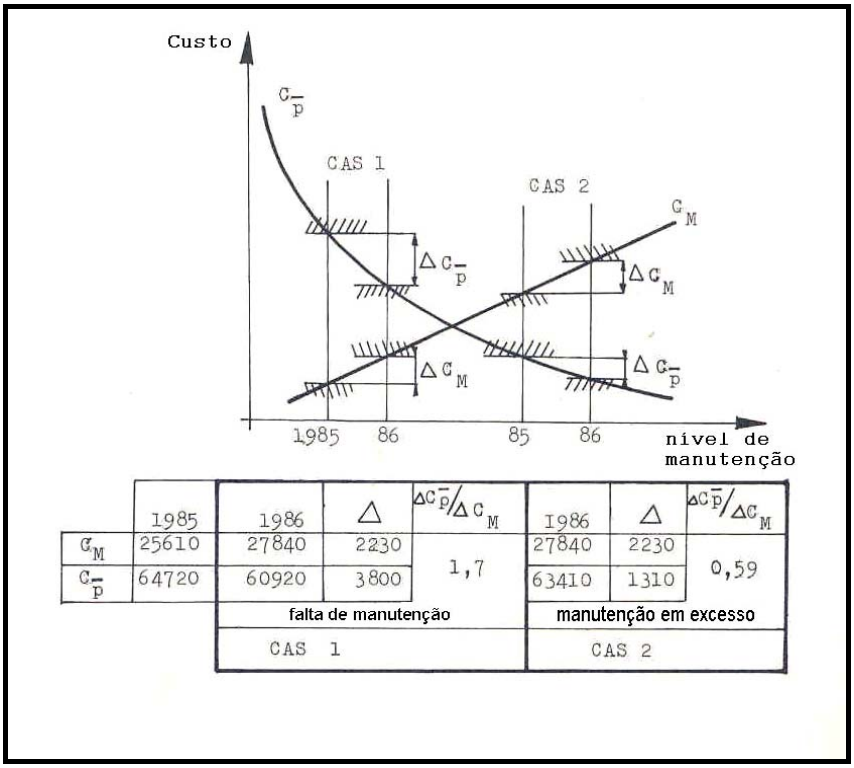


Fig. 2.10 - Exemplo de curvas de custo anual de manutenção x nível de manutenção
Fonte: Monchy (1987, p.412)

Na figura 2.10, C_p é a curva do custo anual de produção, C_M é a curva do custo anual de manutenção preventiva, ΔC_p e ΔC_M são amostras dos custos anuais. Se $\Delta C_p \simeq \Delta C_M$, o nível de manutenção está dentro de uma zona de otimização. Se $\Delta C_p < \Delta C_M$, o nível de manutenção preventiva está em excesso. Se $\Delta C_p > \Delta C_M$, o nível de manutenção preventiva está baixo.

3 - MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

3.1 - HISTÓRICO E CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da segunda guerra mundial, por volta dos anos 50, houve uma grande mudança nas indústrias com o aumento da mecanização. As máquinas cada vez mais numerosas e complexas, passaram a exigir maiores cuidados para mantê-las em funcionamento. Começa a aflorar a idéia de prevenção das falhas de equipamentos em detrimento da espera da ocorrência da falha para repará-los, culminando nos anos 60 com a prática de executar revisões gerais nos equipamentos em intervalos fixos.

Como resultado da mecanização da indústria, os custos de manutenção passaram a ter valor significativo em relação aos demais custos operacionais. Este crescimento dos custos levou a necessidade de maior controle e planejamento na manutenção de equipamentos. Maior disponibilidade, maior vida útil e menores custos de equipamentos passaram a ser valorizados com o aumento do custo do capital empregado nos ativos. Os computadores passam a ser usados no controle e planejamento da manutenção.

A partir da metade da década de 70, inicia-se um novo processo de mudança na indústria que Moubray (1992, p.3) sintetiza em três aspectos diferentes: (1) novas expectativas, (2) novas pesquisas e (3) novas técnicas.

A manutenção centrada em confiabilidade surge com evolução da 3a. geração da manutenção (Moubray,1992, p.5) com a proposta de uma ferramenta que possibilite aos usuários a resposta para os seguintes desafios: seleção das técnicas mais apropriadas, tratar cada tipo de processo de falha, atender as expectativas de donos, usuários dos ativos e a sociedade em geral, buscar o melhor custo-benefício e modelo, obter cooperação e participação ativa de todo pessoal envolvido. Conforme citado por Smith (1993, p.48), Nunes (2001, p.17), Hauge e Johnston (2001, p. 36) e Adjaye (1994, p.165), Nowlan e Heap (1978) desenvolveram a partir dos anos 60 um estudo detalhado para o Departamento de Defesa dos Estados Unidos, para a determinação de normas e otimização de procedimentos de manutenção na indústria aeronáutica, com base em ampla análise estatística. O documento final conhecido como MSG-3 foi a base do que Nowlan e Heap (1978) denominaram de *Reliability Centered Maintenance (RCM)*, traduzido como Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).

O quadro mostrado na figura 3.1 mostra a evolução da manutenção a partir dos anos 30.

ANOS	GERAÇÃO	EXPECTATIVAS	VISÃO DE FALHA	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO
1940 1950	1a.	Reparar quando quebrar	-Taxa de falha constante aumentando no fim da vida útil (quanto mais velho, mais provável de falhar)	Corretiva
1950 1970	2a.	-Maior disponibilidade -Maior tempo de vida -Custos mais baixos	-Mortalidade infantil (*burn in)* -Curva da banheira	-Revisão geral programada -Sistema para planejameno de controle dos trabalhos. -Computadores grandes e lentos
1980 2000	3a.	-Maior disponibilidade e confiabilidade -Maior segurança -Melhor qualidade de produto -Preocupação com o meio ambiente -Maior tempo de vida do equipamento -Maior efetividade de custo	-Seis padrões de falha -Relação entre idade e falha quase sempre falsa.	-Monitoramento de condição -Projetos para confiabilidade e mantenabilidade Análise de Risco -Computadores rápidos e pequenos. -Análise de modos de falhas e efeitos -Sistemas especialistas. -Equipes multidisciplinares

Figura 3.1 - Quadro da evolução da manutenção.
Fonte: Moubray (1992, p. 3-5) e Pinto; Xavier (2001, p.8)

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é " um processo usado para determinar as necessidades de manutenção de qualquer ativo físico no seu contexto operacional" diz Moubray (1992, p.7), o que Hauge e Johnston (2001, p.36) detalham como um " processo lógico estruturado para determinar a tática ótima para a manutenção de uma certa parte de equipamento". Johnston (2002, p.367) simplifica um pouco mais ao descrever a MCC como "um processo de análise e decisão que busca otimizar tarefas de manutenção". Todas as definições acima contém características complementares que podem ser resumidas

em: (1) enfoque sistemático, (2) planejamento de manutenção, (3) confiabilidade e (4) contexto operacional.

Entre os objetivos da MCC, segundo Moss (1985) citado por Holmberg e Folkeson (1991, p.254), está a redução da quantidade de manutenção não planejada para casos onde isto influencia a disponibilidade. Hauge e Johnston (2001, p.36) acrescentam que a MCC visa a otimização da manutenção para alcançar o nível desejado de confiabilidade do equipamento a custo mínimo. Johnston (2001, p.235) completa relatando que os grupos de análises usam a MCC para determinar as tarefas de manutenção mais efetivas para alcançar a confiabilidade inerente de um sistema ou parte de um equipamento. Lafraia (2001, p.238) aponta a MCC como uma ferramenta útil para assegurar que um sistema ou item continue a preencher as suas funções requeridas.

3.2 - MANUTENÇÃO: CONCEITOS E TIPOS

Dhillon (1982, p.239) apresenta a definição de Manutenção como o conjunto de ações essenciais para conservar um ativo ou restaurá-lo para uma condição operacional satisfatória. Porém, para alcançar uma condição operacional satisfatória, é necessário primeiro conhecê-la. Ou seja, que condição é esperada para o ativo ? Responder esta questão, significa definir quais as funções que devem ser preenchidas pelo mesmo. Neste sentido, Moubray (1992, p.6) coloca a manutenção como a forma de assegurar que os ativos físicos continuem a preencher suas funções pretendidas. Nunes (2001, p.7) também aborda esta questão ao comparar as definições de manutenção obtidas em diferentes versões da NBR-5462, norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. A versão de 1975 (TB-116), cuja definição de manutenção era muito similar àquela apresentada por Dhillon (1982, p.239), e a versão revisada de 1994, na qual o termo " permanecer de acordo com uma condição especificada" é substituido por " desempenhar uma função requerida". Esta importância de levar em consideração a função a ser desempenhada pelo equipamento, fica clara no conceito de Mirshawka e Olmedo (1993) citados por Hamaoka e Lopes da Silva (2000, p.2): "Manutenção é o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas ou equipamentos, para mantê-los nas mesmas condições de desempenho de fábrica e de projeto, visando garantir a consecução de sua função dentro dos parâmetros de disponibilidade, de qualidade, de prazos, de custos e de vida útil adequados". Pinto e Xavier (2001, p.22) também concordam com este cenário, quando apresentam o que eles chamam de Missão da Manutenção: "Garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a

atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados".

Na literatura encontra-se uma diversidade de terminologias usadas para os diferentes tipos de manutenção de equipamentos. O primeiro e mais antigo modo de intervir em um equipamento é a manutenção corretiva. A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência da falha ou defeito, envolvendo na intervenção reparos, substituição de peças ou substituição do próprio equipamento. Dhillon (1982, p.240) define-a como o conjunto de ações que devem ocorrer a fim de reparar um equipamento que tenha falhado, para uma condição operacional satisfatória. Nunes (2001, p.12) subdivide a manutenção corretiva em duas modalidades: (1) paliativa, quando as intervenções são realizadas de forma provisória para colocar o equipamento em funcionamento e (2) curativa, quando as intervenções para reparo são realizadas de modo definitivo para restabelecer a função requerida do equipamento. Hamaoka e Lopes da Silva (2000, p.2) citam como vantagem deste tipo de manutenção a não exigência de acompanhamentos e inspeções nas máquinas. Como desvantagens, tem-se a necessidade de se trabalhar com estoques, a possiblidade das máquinas falharem durante os horários de produção e necessidade de manter máquinas de reserva.

A manutenção preventiva é aquela realizada antes da falha ou no estágio inicial da falha. São as intervenções realizadas para conservar um equipamento em condição operacional satisfatória. Envolve os serviços repetitivos e programados, tais como inspeção, detecção e correção em estágio incial de falha como observa Dhillon (1982, p.240). Segundo Pinto e Xavier, (2001, p.39) manutenção preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. Para Monchy (1989) citado por Hamaoka e Lopes da Silva (2000, p.4) é uma intervenção de manutenção prevista, preparada e programada antes da data provável do aparecimento de uma falha. Para Nunes (2001, p.13), a atividade de manutenção preventiva sistemática é aplicada quando a lei de degradação (evolução do desgaste do equipamento) é conhecida. Para Pinto e Xavier (2001, p.41) as vantagens deste tipo de manutenção são: maior continuidade operacional e intervenções programadas, maior facilidade de gerenciamento das atividades e nivelamento de recursos e previsibilidade de consumo de materiais e sobressalentes. Já as desvantagens apontadas são: necessidade de acompanhamento do plano de manutenção montado, necessidade de uma equipe de executantes eficazes e treinados e a possibilidade de introduzir defeitos não existentes no

equipamento durante as intervenções. A manutenção preventiva inclui o que Moubray (2000, p.13) chama de tarefas de restauração programadas e tarefas de substituição programadas.

A manutenção preditiva, segundo Nunes (2001, p.13) é o tipo de manutenção em que os parâmetros de controle do equipamento são submetidos a uma supervisão continua durante o funcionamento normal. Por exemplo: a presença de determinados gases no óleo isolante de transformadores pode ser um parâmetro de controle para o estado interno do equipamento. Neste caso, constatada a alteração do parâmetro é possível programar uma intervenção para correção do problema no estágio inicial da falha. Conceito semelhante apresentam Pinto e Xavier (2001, p.41), quando descrevem que a manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. A sistemática de acompanhamento pode envolver inspeções periódicas, medições, leituras, sondagem, rondas, etc.

Quanto a manutenção preditiva, há dois enfoques diferentes na literatura. O primeiro onde manutenção preditiva é considerada uma subdivisão da manutenção preventiva. Nesta linha, Monchy (1989, p.35) citado por Nunes (2001, p.14) descreve a preditiva como sendo uma forma de manutenção preventiva em que a lei de degradação (evolução do desgaste do equipamento) é desconhecida e a supervisão dos parâmetros de controle é realizada de forma contínua. Nunes e Monchy consideram que sendo a supervisão periódica, através de rondas e inspeções, fica caracterizada a manutenção preventiva por acompanhamento. O segundo enfoque adotado por Pinto e Xavier (2001, p.41) é que a manutenção preditiva, também conhecida por manutenção sob condição ou com base no estado do equipamento, pode ser realizada com supervisão de modo contínuo ou de forma periódica. Nesta última abordagem, a manutenção preditiva é considerada uma evolução ou quebra de paradigma em relação a manutenção preventiva sistemática baseada no tempo. Moubray (2000, p.14) diz que manutenção preditiva, manutenção baseda na condição e monitoramento de condição estão incluidos nas chamadas tarefas pró-ativas sob condição.

Nunes (2001, p.13) menciona que o termo técnicas preditivas é usado na literatura técnica, em vez de manutenção preditiva "por se entender que esta forma de atuação estaria englobada pela manutenção preventiva". Cita como exemplo alguns manuais de manutenção usados por empresas brasileiras do setor elétrico. De forma diferente, Pinto e Xavier (2001, p.219) empregam o termo técnicas preditivas para designar as diversas formas como pode ser feita a avaliação do estado de um equipamento, através de medição, acompanhamento ou monitoração de parâmetros, sendo a manutenção preditiva considerada como um avanço em relação a manutenção preventiva.

Segundo Wyrebski (1997) citado por Hamaoka e Lopes da Silva (2000, p.4), a vantagem da manutenção preditiva é que se aproveita ao máximo a vida útil dos elementos da máquina, podendo-se programar a reforma e substituição somente das peças comprometidas. A intervenção na planta é a mínima possível. Por outro lado, as desvantagens desse tipo de manutenção são a necessidade de acompanhamentos e inspeções periódicas, por meio de instrumentos específicos de monitoração, o que acarreta aumento de custos e a necessidade de profissionais especializados para esse serviço, conforme observam Hamaoka e Lopes da Silva (2000, p.5).

Outro tipo de manutenção mencionada por Pinto e Xavier (2001, p. 44), Nunes (2001, p.15), Moubray (1992, p.80) e Hauge (2002, p.17) é a manutenção detectiva, surgida na década de 90. A manutenção detectiva visa a busca das chamadas falhas ocultas, aquelas falhas não evidentes para o pessoal de operação e manutenção em situação normal. Estas falhas ocorrem em dispositivos que Moubray (1992, p.72) define como não sendo "*fail-safe*", podendo ocorrer a falha múltipla: a função protegida falha enquanto o dispositivo de proteção está em estado de falha. Falhas ocultas ocorrem em sistemas de proteção de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, nos dispositivos de segurança de processos e nos sistemas de desligamento de emergência. A manutenção detectiva contempla as chamadas tarefas de busca de falhas, através de manutenção preventiva ou testes periódicos na função oculta. Nunes (2001, p.15) considera que estas atividades poderiam ser classificadas como manutenção preventiva, sendo portanto a manutenção detectiva uma sub-divisão da preventiva. Hauge (2002, p. 17) chama a atenção que um teste periódico somente assegura que a falha oculta não ocorreu, não havendo garantia que o dispositivo não venha a falhar durante o próximo período de funcionamento. Pinto e Xavier (2001, p.46) observam a possibilidade da manutenção detectiva ser realizada com o sistema em operação, o que seria de grande valia para a sua maior disponibilidade e uma mudança nos padrões atuais, permitindo ao pessoal de manutenção um domínio sobre a situação de falha oculta. A desvantagem desta forma de intervenção é a necessidade de profissionais treinados e com habilitação para execução do serviço.

Uma forma de atuação mencionada por Pinto e Xavier (2001, p.46), Dhillon (1982, p.239) e Hamaoka e Lopes da Silva (2000, p.5) é a prática da Engenharia de Manutenção. Em vez de valorizar o reparo contínuo dos equipamentos, há uma atuação forte no sentido de identificar causas básicas, buscando a melhor performance do equipamento e evitando repetição de problemas. A Engenharia de Manutenção foca sua atuação na introdução de melhorias e modificações no projeto do equipamento ou componente que evitem a falha. A

freqüência com que ocorrem as falhas são acompanhadas, as possíveis causas são avaliadas e executam-se serviços que resultem em uma modificação do componente e eliminação daquela falha. Pinto e Xavier (2001, p.47) consideram que a adoção da engenharia de manutenção traz um salto significativo de resultados em relação a manutenção preventiva.

Conforme será mostrado no item 3.4, Moubray (1992, p.106) faz uma abordagem diferente, dividindo as ações de manutenção em dois grupos: a manutenção preventiva e preditiva, constituem o que ele denomina de tarefas preventivas ou pró-ativas (*preventive tasks*). As tarefas preventivas incluem as restaurações programadas, as substituições programadas e as tarefas programadas sob condição. O segundo grupo é formado pelas chamadas ações *default (default actions)* ou ações sob estado de falha, que são as tarefas de busca de falha, as manutenções não programadas (*run-to-failure*) e o reprojeto (*redesign)*.

A Manutenção Centrada em Confiabilidade é uma ferramenta que através de uma sistemática conhecida permite a aplicação dos tipos de manutenção citados acima de acordo com as características do modo de falha, segundo observam Pinto e Xavier (2001, p.36).

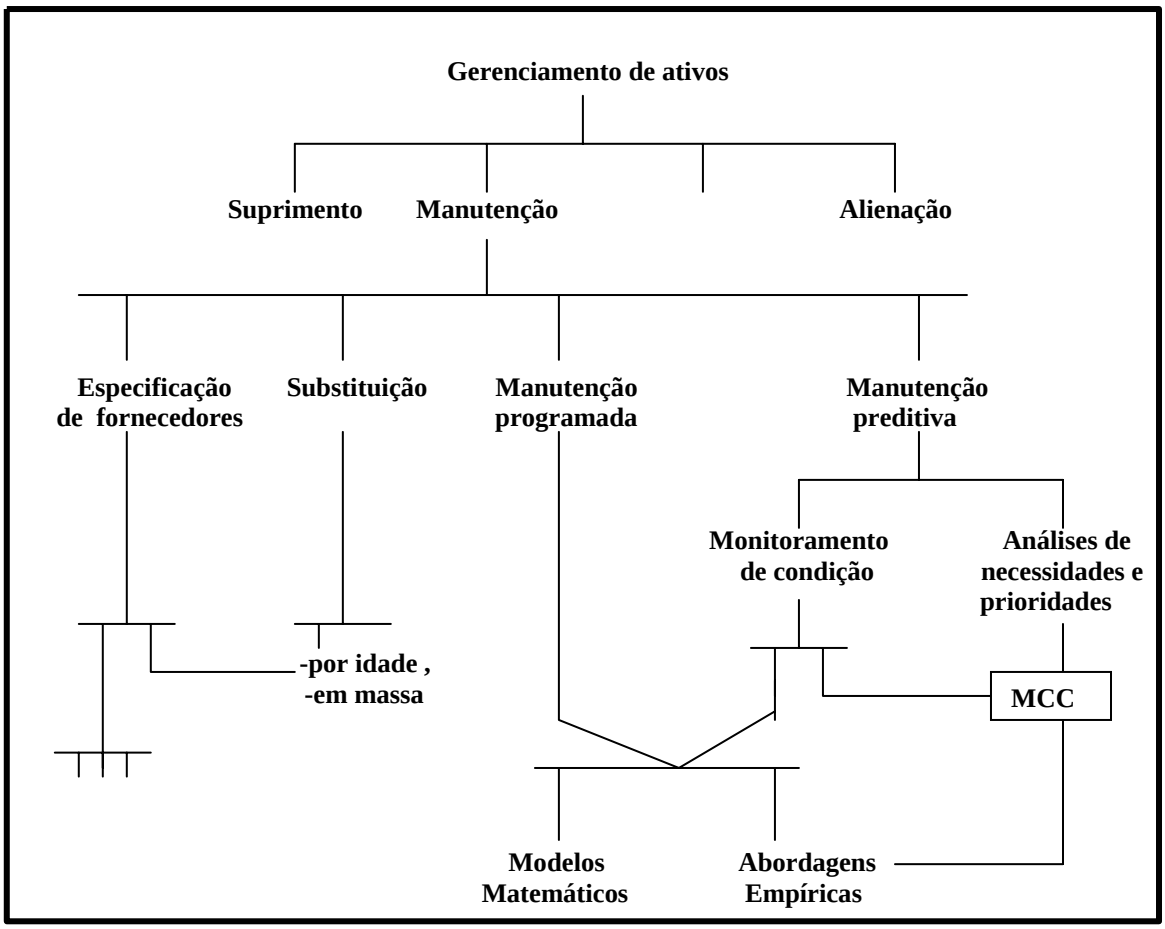


Fig. 3.2 - Visão geral das abordagens de manutenção.
Fonte: Endrenyi et al. (2001, p.639)

A figura 3.2 reproduz de Endrenyi et al. (2001, p.639) uma classificação das várias abordagens de manutenção, mostrando como se situa a MCC neste contexto.

3.3 - AS ETAPAS DA MCC

Na visão da Manutenção Centrada em Confiabilidade, segundo Moubray (2001, p.8), a manutenção tem por objetivo assegurar que um ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça. A idéia de manutenção atrelada ao contexto operacional do equipamento é a base do MCC. Lembrando a sua definição clássica, a MCC é um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de um ativo físico dentro do seu contexto operacional. Este processo pode ser sintetizado em sete questões sobre o item, equipamento ou sistema:

(1)Quais são as funções e padrões de desempenho do item no seu contexto operacional atual ?
(2)De que forma ele falha em cumprir suas funções ?
(3)O que causa cada falha operacional ?
(4)O que acontece quando ocorre cada falha ?
(5)De que forma cada falha tem importância ?
(6)O que pode ser feito para prevenir cada falha ?
(7)O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa preventiva ?

As sete questões acima abordam os passos que devem ser seguidos para utilização da sistemática da MCC sobre um componente, equipamento ou sistema. O primeiro passo a ser dado é determinar quais as funções de cada item no seu contexto operacional, juntamente com o padrão de desempenho desejado. Devem ser levadas em consideração as funções primárias e secundárias de cada item .

A segunda etapa da sistemática da MCC consiste em relacionar as falhas funcionais de cada item ou equipamento. Falha funcional pode ser definida como a inabilidade de um ativo encontrar um padrão de desempenho desejado ou como cita Lafraia (2001, p.105) é a impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua função no nível especificado ou requerido. As falhas são consideradas de duas maneiras: (1) O modo como o item pode falhar em cumprir sua função e (2) O que pode causar cada perda de função.

Uma vez identificada cada falha funcional, o terceiro passo é identificar todos os modos de falha (eventos) que são prováveis de causar cada perda de função, considerando as falhas já ocorridas no próprio equipamento ou em similares no mesmo contexto operacional, falhas que estejam sendo prevenidas através de manutenção existente e falhas consideradas

possíveis de ocorrer no contexto operacional real. Modo de falha é a descrição da maneira pela qual um item falha em cumprir com a sua função (LAFRAIA, 2001). A lista dos modos de falha deve incluir falhas causadas por erros humanos. A partir desta etapa utiliza-se a *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA), traduzida como Análise de Modos de Falhas e Efeitos segundo Lafraia (2001, p.101) ou Análise do Modo e Efeito de Falha como em Pinto; Xavier (2001, p.113), ferramenta muito utilizada em análise de falhas e risco, que será apresentada no capítulo 4.

O quarto passo a ser realizado é listar os efeitos provocados por cada modo de falha. São informações fundamentais para a avaliação das conseqüências da falha: evidências da ocorrência da falha, o que é afetado pela ocorrência (segurança, meio ambiente, produção, operação, lucratividade) e tipo de reparo necessário. Após a descrição dos efeitos de cada modo de falha, será necessário avaliar suas conseqüências. Trata-se de um ponto chave da MCC, as conseqüências das falhas são muito mais importantes que suas características técnicas. Deve-se conhecer como o modo de falha afeta a organização ou quais tipos de conseqüências resultam de cada modo de falha. São quatro grupos de conseqüências: (1) Falhas ocultas, não evidentes para pessoal de operação com possibilidade de falhas múltiplas. (2) Conseqüências para segurança e meio ambiente. (3) Conseqüências operacionais. Afetam entrega, qualidade, clientes, prazos,etc. (4) Sem conseqüências operacionais: envolve somente o custo de reparo.

Após a identificação das falhas funcionais, dos modos de falha, dos efeitos e dos tipos de conseqüências é feita uma avaliação sobre a estratégia de manutenção a ser adotada para cada modo de falha, a fim de eliminá-lo ou reduzir suas conseqüências. É a etapa que trata do que deve ser feito, compondo um plano de manutenção. Deve-se afastar a idéia que todas as falhas devem ser evitadas, ou seja, busca-se o gerenciamento das falhas e não apenas a prevenção indiscriminada de todas elas. A figura 3.3, apresenta um diagrama das etapas que compõem o processo da MCC.

3.4 - ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO NA MCC

Para escolha da melhor estratégia em cada modo de falha é necessário entender o padrão moderno de tipos de curvas de falha aceitos nos dias atuais. A figura 3.4 reproduzida de Moubray (1992, p.12) e também citada em Smith (1993, p.45) e Pinto; Xavier (2001, p.132) mostra os seis padrões de falha resultantes do aumento da complexidade dos

equipamentos nos últimos vinte anos. As curvas mostram a variação da probabilidade condicional da falha em função da idade do equipamento ou componente.

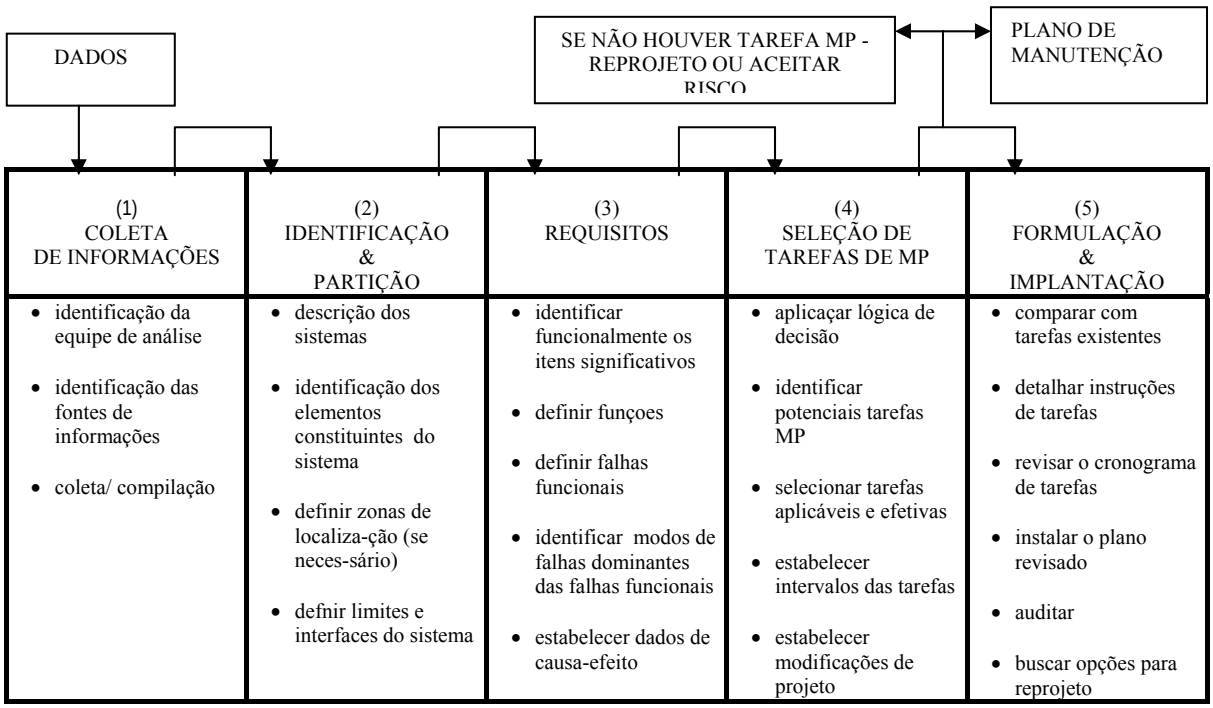


Fig. 3.3 - Diagrama de etapas da MCC.
Fonte: Relatório EPRI NP-4795, 1986.

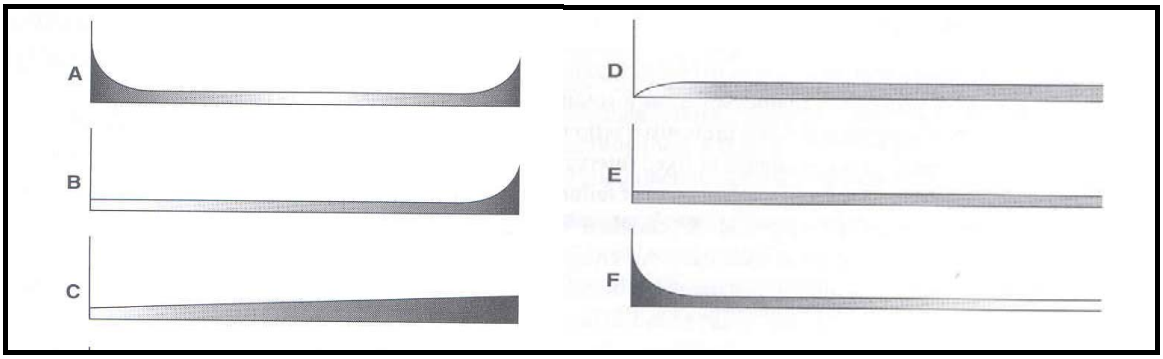


Fig. 3.4 - Padrões de falha de equipamentos. Fonte: Moubray (1992, p.12)

Segundo Moubray (1992) e Smith (1993), estudos feitos em aeronaves civis mostram que 4% dos itens seguem o padrão A, 2% o padrão B, 5% o padrão C, 7% o padrão D, 14% o padrão E e 68% seguem o padrão F, sendo que esta distribuição não é necessariamente a mesma para outros ramos da indústria. A evolução do conhecimento dos padrões de falhas, mostrou ser falsa a crença de que sempre existe uma relação entre confiabilidade e idade operacional, consequentemente a idéia de que revisões periódicas em um equipamento tornam menos provável sua falha. Moubray (1992, p.13) comenta sobre esta falsa crença e acrescenta que isto só é verdade se existir um modo de falha dominante relacionado à idade.

Diz o autor, "Limites de idade influenciam pouco ou nada para aumentar a confiabilidade de itens complexos. De fato, revisões periódicas podem realmente aumentar a taxa de falha total , introduzindo mortalidade infantil em sistemas até então estáveis". Smith (1993, p.46) acrescenta que nos estudos realizados, somente 11% (padrões A, B e C) dos componentes experimentaram uma característica com alguma influência da idade e os outros 89% (padrões D, E e F) dos componentes não desenvolveram nenhum mecanismo de envelhecimento ou aumento da taxa de falha durante sua vida útil.

Após a avaliação das conseqüências das falhas é necessário estabelecer quais as ações serão tomadas a fim de eliminá-las ou reduzir suas conseqüências. É o que Moubray (2000, p.11) denomina de gerenciamento das falhas e não apenas a prevenção indiscriminada de todas elas. A MCC divide as técnicas de gerenciamento de falhas em: (1) Tarefas pró-ativas e (2) Ações ou tarefas *default.*

As tarefas pró-ativas são divididas em três categorias: (1) tarefas programadas sob condição, (2) tarefas de restauração programada e (3) tarefas de substituição programada.

As tarefas de restauração ou substituição programada estão relacionadas com uma idade limite ou com base no tempo. Embora de pouca influencia na confiabilidade de equipamentos complexos, pode ser válida para itens mais simples. São tarefas daquilo que tradicionalmente é conhecido como manutenção preventiva baseada no tempo.

As tarefas sob condição baseiam-se no fato que a maioria dos tipos de falhas apresentam alguma indicação que ela está para ocorrer, ou seja apresentam algumas condições físicas que indicam que a falha funcional está na eminência de ocorrer ou um processo de falha potencial. O objetivo deste tipo de tarefa é evitar que a falha potencial possa se transformar em uma falha funcional.

Moubray (2000, p.170) define ações ou tarefas *default* como aquelas que podem ser tomadas caso nenhuma tarefa pró-ativa seja considerada tecnicamente viável e que devem ser feitas para qualquer modo de falha. Isto significa que ao final do processo da MCC, um determinado modo de falha será objeto de pelo menos uma ação *default*. Uma ação *default* pode ser entendida como uma ação padrão que é desempenhada sob estado de falha. As tarefas *default* são divididas em outras três categorias: (1) tarefas de busca de falhas, (2) reprojeto (*redesign)* do item ou sistema e (3) manutenção não programada (*run-to-failure*).

A busca de falhas consiste em verificar periodicamente a existência de falhas ocultas nos sistemas de intertravamento, proteção ou emergência. Devem ser realizados testes para detectar falhas não evidentes ao pessoal de operação e manutenção. Existem alguns sistemas

de teste que podem ser realizados sem a parada do equipamento, mas a maioria dos testes são realizados com a parada programada do equipamento.

As manutenções não programadas significam a ausência de qualquer forma de manutenção preventiva ou preditiva. Não há ação em prevenir ou antecipar aos modos de falha. Após a ocorrência da falha, são realizados os reparos necessários. Este tipo de ação é adequada para as falhas que não possuem conseqüências significativas para o sistema.

O reprojeto de um item ou sistema é o conjunto de modificações que podem ser efetuadas para restabelecer ou melhorar a confiabilidade e reduzir riscos em um sistema. Incluem modificações de ordem física ou relativas a procedimentos.

3.5 - DIAGRAMAS DA MCC

Os diagramas de decisão permitem que as estratégias ou tarefas de manutenção sejam selecionadas para cada modo de falha identificado, considerando o seu contexto operacional e as conseqüências da falha. Moubray (1992, p.14) sugere como um dos pontos fortes da MCC, o critério adotado para escolha das técnicas pró-ativas tecnicamente possíveis em algum contexto, da freqüência com que devem ser executadas e de quem será responsável por fazê-las. Duas condições precisam ser avaliadas: (1) Se a tarefa pró-ativa é possível de ser realizada, o que depende das características técnicas da falha a ser prevenida. (2) Se a tarefa pró-ativa vale a pena ser realizada, o que depende da sua eficácia e custo em relação à conseqüência da falha.

Para falhas ocultas uma tarefa pró-ativa vale a pena ser realizada, se ela reduz o risco de falha múltipla associada com aquela função para um nível aceitável mais baixo. Se não existir uma tarefa pró-ativa que possa atender este objetivo, então deve-se recorrer a uma ação de busca de falha. Se uma tarefa de busca de falha não for encontrada, então a opção deve ser por manutenção não programada (corretiva) ou reprojetar o sistema, dependendo das conseqüências resultantes da falha múltipla.

Para falhas com conseqüências para segurança e meio ambiente, uma tarefa pró-ativa vale a pena ser realizada, se ela reduzir o risco da falha para um nível mais baixo ou eliminá-lo. Se isto não for viável, o sistema ou o processo deve ser reprojetado.

Para falhas com conseqüências operacionais, a tarefa pró-ativa vale a pena ser realizada se o custo total de realizá-la em um período de tempo é menor que o custo da conseqüência operacional mais o custo para reparar o equipamento no mesmo período. Ou seja, a tarefa tem que ser justificada economicamente. Se a tarefa pró-ativa não for

justificável economicamente, uma decisão deve ser tomada entre manutenção não programada (corretiva) se a conseqüência operacional é aceitável ou reprojetar o sistema ou processo, se a conseqüência não é aceitável. Se a falha tem conseqüências não operacionais, uma tarefa pró-ativa vale a pena ser realizada se o custo total de realizá-la em um período de tempo é menor que o custo do reparo do equipamento envolvido na falha no mesmo período. A tarefa tem que ser justificada economicamente, caso contrário a opção fica entre manutenção não programada (corretiva) se o custo de reparo não for alto ou reprojetar o sistema ou processo, se o custo de reparo é aceitável. Moubray (1992, p.15) observa que esta abordagem da MCC para as estratégias de manutenção escolhidas, leva a uma redução substancial nos trabalhos de rotina (tarefas pró-ativas) que serão mais bem executadas. Também ocorre eliminação de tarefas não produtivas, resultando em uma manutenção mais efetiva.

Existem variações nos diagramas de decisão da MCC apresentados pelos diversos autores conforme apresentado nas figuras 3.5 e 3.6.

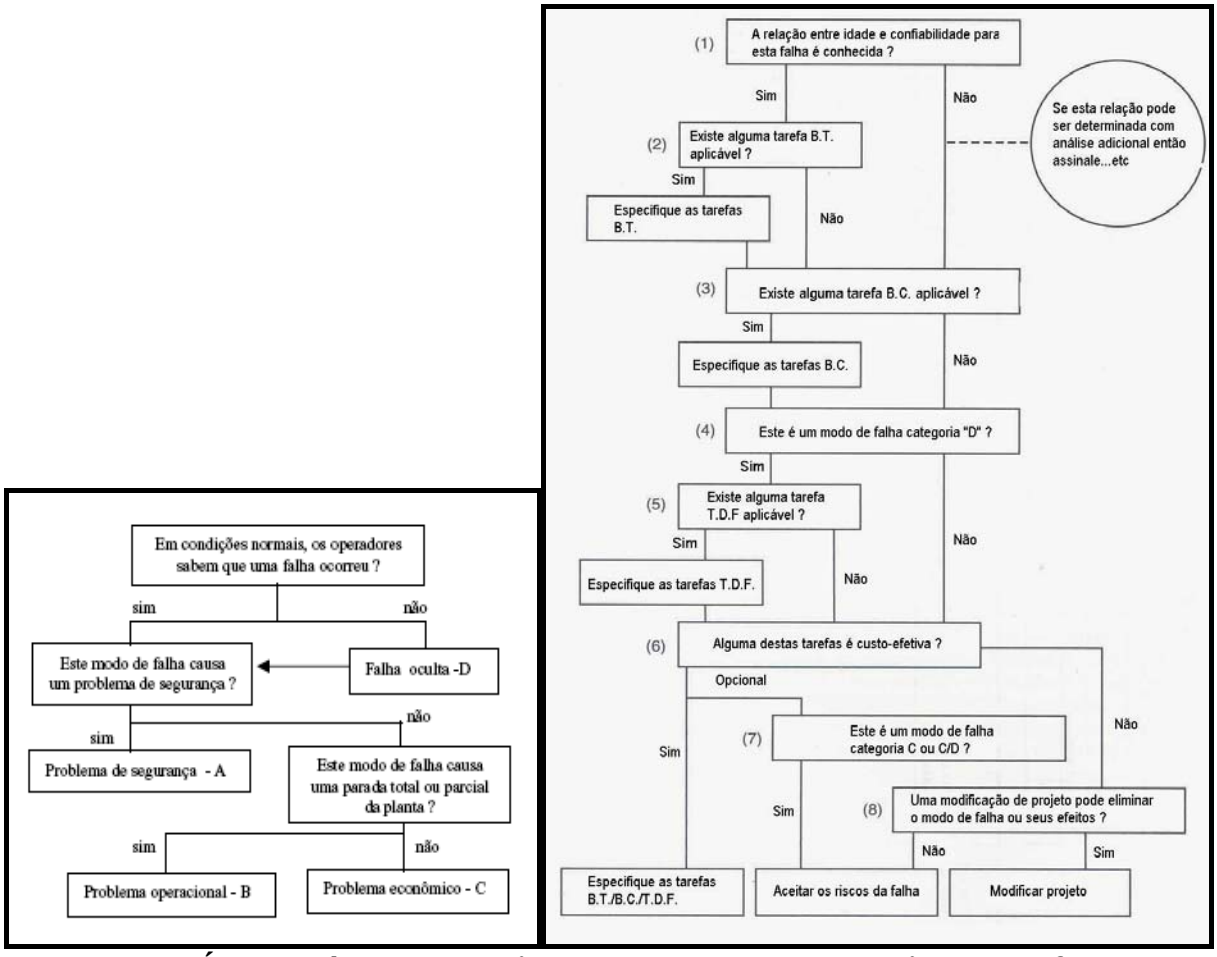


Fig. 3.5 - Árvore Lógica de Decisão (E) e o Diagrama de Seleção de Tarefas (D).
Fonte: Smith (1992, p. 90; 95)

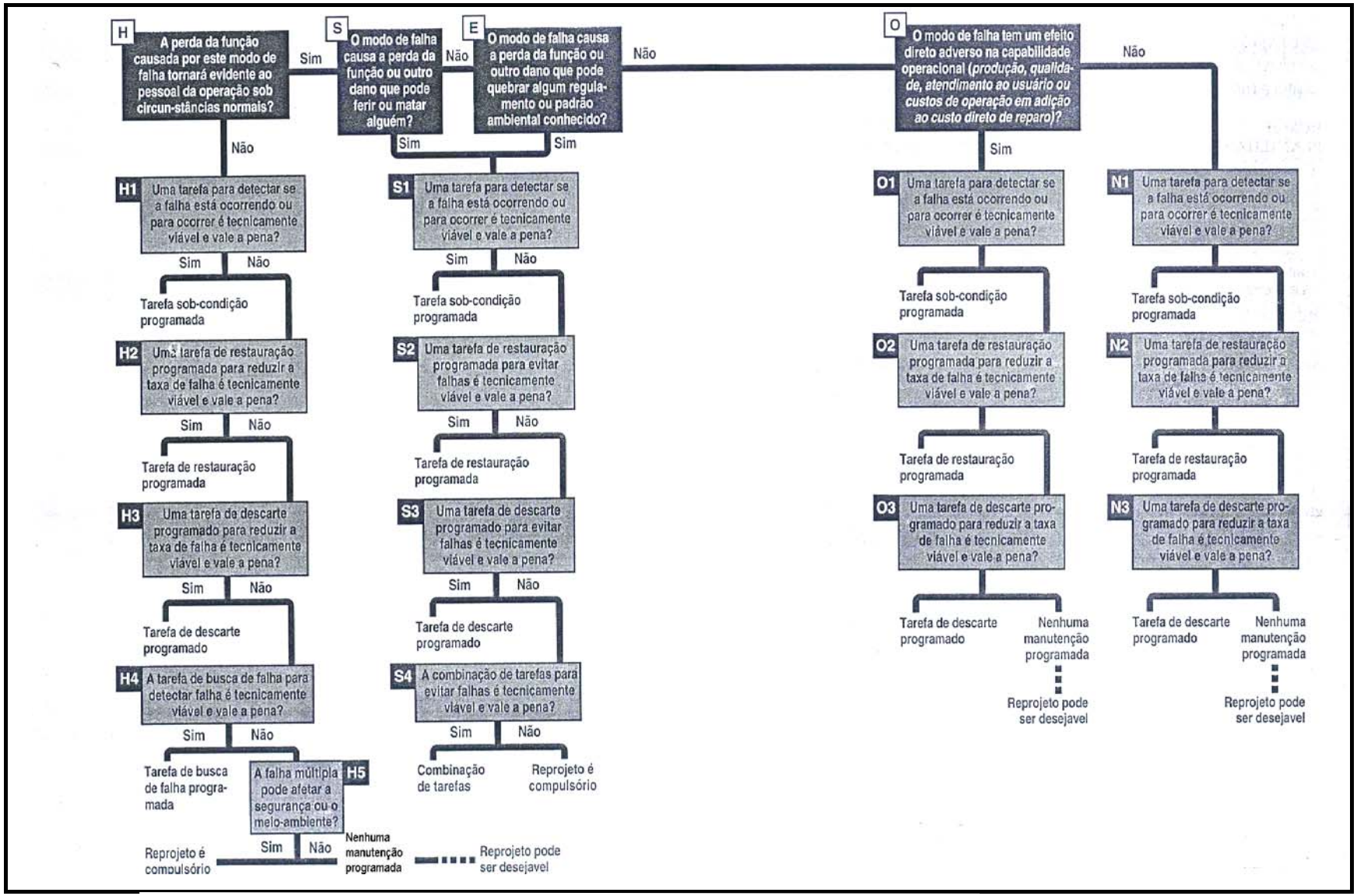


Fig. 3.6 - Diagrama de decisão da MCC conforme Moubray (2000, p.200)

Segundo Nichols e Matusheski (2000, p.1), Smith (1992) pertence a outra escola de pensamento que sugere que a unidade de produção seja dividida em sistemas e que somente as tarefas da MCC que mitiguem falhas de sistema são consideradas, o que traz vantagens e desvantagens em relação a abordagem baseada em componentes.

Alguns autores apresentam variações no diagrama de decisão, como Johnston (2002, p.367), Hauge e Johnston (2001, p.38) e Hauge et al. (2000, p.311). Tais variações são algumas vezes chamadas de *Streamlined RCM Process*, traduzido para Processo da MCC Simplificada. O objetivo deste tipo de abordagem é a simplificação da sistemática da MCC através do uso de padrões pré-definidos de tarefas de acordo com o tipo de equipamento, visando maior rapidez e eficiência no uso para equipamentos simples e não críticos, ainda que completo e rigoroso para equipamentos complexos, caros e críticos. Moubray (2000b, p. 6) ressalta, entre outros comentários, que esta abordagem não considera os mesmos princípios da MCC tradicional na qual a análise é feita sobre o equipamento dentro do seu contexto operacional. A figura 3.7 abaixo mostra um diagrama de decisão de um processo simplificado da MCC, segundo Hauge et al. (2000, p.314).

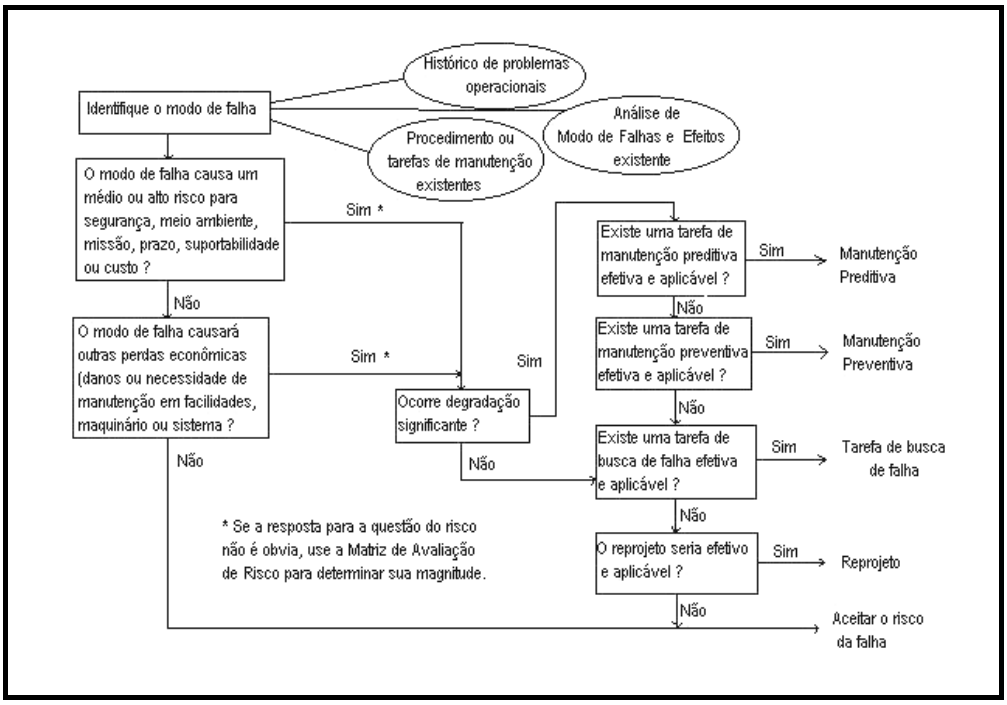


Fig. 3.7 - Diagrama de decisão de um processo simplificado da MCC.
Fonte: Hauge et al. (2000, p.314).

Nichols e Matusheski (2000, p.1) observam que o Electric Power Research Institute (EPRI) tem experimentado esta abordagem em algumas concessionárias de energia americanas com variados níveis de sucesso. Hauge e Johnston (2001, p.36;38) relatam que o

processo da MCC simplificada é uma ferramenta bastante utilizada nas atividades de manutenção das bases de lançamento e aterrizagem do programa espacial americano, mostrando que a diferença para a MCC tradicional está no uso de uma abordagem baseada em procedimentos para identificação dos modos de falhas, onde os analistas examinam procedimentos de manutenção para determinar quais modos de falhas estão sendo prevenidos.

4 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO E CONFIABILIDADE

4.1 - CONCEITOS E CONSIDERAÇÕES INICIAIS

4.1.1 - Perigo e risco

Conforme observam Billinton e Allan (1992, p. 2), " a sociedade tem uma grande dificuldade em distinguir entre um perigo, que pode ser priorizado em termos de sua severidade, mas não leva em conta sua probabilidade, e risco, que considera não somente o evento perigoso, mas também a sua probabilidade de ocorrência".

Segundo o CCPS-AIChE (Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992, p.11), perigo é uma característica física ou química inerente de um material, sistema, processo ou planta que tem o potencial de causar dano. O risco é função da freqüência de ocorrência e da conseqüência de determinado perigo (DNV, 2003, p.11). Os termos perigo, risco, análise e avaliação são usados pelos autores em combinações diversas na bibliografia. Também na língua inglesa, observa-se diferentes nomenclaturas com as palavras *hazard*, *risk*, *analysis*, *evaluation* e *assessment*. Lafraia (2001, p.110), por exemplo, traduz *risk* ou *hazard* como risco e *danger* como perigo. O termo "*Hazard evaluation* (HE)" que pode ser traduzido como avaliação de perigos é usado pelo CCPS-AIChE (1992). King e Magid (1979, p. 194) usam o termo "*Hazard analysis*" que pode ser traduzido como análise de perigos. Os termos "*Risk Assessment*" como em Hauge e Johnston (2001, p.36) e "*Hazard Assessment*" como em Lees (1991, v.1, p.175) também são encontrados em publicações na língua inglesa. Em Melo et al. (2002, p.3) encontramos o termo Avaliação de Risco. A expressão "Análise de Perigos" também é adotada por alguns autores a exemplo de Araújo e Lima et al. ([199-], p.4-1). Rovisco ([199-], p.1) citando Kolluru et al., (1996) observa que " Análise de Risco e Avaliação de Risco são termos frequentemente utilizados como sinônimos, embora a análise de risco seja mais ampla incluindo os aspectos de gestão do risco ". Para os objetivos deste trabalho usa-se o termo "Análise de Risco", principalmente por ser bastante usado no Brasil entre os especialistas da área, nas indústrias petroquímicas e em concordância com a visão ampla apresentada por Rovisco ([199-], p.1).

Lafraia (2001, p.111) apresenta duas relações interessantes. Uma relação figurativa entre perigo e risco:

Risco = Perigo / Medidas de controle

O mesmo autor define que matematicamente o risco pode ser expresso pela relação:

Risco = (Probabilidade de ocorrência).(Detecção).(Severidade das conseqüências)

Observa-se na expressão acima o aparecimento de mais uma variável presente no risco: a detecção, definida por Lafraia (2001, p.111) como uma avaliação da probabilidade de se encontrar uma falha antes que a mesma se manifeste.

Um outro aspecto apresentado por Lees (1991, v.1, p.177) é o risco *r* para um indivíduo. O risco *r* pode ser calculado pela equação 4.1:

$$r = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot f_i \qquad \textbf{(4.1)}$$

onde x_i é o número de mortes em um tipo de acidente em potencial; f_i a freqüência de tal acidente; n o número de tipos de acidentes em potencial e N o número total de pessoas sob o risco.

As expressões acima mostram que é possível uma quantificação e priorização dos riscos envolvidos em uma determinada falha ou atividade. Lafraia (2001, p.113) ilustra isto com a seguinte afirmação: " Uma falha pode ocorrer frequentemente, mas ter pequena importância e ser facilmente detectável. Nesse caso, não apresentará grandes problemas (baixo risco). Uma falha que tenha baixíssima probabilidade de ocorrência, mas extremamente grave - por exemplo um vazamento de material radiativo de um reator nuclear - merecerá uma grande atenção..."

4.2.2 - Análise de risco

Um estudo de análise de risco é uma tentativa organizada de identificar e analisar a significância das situações associadas com o projeto ou atividade (CCPS-AIChE, 1992, p.11). É o processo ou procedimento para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos e seu significado, segundo Lafraia (2001, p.111). São realizados para apontar deficiências e pontos fracos no projeto ou operação de uma planta.

As análises geralmente focam as questões de segurança de processo, como efeitos agudos de emissões químicas não programadas sobre pessoal da planta ou público em geral. Estes estudos complementam atividades industriais de segurança e saúde mais tradicionais, tais como proteção contra deslizamentos ou quedas, uso de equipamentos de proteção individual, monitoramento de exposição de empregados à substâncias químicas e outras.

Muitas técnicas podem auxiliar no alcance de necessidades da planta sejam operacionais, econômicas ou ambientais.

Apesar da análise de risco tipicamente usar métodos qualitativos para análise de falhas potenciais de equipamentos e erros humanos que podem resultar em acidentes, elas podem também identificar falhas nos sistemas de gerenciamento de um programa de segurança de processo (PSP) de uma organização, como por exemplo, falhas no gerenciamento de mudanças ou deficiência nas suas práticas de manutenção (CCPS-AIChE, 1992, p.11). As técnicas individuais de Análise de Risco podem ser usadas, por exemplo, para (1) investigar as prováveis causas de um incidente já ocorrido, (2) como parte de um programa de gerenciameno de mudanças na planta, e (3) para identificar equipamentos críticos sob aspecto de segurança para manutenção especial , testes, ou inspeção como parte de um programa de integridade mecânica (CCPS-AIChE, 1992, p.7).

Para Dhillon (1982, p.164) os três elementos básicos chaves da análise de risco que devem estar presentes em qualquer abordagem são: (1) identificação de perigos potenciais, (2) avaliação dos eventos, sua importância, probabilidade de ocorrência e efeitos e (3) comunicação dos resultados finais para a organização com a definição das medidas corretivas, prazos, responsabilidades e recursos.

Todas as técnicas de análise de risco são mais completas e efetivas quando conduzidas através de um grupo de pessoas com experiência nas diversas atividades envolvidas: segurança , instrumentação, mecânica, elétrica, operação, etc (CCPS-AIChE, 1992, p.12). As avaliações podem ser conduzidas para auxiliar o gerenciamento de risco de um processo desde os estágios iniciais da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), em detalhamento de projetos, montagem e com a unidade em operação, podendo ser extendidas por todo o tempo de vida operacional até a desativação e desmontagem do processo ou sistema. Através do uso desta abordagem de "Ciclo de vida" combinada com outras atividades de um programa de segurança de processo, as avaliações de perigo podem de maneira eficiente revelar deficiências no projeto e operação antes da unidade industrial ter seu local definido, ser construída, ou iniciar operação.

São vários os benefícios de um programa de avaliação de riscos, embora não facilmente mensuráveis: redução de acidentes no processo, redução de conseqüências de acidentes que ocorram, melhoria na resposta em emergências, melhorias em treinamento e entendimento do processo, práticas operacionais mais produtivas e eficientes e a melhoria no relacionamento com a comunidade e agentes reguladores (CCPS-AIChE, 1992, p.8). Nos dias

atuais, a avaliação de riscos é uma atividade cada vez mais requerida como obrigatória pela legislação dos orgãos reguladores de segurança do trabalho e ambientais.

Um acidente deve ser visto como uma seqüência de eventos e cada um destes eventos propagadores representa uma oportunidade para interromper a seqüência do acidente ou agravamento da severidade do seus efeitos. O entendimento destas seqüências de eventos para potenciais acidentes em uma atividade, permite a tomada de ações para reduzir a freqüência e as conseqüências de suas ocorrências. (CCPS-AICh, 1992, p.20)

Após a identificação dos perigos, pode-se adotar medidas mitigadoras ou eliminadoras dos seus efeitos, permitindo que projeto, construção, operação e manutenção das instalações de uma planta sejam executadas de forma segura e as conseqüências de potenciais acidentes sejam minimizadas. Melo et al. (2002, p.8) descrevem como exemplos de medidas mitigadoras aquelas que (1) reduzem freqüência: treinamento de operadores, mudanças nas condições de trabalho, colocação de proteção nas máquinas, etc, ou (2) reduzem a intensidade de suas conseqüências: implementar o uso de EPI (Equipamento de Proteção Individual), instalar sistemas fixos de combate a incêndios, estabelecer plano de ação para acidentes. Melo et al. ressaltam ainda que a adoção de tais medidas produzem um efeito preventivo na curva de riscos, o que é representado na figura 4.1.

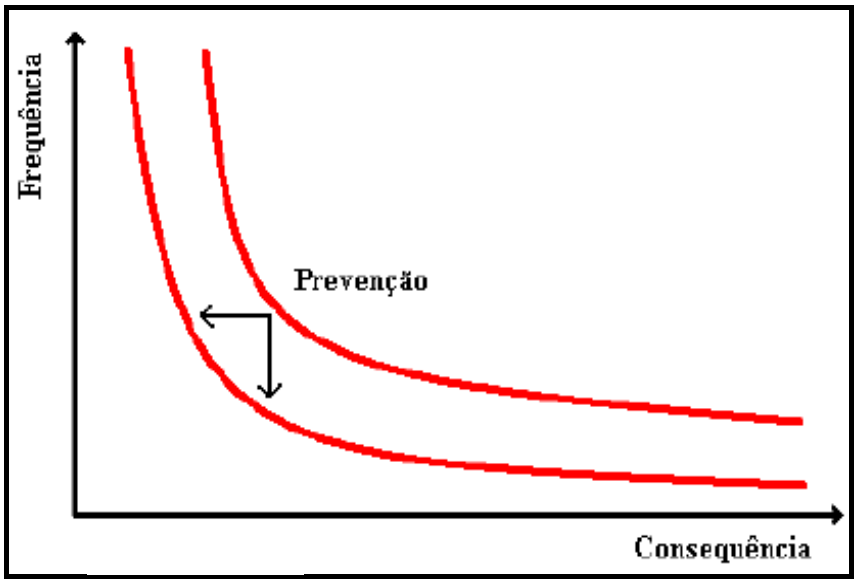


Fig. 4.1 - Comportamento da curva de riscos com as medidas mitigadoras. Fonte: Melo et al. (2002)

Lafraia (2001, p.114) acrescenta como medidas para reduzir a severidade do risco: adição de dispositivos de segurança, limite de capacidade, uso de tecnologia diferente. Para

prevenção do risco: uso de fatores de segurança maiores, uso de sistemas em paralelo ou *stand-by*, análise de tensões. Para detecção do risco: realização de testes e inspeções.

A identificação de riscos envolve duas tarefas chaves: (1) identificação de conseqüências não desejadas específicas e (2) identificação de material, sistema, processo, e características da planta que poderiam produzir essas conseqüências. As conseqüências indesejáveis podem ser classificadas em impactos humanos, impactos ambientais ou impactos economicos. São impactos humanos: danos ao consumidor, danos à comunidade, danos ao pessoal interno da planta, danos ao pessoal de uma unidade, perda de empregos e efeitos psicológicos. Os impactos ambientais podem ser externos ou internos à planta, podendo haver contaminação do ar, água ou solo. Impactos econômicos envolvem: danos a propriedade, perda de inventário, perda de produção, redução da qualidade de produtos, perda de mercado, despesas legais ou imagem negativa da empresa. (CCPS-AIChE ,1992, p.35)

4.2 - VISÃO GERAL DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO

Através de técnicas qualitativas é possível obter-se uma graduação de riscos em uma atividade ou processo. Para que se possa graduar cada risco encontrado é necessário definir categorias de freqüência de ocorrência e conseqüência para cada perigo identificado. Não existe uma definição de categorias de freqüência e conseqüência ótima. A elaboração dessas categorias é uma tarefa subjetiva e intrínseca a cada avaliação de risco. Assim, avaliações que possuem objetivos diferentes podem apresentar grandes variações nessas categorias. Diferenças essas, que vão desde o número de categorias até o que abrange cada uma delas.

Em determinadas situações uma análise de risco apenas qualitativa não pode fornecer todas as informações necessárias para se tomar uma decisão. Nestes casos, métodos quantitativos mais detalhados podem ser usados. É a chamada AQR (Análise Quantitativa de Riscos), conforme menciona o CCPS-AIChE (1992, p.13).

Existem diferentes técnicas de análise de risco, cada qual com objetivos, benefícios, custos e limitações próprias. Segundo Araújo e Lima (199_, p.1-2), CCPS-AIChE (1992, p.53-72) e Melo et al. (2002, p.3) são técnicas de análise de risco :

- Inspeção de Segurança (*Safety Review*)
- Lista de Verificação (*Checklist Analysis*)
- Priorização Relativa (*Relative Ranking*)
- Análise Preliminar de Perigos/Riscos (*Preliminary Hazard Analysis*)
- Análise What-If (*What-If Analysis*)

- Análise What-If / LV (*What-If / Checklist Analysis*)
- Análise de Perigos e Operabilidade (*Hazard and Operability Analysis*)
- Análise de Modos e Efeitos de Falhas (*Failure Modes and Effects Analysis*)
- Análise por Árvore de Eventos (*Event Tree Analysis*)
- Análise por Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis*)
- Análise de Causa e Conseqüência (*Cause-Consequence Analysis*)
- Análise da Confiabilidade Humana (*Human Reliability Analysis*)
- Análise Histórica
- Análise de Vulnerabilidade (*Vulnerability Models*)
- Análise de Custo-Benefício
- Análise das Causas-Raiz de falhas (*Root Cause Failure Analysis*)
- Análise Quantitativa de Riscos
- Técnicas Especiais

Melo et al. (2002, p.3) citam ainda a Técnica de incidentes críticos (TIC) e a Série de riscos (SR).

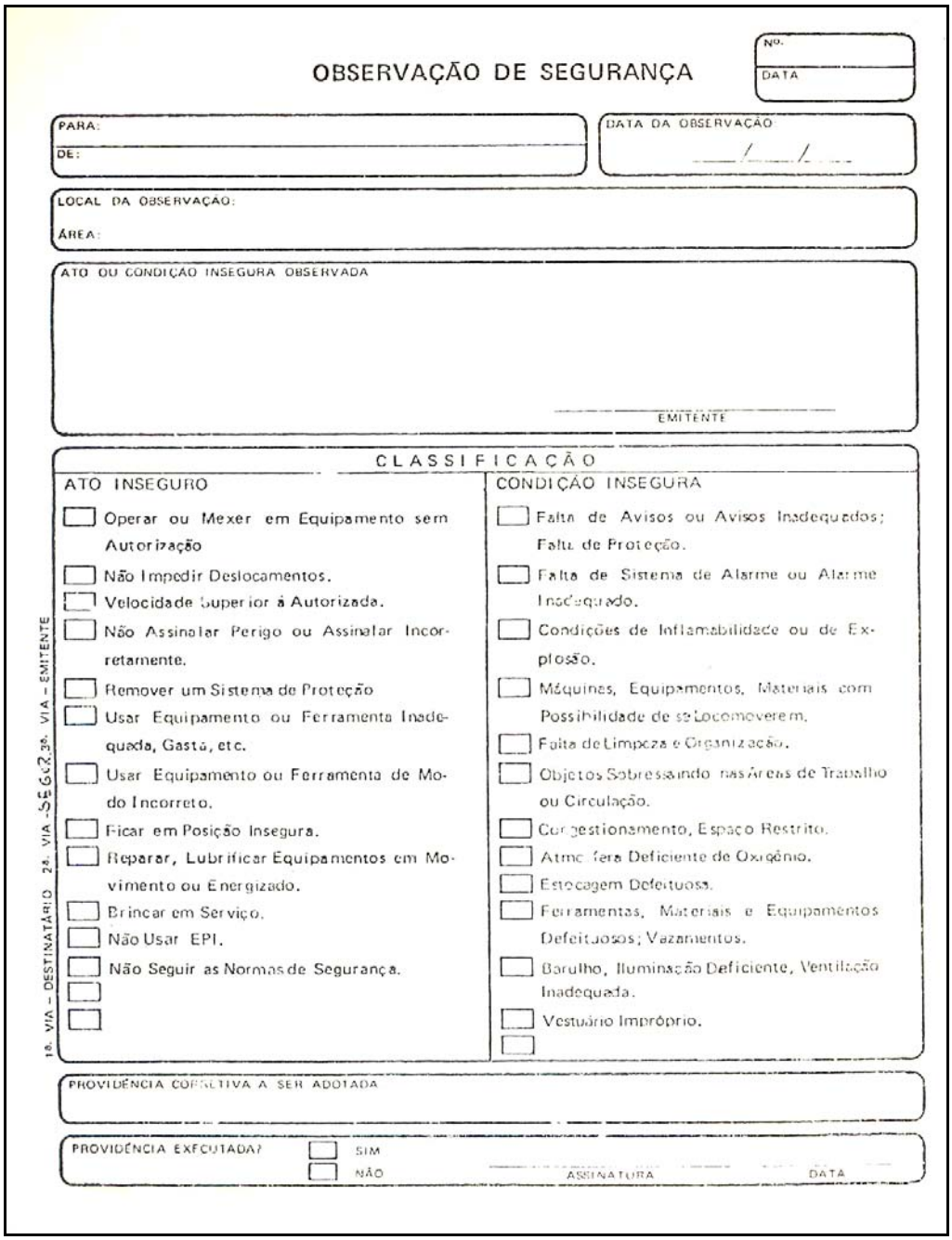
A seleção das técnicas que serão usadas em uma determinada aplicação é uma etapa importante para assegurar resultados que estejam de acordo com os objetivos do estudo de avaliação. Dhillon (1982, p.165), por exemplo, divide as técnicas de análise de risco, quanto a finalidade dos estudos, em três classes: (1) Análise conceitual (ex: APR), (2) Análise de projetos e desenvolvimentos de sistemas (ex: árvore de eventos e árvore de falhas) e (3) Análise de segurança funcional (ex: HAZOP). Araújo e Lima (199-, p.1-2) classifica as técnicas de análise de risco em quatro grupos: (1) Técnicas destinadas à identificação de riscos (LV, AH, APR, HAZOP e FMEA), (2) Técnicas destinadas à avaliação de freqüências de ocorrências de cenários de acidentes (AF e AE), (3) Técnicas a serem usadas na avaliação das conseqüências de acidentes (AV e ACC) e (4) Técnicas a serem usadas em situações específicas (AQR, ACB e TE). Entretanto, as classificações não são rígidas e frequentemente mais de uma técnica necessita ser utilizada para os objetivos de uma análise de risco.

Apresenta-se a seguir uma visão geral sobre as técnicas de análise de risco.

4.2.1 - Inspeções de segurança.

Consiste em inspecionar de maneira informal ou formal, visual e rotineira as condições da planta, procedimentos operacionais e perigos existentes em determinada área

industrial. Envolve entrevistas com operadores, engenheiros, gerentes, pessoal de manutenção e segurança dependendo da organização da planta. As inspeções costumam ser realizadas com apoio de formulários. Um exemplo destes formulários é mostrado na figura 4.2:



OBSERVAÇÃO DE SEGURANÇA

Nº.
DATA

PARA:
DE:

DATA DA OBSERVAÇÃO
___/___/___

LOCAL DA OBSERVAÇÃO:
ÁREA:

ATO OU CONDIÇÃO INSEGURA OBSERVADA

EMITENTE

CLASSIFICAÇÃO

ATO INSEGURO
- [ ] Operar ou Mexer em Equipamento sem Autorização
- [ ] Não Impedir Deslocamentos.
- [ ] Velocidade Superior à Autorizada.
- [ ] Não Assinalar Perigo ou Assinalar Incorretamente.
- [ ] Remover um Sistema de Proteção
- [ ] Usar Equipamento ou Ferramenta Inadequada, Gasta, etc.
- [ ] Usar Equipamento ou Ferramenta de Modo Incorreto.
- [ ] Ficar em Posição Insegura.
- [ ] Reparar, Lubrificar Equipamentos em Movimento ou Energizado.
- [ ] Brincar em Serviço.
- [ ] Não Usar EPI.
- [ ] Não Seguir as Normas de Segurança.
- [ ]
- [ ]

CONDIÇÃO INSEGURA
- [ ] Falta de Avisos ou Avisos Inadequados; Falta de Proteção.
- [ ] Falta de Sistema de Alarme ou Alarme Inadequado.
- [ ] Condições de Inflamabilidade ou de Explosão.
- [ ] Máquinas, Equipamentos, Materiais com Possibilidade de se Locomoverem.
- [ ] Falta de Limpeza e Organização.
- [ ] Objetos Sobressaindo nas Áreas de Trabalho ou Circulação.
- [ ] Congestionamento, Espaço Restrito.
- [ ] Atmosfera Deficiente de Oxigênio.
- [ ] Estocagem Defeituosa.
- [ ] Ferramentas, Materiais e Equipamentos Defeituosos; Vazamentos.
- [ ] Barulho, Iluminação Deficiente, Ventilação Inadequada.
- [ ] Vestuário Impróprio.
- [ ]

1ª. VIA – DESTINATÁRIO 2ª. VIA – SEGURANÇA 3ª. VIA – EMITENTE

PROVIDÊNCIA CORRETIVA A SER ADOTADA

PROVIDÊNCIA EXECUTADA? [ ] SIM [ ] NÃO

ASSINATURA DATA

Fig. 4.2 - Formulário típico para uso em inspeção de segurança.
Fonte: Carneiro Filho (1985, p. 10)

O procedimento de inspecionar periodicamente um local de trabalho, mantém o pessoal de operação alerta para os perigos , verifica a necessidade de revisar procedimentos operacionais, procura identificar mudanças introduzidas em equipamentos ou processos que

possam ter introduzido novos perigos, avalia as bases do projeto dos sistemas de controle e segurança, verifica a aplicação de novas tecnologias para perigos existentes e a adequacidade da manutenção. Existem diferentes tipos de inspeção de segurança. King e Magid (1979, p.92) mencionam dois tipos de inspeção: (1) Inspeções para verificar a segurança do ambiente de trabalho, maquinário, ferramentas e área industrial. (2) Inspeções para verificar a segurança das práticas dos empregados durante o trabalho. O primeiro tipo visam descobrir condições inseguras no ambiente de trabalho e o segundo visa decobrir atos inseguros praticados por pessoas. Carneiro Filho (1985, p.9) classifica as inspeções de segurança em: (1) Inspeções Informais , feitas diariamente pelo próprio supervisor da área. (2) Inspeções Programadas, realizadas periodicamente ou de modo contínuo. (3) Inspeções especiais e (4) Inspeções Ocasionais ou Intermitentes. O termo " auditoria de segurança" também é utilizado em algumas publicações, conforme podemos observar em Lees (1991, v.1, p.169).

4.2.2 - Listas de verificação

Uma Lista de Verificação (LV) ou C*hecklist* tem por objetivo identificar os perigos de um empreendimento ou atividade em andamento através de uma avaliação padrão (ARAÚJO E LIMA, 199-, p.2-1). A figura 4.3 mostra um formulário típico segundo Zocchio (1992, p.10).

A Lista de Verificação utiliza uma lista de itens escrita ou passos segundo um procedimento para verificar o estado de um sistema (CCPS-AIChE ,1992, p.54).

As Listas de Verificação são usadas para confrontar se um processo, sistema ou equipamento está de acordo com normas e procedimentos, sendo útil para identificar a necessidade de informações mais detalhadas ou situações de risco que devam ser melhor avaliadas. São formadas por perguntas sobre o equipamento, sistema ou área de processo visando detectar anormalidades existentes, não cumprimentos de tarefas ou riscos potenciais para a planta, pessoas ou meio ambiente. Podem ser aplicadas facilmente em qualquer fase ou estágio da vida útil do processo, sistema ou equipamento e na etapa de projeto pode apontar deficiências.

CHECK-LIST PARA INSPEÇÃO GERAL DE SEGURANÇA (exemplo)	
Setor inspecionado:	Data:
Itens a serem inspecionados	**Ok* ou irregularidade observada**
Arrumação	
Limpeza	
Máquinas	
Outros equipamentos	
Móveis	
Instalações elétricas	
Faixas e corredores	
Equip. de ventilação	
Ferramentas manuais	
Outros utensílios	
Sinalizações	
Estoque de materiais	
Equip. combate incêndio	
Outros equip. emergência	
Atos inseguros	
EPI: inclusive uso	

Observações: *Anote na coluna a direita um "ok" se tudo estiver bem com o item verificado, ou descreva resumidamente a irregularidade que observou.*

Fig. 4.3 - Formulário típico de *checklist*.
Fonte: Zocchio (1992, p. 10)

4.2.3 - Priorização relativa

Segundo o CCPS-AIChE (1992, p.56), Priorização Relativa (*Relative Ranking*) é mais uma estratégia do que propriamente um método de análise. Permite a comparação de atributos de diversos processos ou atividades para determinar se eles possuem características de risco que sejam significativos que justifiquem estudos adicionais.

Trata-se de uma ferramenta para comparar diferentes processos, sistemas ou alternativas de projetos e obter aquele considerado de menor risco. A escolha ou priorização das alternativas é baseda em índices ou indicadores que refletem o nível de risco de cada

alternativa de projeto, processo ou sistema. Estes indicadores podem ser calculados de diversas maneiras e níveis de complexidades, o que resultará para o método da priorização maior ou menor grau de sofisticação dependendo da necessidade da aplicação.

Exemplos de índices citados por CCPS-AIChE (1992, p.57) e Lees (1991, v.1 , p.151) são: " *Dow Fire and Explosion Index* (*F&EI*)", "*ICI Mond Index*" e o " *Substance Hazard Index* (*SHI*)". Além dos índices mais conhecidos, as empresas costumam criar seus próprios indicadores para priorizar ou aferir os riscos envolvidos nos seus processos.

4.2.4 - Análise preliminar de perigos ou riscos - APP ou APR

A Análise Preliminar de Perigos ou Análise Preliminar de Riscos (*Preliminary Hazard Analysis*) é uma técnica geralmente usada para avaliar a existência de perigos em um estágio inicial de um processo ou atividade. Indicada para uso na fase de P&D e projeto conceitual ou antes de uma modificação ou expansão de uma planta de processo ou sistema, quando existem poucas informações detalhadas no projeto. Também é apropriada para selecionar e estabelecer decisões sobre riscos existentes.

É uma técnica qualitativa de análise bem estruturada que fornece uma categorização dos riscos envolvidos em uma processo ou atividade nele desempenhada. A categorização do risco é geralmente feita através de uma matriz, resultado da severidade do evento (colunas) e da probabilidade de sua ocorrência (linhas). Por exemplo, Araújo e Lima (199-, p. 4-8), apresenta as categorias de freqüências divididas em : (A) Extremamente remota, (B) Remota, (C) Improvável, (D) Provável e (E) Frequente, e as categorias de severidade das conseqüências divididas em: (I) Desprezível, (II) Marginal, (III) Crítica e (IV) Catastrófica. Como resultado, o grau de risco é classificado e disposto na matriz em : (1) Desprezível, (2) Menor, (3) Moderado, (4) Sério e (5) Crítico. Estas denominações variam entre autores, porém sempre mantendo-se a divisão em categorias nas duas variáveis, formando a chamada matriz de risco.

A APR pode ser utilizada para realizar uma comparação entre diversas situações de risco e priorização de ações mitigadoras. É uma técnica precursora, que estabelece critérios básicos de seleção para aquelas atividades que serão objeto de análises quantitativas mais rigorosas.

A figura 4.4 apresenta o formato de um formulário típico para elaboração de uma APR e a figura 4.5 apresenta um exemplo de matriz de risco, onde a graduação de risco é mostrada como: (1)-Desprezível, (2)-Menor, (3)-Moderado, (4)-Sério e (5)-Crítico. Para cada situação

de risco identificada, as causas, os efeitos e as medidas mitigadoras corretivas e/ou preventivas são listadas no formulário.

Análise Preliminar de Perigos (APP)								
Companhia:			**Módulo de Análise:**				**Referência:**	
Perigo	**Causa**	**Modo de Detecção**	**Efeito**	**Freq.**	**Sev.**	**Cat. Risco**	**Sugestões/ Observações**	**Cenário**

Fig. 4.4 - Formulário típico para elaboração de uma APR.
Fonte: DNV (2003, p.3)

		Freqüência				
		A	B	C	D	E
Conseqüênc.	IV	2	3	4	5	5
	III	1	2	3	4	5
	II	1	1	2	3	4
	I	1	1	1	2	3

Fig. 4.5 - Matriz típica para avaliação qualitativa de risco.
Fonte: Melo et al. (2002, p.5)

4.2.5 - Análise *What-if*

Análise What-if (*What-if Analysis*) é uma técnica não estruturada que baseia-se nas respostas obtidas para uma seqüência de perguntas do tipo " *O que* acontece *se*.... ? ", elaboradas por um grupo de pessoas que detenham boa experiência e conhecimento do processo ou sistema. Existem poucas publicações a respeito, mas é muito utilizada na indústria (CCPS-AIChE, 1992 p.60).

Sua aplicação tem como resultado uma lista de situações perigosas, suas conseqüências e medidas mitigadoras.

4.2.6 - ANÁLISE *What-if* / LV

Trata-se de uma combinação dos métodos "*What-if*" e Lista de Verificação, com aproveitamento das vantagens de cada uma delas de modo a compensar as deficiências individuais. A melhor estruturação das Listas de Verificação alia-se a criatividade, experiência e conhecimento da equipe presentes no *What-if* . É uma técnica qualitativa e precursora para análises mais detalhadas. Os resultados são mais completos que aqueles apresentados quando as técnicas são usadas individualmente. (CCPS-AICh, 1992, p.62)

4.2.7 - Análise de perigos e operabilidade - HAZOP

A Análise de Operabilidade e Perigos (*Hazard and Operability Analysis*) foi desenvolvida para identificar e avaliar perigos em plantas de processo e também para idenificar problemas operacionais que apesar de não perigosos, comprometem a confiabilidade desejada (CCPS-AICh, 1992, p.64). Adequada para uso tanto na fase de projeto como na fase operacional de um processo, a técnica utiliza a combinação sistemática de palavras-guia que são aplicadas sobre determinados pontos específicos do processo. A combinação é acrescida de parâmetros do processo, resultando na identificação de desvios na operação da planta. A figura 4.6 mostra uma tabela com a combinação citada.

4.2.8 - Análise de modos e efeitos de falhas - FMEA

A análise de modos e efeitos de falhas, cuja sigla difundida FMEA é originada do termo em inglês "Failure Modes and Effects Analysis", relaciona os modos de falhas de equipamentos e seus componentes, os efeitos provocados sobre o sistema.

É uma técnica qualitativa, sistematizada e voltada para o aumento da confiabilidade através da identificação de modos de falha de equipamentos individualmente e os efeitos sobre o sistema, e indiretamente para a melhoria da segurança do processo, podendo ser usada na análise de risco. A FMEA também é utilizada na metodologia da MCC e seus resultados usualmente são agrupados em forma de tabelas como mostrado na figura 4.7.

Embora na FMEA possam ser identificados quais os modos de falha que resultam ou contribuem para ocorrência de acidentes, "a técnica não é eficiente para identificar uma lista extensa de combinações de falhas de equipamentos que resultem em acidentes". (CCPS-AIChE, 1992, p.66).

PALAVRA-GUIA	+	PARÂMETRO	=	DESVIO
Nenhum		**Fluxo**		**Nenhum fluxo**
Menos		**Fluxo**		**Menos fluxo**
Mais		**Fluxo**		**Mais fluxo**
Reverso		**Fluxo**		**Fluxo reverso**
Também		**Fluxo**		**Contaminação**
Menos		**Pressão**		**Pressão baixa**
Mais		**Pressão**		**Pressão alta**
Menos		**Temperatura**		**Temperatura baixa**
Mais		**Temperatura**		**Temperatura alta**
Menos		**Nível**		**Nível baixo**
Mais		**Nível**		**Nível alto**
Menos		**Viscosidade**		**Viscosidade baixa**
Mais		**Viscosidade**		**Viscosidade alta**
Nenhum		**Reação**		**Nenhuma reação**
Menos		**Reação**		**Menos reação**
Mais		**Reação**		**Mais reação**
Reverso		**Reação**		**Reação reversa**
Também		**Reação**		**Reação secundária**

Fig. 4.6 - Exemplo de lista de desvios para HAZOP.
Fonte: Araújo e Lima (199-, p.5-10)

FMEA							
Sub-sistema:	Referência:		Preparado por:		Data:		
Componentes	Modo de Falha	Efeitos sobre outros componentes	Efeitos sobre o sistema	Categoria de Freq.	Categoria de Sev.	Métodos de Detecção	Recomendações

Fig. 4.7 - Planilha típica para elaboração da FMEA.
Fonte: Araújo e Lima (199-, p.6-10)

Segundo Araújo e Lima (199-, p.6-2) , apesar de ser uma técnica essencialmente qualitativa, uma extensão da FMEA, denominada Análise de Modo, Efeito e Criticalidade das Falhas (*Failure Modes Effects and Criticality Analysis* - FMECA), pode fornecer também estimativas para as freqüências de ocorrência dos modos de falhas e para o grau de severidade dos seus efeitos. Esta ressalva também é mencionada pelo CCPS- AIChE (1992, p.151).

4.2.9 - Análise por árvore de eventos - AE

Algumas vezes chamada de árvore de causas (MELO et al., 2002, p.3). A *Event Tree Analysis* é um método lógico indutivo para identificação gráfica de possíveis conseqüências de um acidente a partir de "evento inicializador" que pode ser a falha de um equipamento ou um erro humano.

A ocorrência do evento inicial, poderá ou não evoluir para um acidente, dependendo da resposta (falha ou sucesso) e existência de sistemas de segurança, ações dos operadores e dos procedimentos de emergência. Estes são considerados elementos que visam evitar a propagação do acidente. As possibilidades de sucesso ou falha de cada evento são representadas em forma de ramos que em seqüência formarão a árvore de eventos.

Como resultado (qualitativo ou quantitativo) o método mostra seqüências de acidentes possíveis de ocorrer para o evento inicializador estudado, o que é mais adequado para processos complexos, de acordo com o CCPS-AIChE (1992, p.69). A figura 4.8 mostra um diagrama de árvore de eventos para um caso de "perda de conexão com a rede elétrica".

4.2.10 - Análise por árvore de falhas - AF

A *Fault Tree Analysis* é a técnica que permite determinar, através de um processo dedutivo, as causas de um evento indesejado chamado de "evento topo". Seus resultados podem ser direcionados para a confiabilidade de equipamentos e para a segurança do processo. Utiliza uma estrutura lógica em forma de ramificações com símbolos de álgebra Booleana (E, OU, ...). É útil na descrição de uma combinação de falhas de um sistema ou erros humanos que contribuam para a ocorrência do evento topo. Os eventos básicos formados pelas combinações de falhas de equipamentos e de falhas humanas, suficientes para resultar no evento topo, são denominadas de "cortes mínimos".

Frequentemente é aplicada após uma primeira técnica utilizada apontar a necessidade de uma análise mais detalhada (Ex: HAZOP, FMEA), pois a árvore de falhas pode fornecer

resultados quantitativos através das probabilidades e freqüências de ocorrência do evento topo e de cada um dos cortes mínimos da árvore.

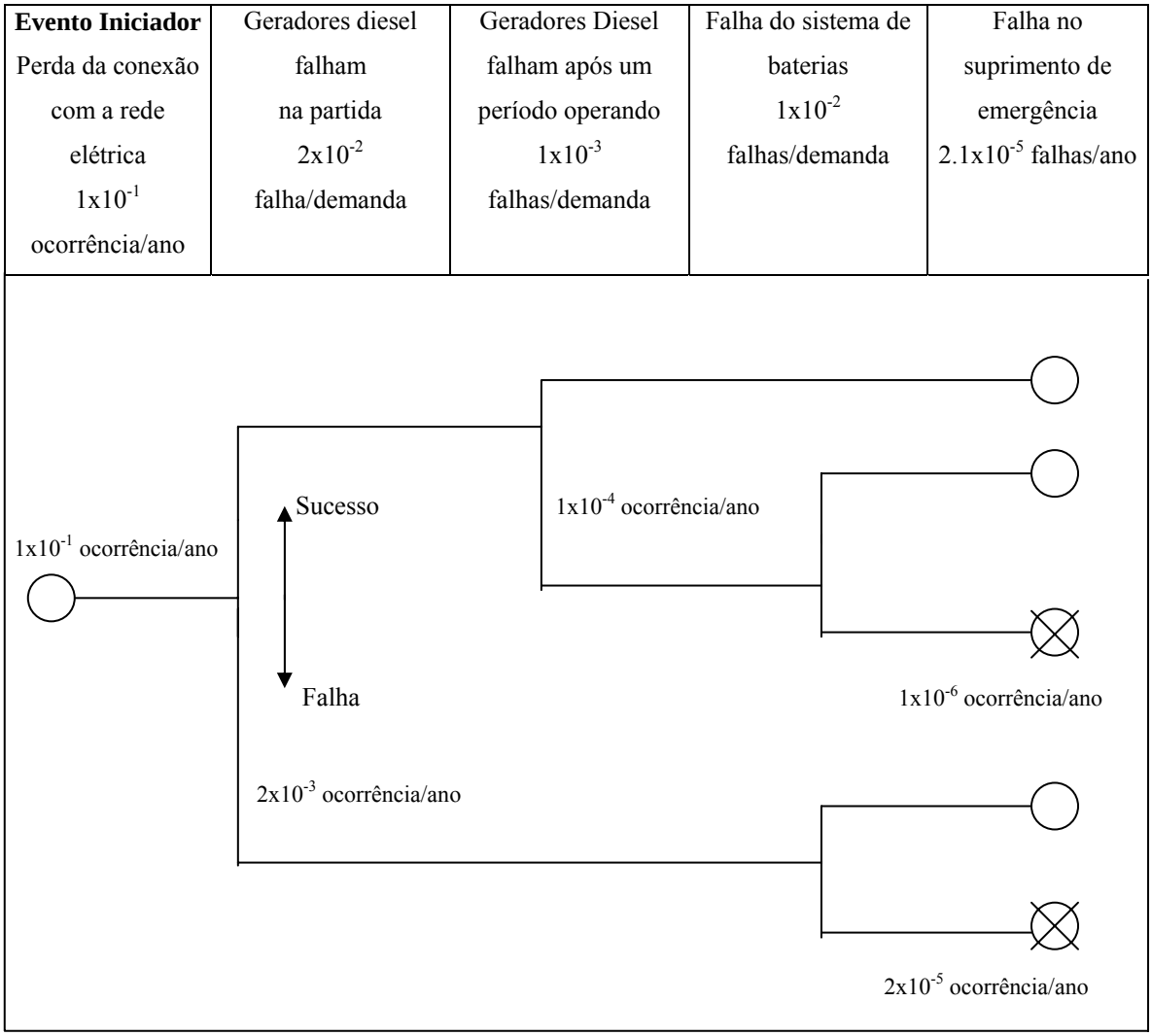


Fig. 4.8 - Exemplo de diagrama de árvore de eventos.
Fonte: Lees (1991, p.193)

A figura 4.9 mostra um diagrama de uma árvore de falhas para o evento topo "Incêndio em casa sem alarme ".

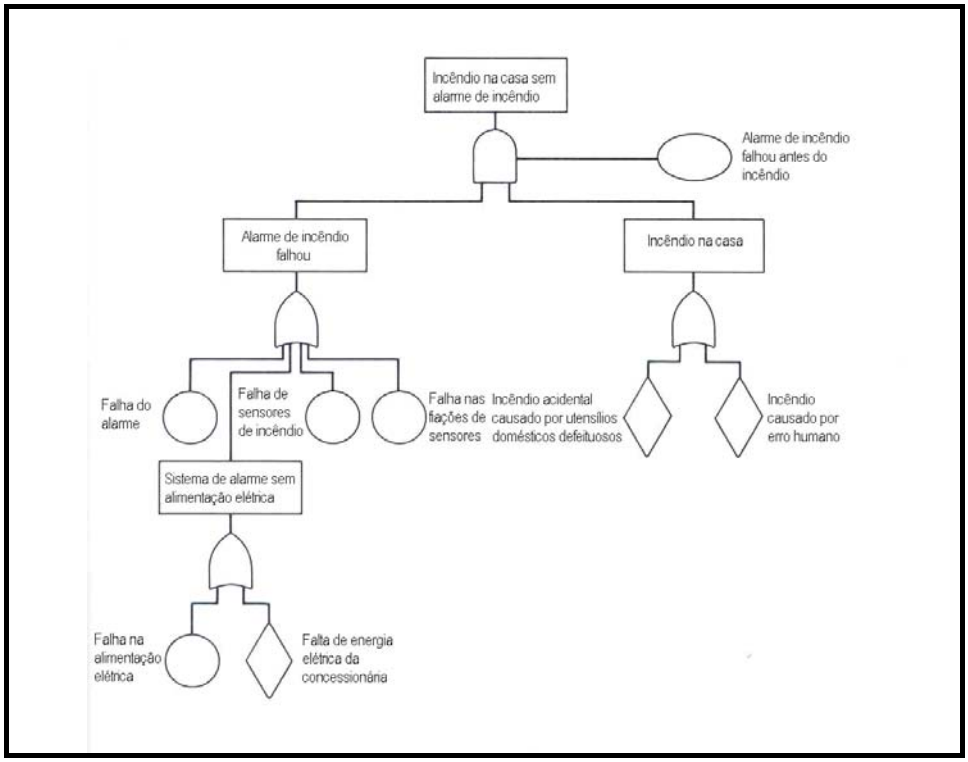


Fig. 4.9 - Exemplo de diagrama de árvore de falhas.
Fonte: Dhillon (1982, p.173)

4.2.11 - Análise de causa e conseqüência - AC

Segundo o CCPS-AIChE (1992, p. 70), "Análise de Causa e Conseqüência (C*ause-Consequence Analysis*) é uma combinação das análises por árvore de falhas e árvore de eventos".

Os resultados alcançados são qualitativos, relacionando acidentes em potencial. Entretanto, é considerado uma boa ferramenta de comunicação pela forma como o diagrama de causa e conseqüência apresenta informações.

Pelas limitações do método, sua indicação é para uso em sistemas ou processos onde a lógica de falhas nos acidentes é simples. A figura 4.10 mostra um exemplo de análise de causa e conseqüência para o evento "perda de água de refrigeração para um reator de oxidação", cuja árvore de falha também está representada.

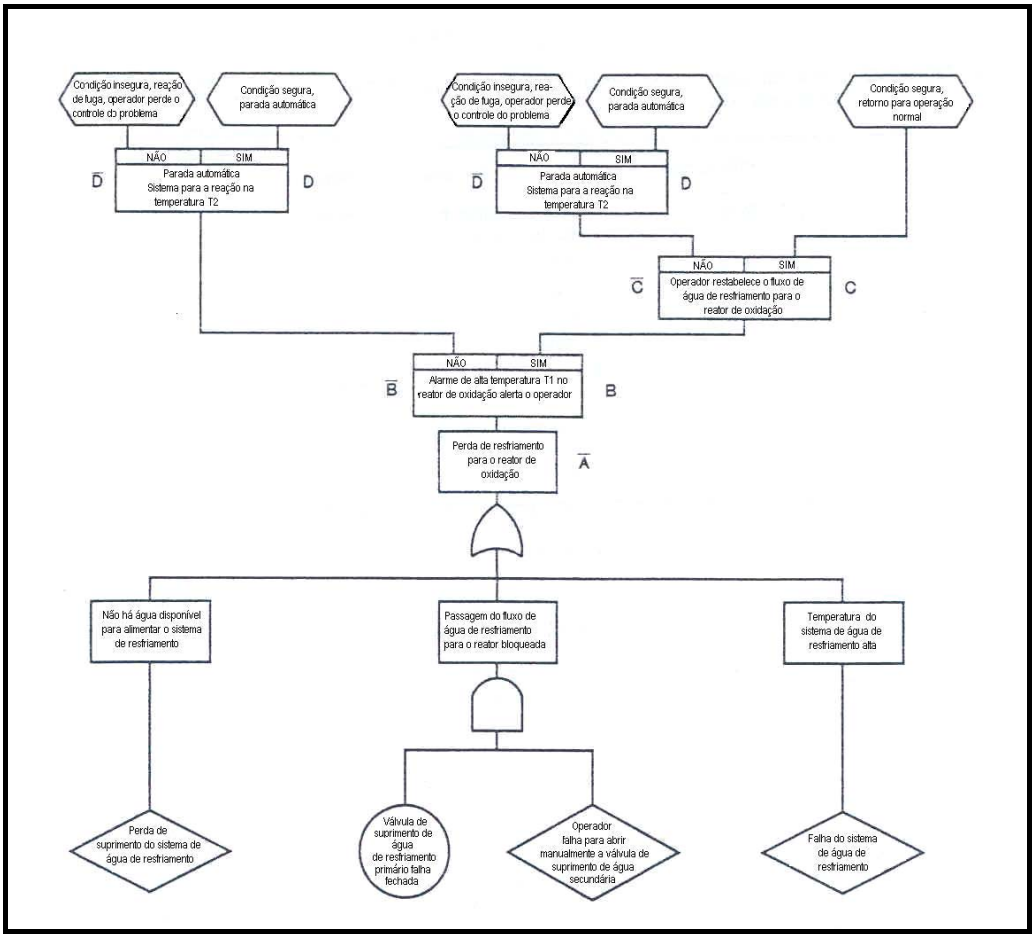


Fig. 4.10 - Exemplo de diagrama de causa e conseqüência.
Fonte: CCPS-AIChE (1992, p. 187)

4.2.12 - Análise da confiabilidade humana

Human Reliability Analysis é uma técnica de avaliação sistemática da influência do comportamento de pessoas e dos fatores internos (estresse, estado emocional, treinamento, experiência,...) e externos (hora extra, ambiente, supervisão, procedimentos, interface homem-máquina,...) que afetam este comportamento. O CCPS-AIChE (1992, p.189) denomina estes fatores de "performance shaping factors (PSFs)", o que está de acordo com Dhillon (1982, p.69) quando diz que "os *links* humanos interligam inúmeros sistemas". Cerca de 10 à 15% do total de falhas de equipamentos são diretamente causados por erros humanos, segundo Hagen (1976) citado por Dhillon (1982, p.69)

É útil na avaliação de performance de operadores, pessoal de manutenção e demais pessoas envolvidas no processo, levando em conta habilidades, conhecimento, influência do ambiente e das condições psicológicas durante a execução de tarefas ou diante de um acidente, identificando erros humanos potenciais e seus efeitos. Outros resultados podem ser

obtidos em relação a arranjos de ambientes, posições ergonômicas, procedimentos e inadequação de tarefas.

A análise da confiabilidade humana é uma técnica complementar geralmente usada em conjunto com outras técnicas, com possibilidade de fornecer resultados quantitativos.

4.2.13 - Análise histórica - AH

A Análise Histórica abrange a pesquisa de informações sobre uma determinada substância em instalações similares à que está sendo analisada e os seus efeitos provocados em acidentes ocorridos no passado envolvendo vazamentos, incêndios, explosões ou formação de nuvem tóxica.(ARAÚJO E LIMA, 199-, p.3-1)

As causas e as conseqüências dos acidentes em instalações similares são estudadas para verificar que ações podem ser tomadas na instalação, auxiliando na idenificação de perigos existentes e eventos iniciadores de acidentes. Envolve a consulta de bancos de dados de acidentes e outras fontes de referência sobre o assunto, não é uma técnica sistematizada e oferece resultados de natureza estatística.

4.2.14 - Análise de vulnerabilidade - AV

A Análise de Vulnerabilidade visa estimar e modelar a região que pode ser atingida pelos efeitos danosos causados por liberações acidentais de substâncias perigosas. É um método que apresenta resultados quantitativos, podendo ser utilizado após uma primeira identificação e priorização de riscos e cenários por uma técnica qualitativa. A análise de vulnerabilidade envolve quatro etapas: (1) caracterização do cenário do acidente, (2) determinação do termo fonte, (3) avaliação dos efeitos físicos e (4) cálculo das áreas vulneráveis.

Lees (1991, v.1, p.205) define um "modelo de vulnerabilidade" como sendo um sistema de modelos matemáticos que podem ser usados para investigar diferentes cenários para aqueles perigos maiores.

Alguns modelos de vulnerabilidade conhecidos são: o modelo de Eisenberg et al. (1975) citado por Lees (1991, v.1, p. 206) e Araújo e Lima(199-, p.9-9) e modelos de Raj e Kalelkar (1974) citados por Lees (1991, v.1, p. 206)

4.2.15 - Análise de custo-benefício - ACB

Trata-se de uma ferramenta de apoio para tomada de decisões quanto a prevenção de riscos que considera os custos econômicos envolvidos na falta de segurança em uma atividade, processo ou sistema. Baseia-se no argumento que a melhoria da segurança e da saúde no local de trabalho pode trazer vantagens econômicas para as empresas, pois acidentes de trabalho e as doenças profissionais têm custos elevados e conseqüências financeiras significativas. A informação e conhecimento dos efeitos financeiros, ajudam a tomada de decisões em adotar medidas preventivas e mitigadoras ou priorizar investimentos entre alternativas diferentes.

Confome a Agência Europeia para a Segurança e a Saúde no Trabalho (2002, p.2), duas avaliações podem ser realizadas: (1) uma avaliação econômica ou financeira dos custos totais envolvidos nos acidentes, lesões e doenças ocupacionais e, (2) uma análise da relação custo/benefício das actividades preventivas para evitá-los. A primeira envolve avaliações dos custos de um dado acidente ou da totalidade dos acidentes ocorridos num determinado período de tempo. Normalmente, trata-se, neste caso, de uma avaliação posterior ao evento. A segunda é uma avaliação dos efeitos econômicos de medidas preventivas ou da prevenção de acidentes, normalmente, usada para avaliar a viabilidade de um investimento ou selecionar entre várias alternativas.

4.2.16 - Análise de causa-raiz de falha

Traduzido de *Root Cause Failure Analysis* (RCFA). Segundo Pinto e Xavier (2001, p. 118) trata-se de um método de análise de falhas costumeiramente usado para equipamentos críticos ou mais importantes, mas que vem sendo cada vez mais adotado para aqueles problemas repetitivos ou crônicos. O método de análise pode ser usado para falhas já ocorridas e para investigação de acidentes, sendo baseada no sucessivo questionamento (Por que ?) a cada etapa de análise. A análise inicia com a pergunta "Por que o equipamento falhou ?" e a cada resposta nova pergunta é dirigida para a causa apresentada, seguindo este procedimento até que a questão não faça mais sentido. As causas raízes encontradas muitas vezes são relacionadas a treinamento de pessoal, falha de supervisão ou gerenciamento, fatores externos a atividade humana, falta de coordenação de tarefas, etc.

4.2.17 - Análise quantitativa de riscos - AQR

Em situações específicas, análises qualitativas não fornecem informação suficiente para se tomar decisões em relação ao risco de uma atividade, processo ou sistema. Comparação entre riscos relativos e benefícios de soluções competidoras são exemplos onde ocasionalmente a análise quantitativa é necessária. Técnicas de análise quantitativa de riscos (AQR) permitem alcançar níveis de detalhes adequados para determinados tipos de estudos, permitindo informações mais precisas para se tomar uma decisão gerencial baseada em riscos. King e Magid (1979, p.194) observam que " Análises quantitativas determinam a probablidade de certas conseqüências que resultam dos perigos presentes ".

Farquharson e McDuffee (2003, p. 170), mostram que há diferentes níveis de detalhes, isto é fases, para aspectos de freqüência e conseqüência de risco e propõem uma técnica para execução de AQRs em fases ou níveis (4 para avaliação da freqüência e 3 para avaliação de conseqüência) com o objetivo de prover informações para decisões baseadas em risco. Nesta abordagem por fases o uso de árvores de eventos e matrizes de riscos são enfatizados para execução de um conjunto de avaliações de risco em seqüência. Farquharson e McDuffee (2003, p.171) ressaltam que o uso de AQRs para subsidiar decisões baseadas em risco não será excessivamente complexo (e caro) se estas análises forem rapidamente direcionadas sobre a decisão que precisa ser tomada.

4.3 - CONFIABILIDADE E SEGURANÇA:

Confiabilidade, segundo King e Magid (1979, p.197), " é a probabilidade de que parte de um equipamento ou componente desempenhe uma função como pretendido por um dado período de tempo em um determinado ambiente", definição que também é citada por Lees (1991, v.1, p.80) com pequena diferença : " a probabilidade que um item desempenhe uma função requerida sob certas condições por um determinado período de tempo".

Segurança, *Safety* em inglês, é definida como a ausência das condições que podem causar danos ou perdas de equipamentos, ou danos ou morte de seres humanos. Apesar da questão da agressão ao meio ambiente não estar explícita nesta definição, ela contém os elementos necessários ao propósito de evidenciarmos um elo entre segurança e confiabilidade.

A definição de confiabilidade contém uma estreita relação com a segurança de uma instalação, na medida em que o mau ou não desempenho da função requerida resulte em conseqüências que possam causar danos ou morte de pessoas, ou violação de alguma

legislação ambiental, seja ela corporativa, regional, nacional ou internacional. Isto fica bem claro nos comentários de Billington e Allan (1992, p.2) sobre diversos acidentes históricos " ...em que falhas resultaram em severas conseqüências sociais e ambientais e muitas mortes". E continuam, se referindo aos riscos envolvidos: " técnicas de análise de confiabilidade podem atender no objetivo de avaliação destes riscos probabilísticos e ajudar em contabilizá-los, não somente pela severidade, mas também pela freqüência.". Moubray (1992, p.64) também observa que a avaliação destas conseqüências não deve se referir apenas aos funcionários da empresa, mas também abranger aos clientes e comunidade como um todo.

De modo mais abrangente, Dhillon (1982, p.160) mostra a relação que deve existir entre as disciplinas que contribuem para a efetividade de um sistema. São elas: confiabilidade, sistema de segurança, engenharia do valor, fatores humanos, manutenibilidade, logística e garantia da qualidade.

Algumas das técnicas apresentadas na seção 4.2 são utilizadas para estudos de confiabilidade de sistemas e equipamentos. Árvore de falhas, FMEA e confiabilidade humana são abordadas por O' Connor; Newton e Brombley (1998, p.157-169). Billinton e Allan (1992, p.120-154), descrevem sobre o uso de árvore de falhas e árvore de eventos na avaliação da confiabilidade de sistemas complexos, o que também é mostrado por Dhillon (1982, p.81-89) quando se refere à árvore de falhas.

Tratando-se do processo da manutenção centrada em confiabilidade, a técnica da FMEA é utilizada para relacionar os modos de falhas e efeitos dos componentes do sistema selecionados, o que é mais uma evidência do elo existente entre a confiabilidade e a segurança de um processo ou sistema. Moubray (1992, p. 18) cita que um dos benefícios do uso da MCC pelas organizações é a maior proteção da segurança e meio ambiente. Segundo Moubray, " a MCC considera as implicações de segurança e meio ambiente de todos os modos de falha antes de considerar os seus efeitos sobre a operação". A inclusão deste procedimento na metodologia da MCC procura minimizar todos os perigos para a segurança e meio ambiente relacionados aos equipamentos. Um interessante aspecto mostrado por Hauge e Johnston (2001, p.39) é que as estratégias de manutenção (preditiva, preventiva e busca de falhas) têm como objetivo reduzir a probabilidade de ocorrência de um risco. Estas estratégias de manutenção não afetam a severidade do modo de falha. Apenas o reprojeto do equipamento ou sistema pode reduzir a severidade de um modo de falha. Estas observações mostram não só a importância da escolha da estratégia de manutenção correta para a confiabilidade, como também sua relação com o resultado desejado na ação mitigadora da análise de risco.

5- PROPOSTA DE MELHORIA NA METODOLOGIA DA MCC

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Apesar de reconhecidamente vantajosa quanto sua aplicação, têm sido identificados, por diversos autores, pontos de melhorias na sistemática da MCC conforme citado por Ferreira; Lima e Raposo (2003, p.1).

D'Addio; Firpo e Savio (1998, p.211), mostram a necessidade da MCC ser apoiada através de modelos probabilísticos na definição das estratégias de manutenção.

Hauge e Johnston (2001, p.36) e Hauge (2002, p.14), relacionam alguns pontos falhos da MCC quando aplicados no programa espacial americano, especialmente no tratamento dos riscos de segurança envolvidos em atividades de manutenção. Os autores apontam a existência de um vazio entre a MCC e a análise de riscos. Os mesmos autores também identificam a falta de uma lógica detalhada para determinação do intervalo apropriado para realizar cada tarefa de manutenção escolhida, ficando o mesmo dependente da experiência do analista. Nisto, também concordam Endrenyi et al. (2000, v.16 p.638-639) quando citam que "A implementação da MCC representou um passo significativo na direção de tirar o máximo do equipamento instalado. Entretanto, a abordagem é ainda heurística, e sua aplicação requer experiência e julgamento em cada rodada". Endrenyi et al. complementam, "a MCC é quase sempre empírica e baseada não somente em monitoração de condição, mas sobre a análise de modos de falha e efeitos e uma investigação de necessidades e prioridades operacionais".

Johnston (2001, p.235); (2002a, p.511) e (2002b, p.369), menciona as incertezas envolvidas durante o uso da MCC, a necessidade de comparar a eficiência relativa de cada tática de manutenção possível, a falta de desenvolvimento do conhecimento dos especialistas envolvidos na sistemática e possibilidade de erros decorrentes da adoção de premissas falsas no início de um trabalho de MCC.

De acordo com Hauge e Johnston (2001, p.36), o primeiro problema envolvido na MCC tradicional é o tratamento da segurança. Este assunto não pode ser tratado como uma simples questão "sim" ou "não" em relação ao impacto do modo de falha na segurança. O uso de uma técnica de Análise de Risco pode trazer maior consistência na metodologia da MCC no que tange ao tratamento dos riscos de segurança impostos pelo efeito de uma determinada falha, por exemplo, identificando os perigos associados com a parada de um equipamento da planta.

Desta forma justificam-se estudos para introdução de melhorias na metodologia da MCC, sendo que a proposta apresentada neste trabalho é uma contribuição ao método através da implementação de Lista de Verificação e Análise Preliminar de Riscos, estabelecendo um elo com o diagrama de decisão da metodologia. Este capítulo, mostra a formatação de uma ferramenta que será incluida na sistemática tradicional da MCC, de modo a reduzir sua dependência de julgamentos subjetivos do especialista na etapa de classificação dos modos de falha no Diagrama de Decisão, criando mecanismos que auxiliem a definição da existência de impacto na segurança industrial ou meio ambiente.

5.2- ANÁLISE DE RISCO NA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

5.2.1- Segurança e meio ambiente na MCC.

Moubray (2000, p.93) ressalta que a metodologia da manutenção centrada em confiabilidade assegura que segurança e implicações ambientais de cada modo de falha são considerados. Os diagramas de decisão mostrados no capítulo 3 contêm nas suas seqüências a questão que envolve as falhas com implicações na segurança e meio ambiente. As falhas evidentes cujas conseqüências afetem a segurança e o meio ambiente são tratadas na etapa de elaboração da FMEA, de modo a colocá-las em grau de importância maior que as falhas que tenham conseqüências operacionais.

As exigências cada vez maiores da sociedade, requerem ações preventivas eficazes para evitar a ocorrência de acidentes e danos ambientais. A segurança envolve o trabalhador no local de trabalho e também o bem-estar da comunidade vizinha, dos clientes e dos fornecedores. O compromisso com a questão ambiental vem se tornando um pré-requisito para sobrevivência das empresas.

Moubray (2000, p.95) define que um modo de falha tem: (1) conseqüências na segurança, se causar uma perda da função ou um outro dano que poderia ferir ou matar alguém. E (2) conseqüências ambientais se causar uma perda de função ou um outro dano que poderia levar a quebra de um regulamento ou padrão ambiental conhecido. Hauge e Johnston (2001, p.36) concordam com esta linha de raciocínio quando citam que uma questão inicial na lógica de decisão da MCC envolve a segurança: "A falha tem um efeito adverso e direto na segurança?". Da mesma forma, observa-se que na árvore lógica de decisão de Smith (1992, p.90) o tratamento das falhas evidentes que afetam a segurança e meio ambiente vem em primeiro plano.

Apesar da importância atribuída para os modos de falhas que afetam a segurança e meio ambiente, fica evidente nos diagramas apresentados no capítulo 3 que a questão é colocada como "sim ou não". Hauge e Johnston (2001, p.36) ressaltam:

> " Na prática, existem áreas cinzentas entre os extremos "sim" e "não". Também, cada analista da MCC pode responder esta questão diferentemente para a mesma situação, já que não é oferecido um padrão para quantificar o risco de segurança. A simples e bem intencionada questão de segurança tem o significativo potencial para erro. A intenção da questão é evitar análises desnecessárias em situações onde não existe risco de segurança. Encorajando os analistas a responder a questão conservativamente, evitaria-se a área cinzenta mencionada anteriormente, mas também levaria para análises desnecessárias. Quanto mais precisa a resposta para esta questão, mais otimizada e eficiente será a análise e os resultados."

De forma a contornar situações como as descritas por Hauge e Johnston, será apresentada a seguir a proposta de uma sistemática para incorporar uma análise de risco na MCC, visando reduzir ou eliminar o potencial de erro na avaliação da questão de segurança e meio ambiente nas conseqüências do modo de falha.

5.2.2 - Metodologia para avaliação qualitativa de risco

Hauge e Johnston (2001, p. 37) lembram que risco é o produto entre a severidade da falha e a probabilidade de ocorrência desta falha, o que foi explorado no capítulo 4. O objetivo da análise de risco nesta abordagem é avaliar como os modos de falha de cada componente da planilha (FMEA) da Manutenção Centrada em Confiabilidade afetam a segurança e o meio ambiente. Para isto, no diagrama de decisão da MCC é necessário responder a seguinte pergunta para cada efeito de um determinado modo de falha:

" O efeito do modo de falha tem alguma influência no Meio Ambiente, Saúde Ocupacional ou Segurança Industrial ? "

Para responder esta pergunta com menor grau de subjetividade propõe-se uma análise qualitativa do risco envolvido, considerando a severidade da conseqüência da falha e a sua probabilidade (freqüência) de ocorrência. Deve-se seguir os passos abaixo:

Passo 1: Aplicar a **Lista de Verificação Preliminar** sobre o efeito provocado pelo modo de falha como mostrado na figura 6.3. A aplicação desta LV não será conclusiva, mas se uma das

respostas dos quesitos for "SIM" significa que para o mesmo deverá ser atribuido atenção diferenciada nos próximos passos. Trata-se de um primeiro levantamento sobre o efeito da falha que está sendo analisado.

Passo 2 : Consultar o **Guia de Avaliação de Risco**, mostrado no Apêndice A, identificando no mesmo (campo SEL) o(s) perigo(s) envolvido(s) com o efeito do modo de falha de acordo com a resposta obtida na aplicação da LV. A figura 6.4 mostra um exemplo do Guia de Avaliação de Risco preenchido.

Passo 3 : Verificar em todos os itens e sub-itens do Guia de Avaliação se não há mais perigos envolvidos com o efeito do modo de falha em análise. Caso seja identificado mais algum perigo provocado pelo efeito do modo de falha, deve ser assinalado no Guia (campo SEL).

Passo 4 : Para cada perigo assinalado em SEL, aplicar um estudo de avaliação do risco envolvido conforme a metodologia a seguir:

5.2.2.1- Avaliação da severidade (IP)

O objetivo é determinar um índice chamado IP (Índice de Perigo). O índice IP é constituído por dois grupos de letras e um algarismo:

- O primeiro grupo de letras representa somente o tipo de conseqüência , ou seja, o modo de falha afeta segurança, saúde ou meio ambiente, procurando apenas qualificar a conseqüência da falha.
- O segundo grupo de letras representa a extensão da conseqüência, ou seja, se os efeitos são internos ou externos aos limites da planta ou unidade industrial.
- O algarismo (Y) representa uma graduação da severidade da conseqüência, ou seja, do menos severo (1) ao mais severo (4), procurando-se quantificar a conseqüência da falha.

Para avaliação do(s) tipo(s) de conseqüência(s) do modo de falha, escolhe-se na tabela 5.1 o primeiro grupo de letras correspondente:

CONSEQÜÊNCIA	LETRA
Atinge a segurança de pessoas	**A**
Atinge a saúde de pessoas	**B**
Atinge o meio ambiente	**C**

Tab. 5.1 - Designação para o tipo de conseqüência

Sobre a conseqüência do tipo A, consideram-se aquelas decorrentes de falhas ou incidentes envolvendo equipamentos, sistemas ou processos que, além de prejuízos econômicos e operacionais, impliquem em possibilidade de dano ou morte de pessoas.

Sobre a conseqüência do tipo B, consideram-se aquelas relacionadas às doenças profissionais, doenças do trabalho ou doenças provenientes de contaminação acidental no trabalho definidas, por exemplo na Lei n° 8.213, de 25 de julho de 1991, Artigos 20 e 21 (ZOCCHIO, 1992, p.38).

Sobre a conseqüência do tipo C, consideram-se aquelas decorrentes de falhas ou incidentes envolvendo equipamentos, sistemas ou processos que, além de prejuízos econômicos e operacionais, impliquem em possibilidade de dano ao meio ambiente, transgressão da legislação, regulação ou padrões ambientais.

Para avaliação da extensão das conseqüências do modo de falha, escolhe-se na tabela 5.2 o segundo grupo de letras correspondente:

CONSEQÜÊNCIA	LETRA
Restrita aos limites da planta ou unidade industrial	**I**
Atinge a comunidade vizinha, consumidores ou ecossistema da região	**E**

Tab. 5.2 - Designação para a extensão da conseqüência

Para avaliação da severidade da(s) conseqüência(s) do modo de falha, escolhe-se na tabela 5.3 o valor de Y correspondente. Alguns fatores de risco podem ser levados em consideração para atribuição deste valor :

(1) - O máximo que pode ocorrer são casos de primeiros socorros ou tratamento médico menor.

(2) - Danos leves ao meio ambiente. Lesões leves em pessoas. Princípio de incêndio debelado com extintor pelo operador. Emissões fugitivas gasosas. Pequeno vazamento contornável. Presença de fumaça no flare de até 15 minutos.

(3) - Lesões de gravidade moderada em pessoas. Danos severos ao meio ambiente ou ocorrência de infração à legislação ambiental. Parada ordenada do sistema ou unidade. Exigência de ações corretivas imediatas para evitar desdobramento para situação de grau de severidade (4). Incêndio a ser combatido com a brigada interna. Explosão de pequena proporção.

(4) - Danos irreparáveis ao meio ambiente. Morte ou lesão grave em pessoas. Doenças graves ou com sequelas para geração futura. Parada desordenada da unidade ou sistema. Incêndio

com necessidade de ajuda externa para combate. Liberação de gás tóxico ou GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Explosão de grandes proporções.

Tomando-se como exemplo a Lei Estadual no. 7.799/2001 - Bahia - Art. 220 e 221, tem-se a definição do que vem a ser uma infração à legislação ambiental : "Toda ação ou omissão, voluntária ou involutária de que resulte risco de poluição ou degradação do meio ambiente, efetiva poluição ou degradação ambiental, emissão, lançamento ou liberação de efluentes líquidos, gasosos ou resíduos sólidos, em desacordo com os padrões estabelecidos, e/ou que tornem ou possam tornar ultrapassados os padrões de qualidade."

Y	Severidade	A	B	C
0	**Nenhuma**	Não há impactos na segurança	Não há impactos na saúde de pessoas	Não há impactos sobre o meio ambiente
1	**Baixa**	Danos em equipamentos insignificantes	Pronto atendimento e primeiros socorros a pessoas	Danos insignificantes ao meio ambiente
2	**Moderada**	Danos leves e controláveis a equipamentos(baixo custo de reparo) Princípio de Incêndio (debelado pelo operador)	Lesões leves em funcionários, terceiros ou moradores vizinhos. Acidentes sem afastamento. Doenças ocupacionais não graves	Danos leves e controláveis ao meio ambiente
3	**Crítica**	Danos severos em equipamentos. Parada de unidade ou sistema. Incêndio restrito (debelado pela brigada interna)	Lesões ou doenças ocupacionais severas em funcionários , terceiros ou moradores vizinhos. Acidentes com afastamento. Probabilidade remota de poucas mortes	Danos severos ao meio ambiente . Requer comunicação ao orgão ambiental
4	**Muito Crítica**	Danos irreparáveis a equipamentos. Parada desordenada de unidade ou sistema. Incêndio de grandes proporções (requer acionar plano de ajuda externa)	Morte, lesões ou doenças ocupacionais de várias pessoas na planta ou na comunidade vizinha	Danos irreparáveis ao meio ambiente

Tab. 5.3 - Avaliação da severidade da(s) conseqüência(s) do modo de falha

Na tabela 5.4 tem-se exemplos de valores para o algarismo (Y) do índice IP:

IMPACTOS A SEGURANÇA/SAÚDE DE PESSOAS	Y
Danos a Consumidores, Comunidade e Funcionários	2, 3 ou 4
Inalação, ingestão ou contato com substância tóxica (aguda ou crônica)	2, 3 ou 4
Carcinogeniticidade	4
Mutageniticidade	4
Teratogenicidade	4
Efeitos psicológicos	3 ou 4
Ergonomia e L.E.R.	2 ou 3
Exposição acima dos limites	3 ou 4
Odores desagradáveis	2
Queimaduras	2, 3 ou 4
Choque mecânico	2, 3 ou 4
Choque elétrico	2, 3 ou 4
Corte superficial em um dos braços	1
Implicações legais (legislação de segurança ou saúde ocupacional)	4
IMPACTOS AO MEIO AMBIENTE	**Y**
Contaminação interna do ar, água ou solo.	3 ou 4
Contaminação externa do ar, água ou solo.	3 ou 4
Danos a animais	2, 3 ou 4
Danos a vegetação	2, 3 ou 4
Implicações legais (legislação ambiental)	3

Tab. 5.4 - Exemplos de valores de Y para conseqüências diversas

A apuração do Índice de Perigo (IP) indicará a conseqüência e a abrangência prevista para um determinado efeito do modo de falha em análise, sem levar em consideração a sua probabilidade de ocorrência o que será avaliado mais a frente. Por exemplo: Se IP = AI1 , o modo de falha afetará a segurança no âmbito interno à planta com conseqüências de baixa severidade. Se IP = BE4, o modo de falha afetará a saúde de pessoas no âmbito externo à planta com conseqüências de severidade muito crítica. Se IP = CI2, o modo de falha afetará o meio ambiente no âmbito interno à planta com conseqüências de severidade moderada.

É possível que um modo de falha tenha, por exemplo, conseqüências críticas internas e externas, afetando meio ambiente, segurança e saúde de pessoas dentro e fora da planta. Neste caso, embora não haja na tabela anterior uma escolha direta para a conseqüência do modo de

falha, a mesma pode ser classificada como IP = ABCE3. A indicação do grau de severidade (3) é que será utilizado para avaliação do risco envolvido.

5.2.2.2- Avaliação da freqüência (F)

Consiste na classificação em categorias de freqüência, as quais fornecem uma indicação qualitativa da freqüência esperada de ocorrência para cada efeito do modo de falha. A categorização da freqüência será baseada na classificação de Araújo e Lima (199-, p.4-8), adotando-se o termo "possível" para a categoria (3) ao invés de "improvável". A tabela 5.5 resume as informações sobre a freqüência de ocorrência dos modos de falha.

CATEGORIA	DENOMINAÇÃO	FAIXA DE FREQÜÊNCIA (/ ANO)	DESCRIÇÃO
1	**Extremamente remota**	$f < 10^{-4}$	Conceitualmente possível, mas extremamente remota de ocorrer durante a vida útil da instalação
2	**Remota**	$10^{-3} < f < 10^{-4}$	Não é esperado que ocorra durante toda a vida útil
3	**Possível**	$10^{-2} < f < 10^{-3}$	É pouco provável que ocorra durante toda a vida útil
4	**Provável**	$10^{-1} < f < 10^{-2}$	É esperado que ocorra até 1 vez durante a vida útil
5	**Muito provável**	$f > 10^{-1}$	É esperado que ocorra várias vezes durante a vida útil

Tab. 5.5 - Categorias de freqüência de risco.
Fonte:Araújo e Lima (199-, p.4-8)

Um critério usado para diferenciar a freqüência "Possível" de "Remota" é a característica da falha como descrito por Barreiro (1999, p.44): se a ocorrência depende de uma única falha humana ou de equipamento, a freqüência será considerada "Possível". Se a ocorrência depende de múltiplas falhas no sistema, humanas ou de equipamento, a freqüência será considerada "Remota".

Na tabela 5.5 observa-se, conforme Araújo e Lima (199-, p.4-8) e Barreiro (1999, p.44), que as categorias possuem diferentes faixas de freqüência (/ ano):

(1) $f < 10^{-4}$ (2) $10^{-3} < f < 10^{-4}$ (3) $10^{-2} < f < 10^{-3}$ (4) $10^{-1} < f < 10^{-2}$ (5) $f > 10^{-1}$

A KBC (2004) utiliza as faixas de freqüência divididas por valores de probabilidade: (1) < 0.1%, (2) 0.1% - 1%, (3) 1% - 10%, (4) 10% - 80% e (5) 80% - 100%. Os valores de probabilidade são considerados dentro de um intervalo de tempo de avaliação, tipicamente 1 dia a 10 anos.

Com os valores de IP e F conhecidos utiliza-se uma matriz de avaliação de risco para estimar o grau de risco envolvido no modo de falha analisado.

5.2.2.3- Matriz de risco

Na matriz de risco será possível obter uma indicação do grau de risco envolvido no efeito provocado pelo modo de falha da metodologia da MCC. Modelos de matrizes de risco são apresentadas, por exemplo, no CCPS-AIChE (1992, p.209), em Araújo e Lima (199-, p.4-10), em DNV (2003, p. 13), em Barreiro (1999, p.44), Hauge e Johnston (2001, p.37) e Melo et al. (2002, p.5). Os modelos encontrados nas referências citadas possuem variações no número de colunas ou linhas e também nas denominações atribuídas para cada nível de probabilidade e de severidade, mas todos resultam em uma graduação de risco que permite adotar as medidas mitigadoras necessárias para sua eliminação ou redução.

Propõe-se a utilização da matriz de risco com 5 linhas e 4 colunas, resultando em 5 graus de risco diferentes, conforme mostrado na tabela 5.6.

Freqüência **- F**					
	5	**III**	**II**	**I**	**I**
	4	**IV**	**III**	**II**	**I**
	3	**V**	**IV**	**III**	**II**
	2	**V**	**V**	**IV**	**III**
	1	**V**	**V**	**V**	**IV**
		1	2	3	4
		Severidade **- IP (Y)**			

Tab. 5.6 - Matriz para avaliação do grau de risco

Observa-se que na matriz de risco, no eixo horizontal (severidade) somente o algarismo representado por Y é considerado, pois aqui não há sentido em diferenciar se o efeito do modo de falha é sobre a segurança, saúde ou o meio ambiente, mas apenas aferir a severidade do risco envolvido. A matriz é dividida em quatro regiões para indicar o grau do risco envolvido e o tipo de ação requerida para sua redução ou eliminação. Na tabela 5.7 estão resumidas os resultados que podem ser obtidos na matriz, condição e ação recomendada.

Grau de Risco	Categoria	Condição	Ações
I	**CRÍTICO**	Não aceitável	Verificar se existe alguma estratégia ou tarefa de manutenção para evitar a falha ou reduzir o risco para grau III. Caso contrário, deve ser mitigado com projetos e/ou controles administrativos para um risco III ou menos dentro de um horizonte de 6 meses.
II	**SÉRIO**	Indesejável	Verificar se existe alguma estratégia ou tarefa de manutenção para evitar a falha ou reduzir o risco para grau III. Caso contrário, deve ser mitigado com projetos e/ou controles administrativos para um risco III ou menos dentro de um horizonte de 12 meses.
III	**MODERADO**	Aceitável c/ controles	Verificar se existe alguma estratégia ou tarefa de manutenção para evitar a falha. Caso contrário, deve ser verificado que procedimentos ou controles são possíveis no local
IV	**MENOR**	Aceitável c/ avisos	Sinalização e avisos são medidas necessárias. Verificar se alguma estratégia ou tarefa de manutenção para evitar a falha é economicamente viável.
V	**DESPREZÍVEL**	Aceitável	Nenhuma mitigação requerida

Tab. 5.7 - Categoria de risco do modo de falha

Se o Grau de Risco for I, II ou III considera-se que o modo de falha analisado têm implicações no meio ambiente, saúde ou segurança e deve ser submetido aos questionamentos da sistemática da MCC, como sugerido no diagrama de decisão. Neste caso, devem ser relacionadas estratégias ou tarefas de manutenção pró-ativas que atendam aos critérios do quadro acima ou reprojetar o sistema. No caso do grau de risco IV, no relatório do grupo da MCC devem ser incluidas as medidas de sinalização e aviso necessárias para mitigação e a manutenção corretiva é a indicada, a menos que outra estratégia ou tarefa de manutenção seja economicamente justificável. No caso do grau de risco V, a estratégia de manutenção indicada é a corretiva.

Se adotado o diagrama apresentado por Moubray (2000, p.200), já mostrado no capítulo 3, as estratégias de manutenção (ações mitigadoras do risco) indicadas podem ser obtidas como na seqüência mostrada na tabela 5.8, a qual sintetiza o que foi mostrado na 2a. coluna da figura 3.6:

- Uma tarefa para detectar se a falha está ocorrendo ou para ocorrer é tecnicamente viável e vale a pena ser feita?
    - Sim , então programar a tarefa sob condição.
    - Não.
- Uma tarefa de restauração programada para evitar falhas é tecnicamente viável e vale a pena ser feita?
    - Sim, então programar a tarefa de restauração
    - Não,
- Uma tarefa de descarte programado para evitar falhas é tecnicamente viável e vale a pena ser feita?
    - Sim, então programar tarefa de descarte
    - Não,
- Uma combinação de tarefas para evitar falhas é tecnicamente viável e vale a pena ser feita?
    - Sim, então programar as tarefas combinadas.
    - Não,
- Reprojetar o sistema. Ação compulsória tratando-se de uma falha que afeta a segurança, meio ambiente ou saúde.

Tab. 5.8 - Seqüência para seleção de tarefas de manutenção
Fonte: Moubray (2000, p.200)

Conhecidos os valores das variáveis IP, F e RISCO pode-se preenher as colunas correspondentes no **Guia de Avaliação de Risco** e listar as ações recomendadas de acordo com os critérios definidos acima.

Com a sistemática proposta, um modo de falha não afeta a segurança, saúde e o meio-ambiente se uma das condições abaixo for encontrada:

- Índice IP cujo algarismo Y seja menor que 1.
- Índice IP cujo algarismo Y seja maior ou igual a 1, mas o grau de risco for menor (IV) ou desprezível (V).

6 - APLICAÇÃO DA MCC NO SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL DE UMA REFINARIA DE PETRÓLEO

6.1 - BREVE HISTÓRICO DO USO DA MCC EM SISTEMAS ELÉTRICOS.

Aplicações da MCC em sistemas elétricos são mencionadas por Moubray (2000, p.321), especificamente na área de usinas nucleares com projetos pilotos a partir de 1984 patrocinados pelo Electric Power Research Institute (EPRI) em San Diego, EUA. Seguiram-se aplicações na América do Norte, na França e posteriormente em diversos países do mundo. Smith (1993, p.144) cita exemplos de companhias americanas que na década de 80 desenvolveram projetos pilotos de implantação da MCC em plantas de geração de energia elétrica. As contribuições das pesquisas e implantações pilotos realizadas pelo EPRI na Turkey Point Station of Florida Power & Light Co. (1983) e na Duke Power Company´s McGuire nuclear station (1986) mostraram que a metodologia da MCC era uma ferramenta útil para implantação ou revisão do plano de manutenção preventiva de sistemas em plantas nucleares de geração de energia elétrica. Outros exemplos mais recentes de uso da metodologia da MCC em sistemas elétricos são encontrados em trabalhos publicados por:

- Adjaye (1994), aplicação em sistemas elétricos de plataformas de petróleo;
- Beehler (1996), aplicação em sistemas de transmissão;
- Bergman (1999), aplicação em painéis elétricos;
- Hardwick ([199-]), aplicação em concessionária de energia;
- Reder; Flaten (2000), aplicação em sistemas elétricos de distribuição subterrâneos;
- Bertling; Andersson; Allan ([200-]), aplicação em sistemas elétricos de distribuição;
- Goodfellow (2000), aplicação em sistemas elétricos de distribuição aéreos;
- Rajotte; Jolicoeur (2000), aplicação em sistemas de transmissão;
- Nichols; Matusheski (2000), aplicação em subestações e
- Bertling; Eriksson; Allan (2000), aplicação em sistemas elétricos de distribuição.

Nunes (2001) avaliou o impacto da aplicação da MCC na sistemática de manutenção da Central Hidrelétrica de Itaipu, mencionando na p.18 sobre aplicações da MCC na área de subestações de Furnas Centrais Elétricas, geração hidráulica e linhas de transmissão da Companhia Paranaense de Energia (Copel) e geração hidrelétrica da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig).

Em Diniz (2002) encontram-se relacionados diversos casos de aplicação da MCC na indústria brasileira, entre eles os relacionados a sistemas elétricos: alimentador de 13.8 kV em

Taquipe (Bahia), sistema de geração elétrica da unidade de exploração e produção de petróleo do Amazonas, sistema de geração da turbina à gas da Refinaria Landulpho Alves (Bahia) e moto-compressores da unidade de exploração e produção do Rio Grande do Norte/Ceará.

6.2 - SISTEMA ELÉTRICO DA REFINARIA LANDULPHO ALVES (BA)

A Refinaria Landulpho Alves , conhecida na Petrobras como Unidade de Negócio RLAM possue três unidades geradoras de energia elétrica em 13.8 kV e uma subestação de 69/13.8 kV (S-65) para conexão com a rede de transmissão da concessionária de energia. A figura 6.1 mostra o diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico de 69/13.8 kV. As três unidades geradoras de energia elétrica são as Unidade-51 (Central Termoelétrica), Unidade-83 (Central Termoelétrica 2) e Unidade-39 (Craqueamento Catalítico e Reforma). A unidade 51 dispõe de um turbogerador de 9,73 MVA-13.8 kV (TG-5101) acionado por uma turbina a vapor de extração e condensação. A unidade 83 dispõe de um turbogerador de 23,75 MVA-13.8 kV (TG-8301) acionado por uma turbina a gás natural e de uma caldeira recuperadora com queima suplementar. A unidade 39 é uma planta que possui um turbogerador de 40,25 MVA-13.8 kV (TG-3901) acionado por um expansor de gases residuais de processo. As três unidades geradoras podem trabalhar em paralelo entre si e com as linhas de transmissão da concessionária.

A subestação de conexão com a concessionária utiliza um arranjo em barra dupla com disjuntor de interligação, abrigados em painel isolado em gás SF6. A conexão com a concessionária é realizada através de uma linha de transmissão de 69 Kv em circuito duplo (LT02J1/J2), proveniente da subestação de Jacaracanga 230/69 kV (CHESF). Esta subestação de conexão possui cinco *bays* de saída em 69 kV para interligação com o sistema de distribuição através de transformadores de 69/13.8 kV, sendo um para alimentação de cada barra de distribuição ou geração.

A energia gerada ou importada da concessionária é distribuida em 13.8 kV através de painéis elétricos, uma rede de distribuição subterrânea de alimentadores e de um conjunto de subestações alocadas na planta de modo a atender as cargas consumidoras das unidades de processo da refinaria e alguns consumidores externos de outras unidades da Petrobras. Uma pequena parte da rede de distribuição tem encaminhamento aéreo, nas áreas administrativas ou fora da área industrial.

As subestações próximas das unidades de processo, chamadas subestações de área, utilizam transformadores abaixadores de 13.8/2.4 kV e 13.8/0.48 kV para fornecer as tensões

de utilização das cargas consumidoras das unidades de processo. As subestações de área das unidades de processo mais importantes têm arranjos em secundário seletivo com dois transformadores em cada nível de tensão e dupla entrada nos painéis de 2.400 V e 480 V.

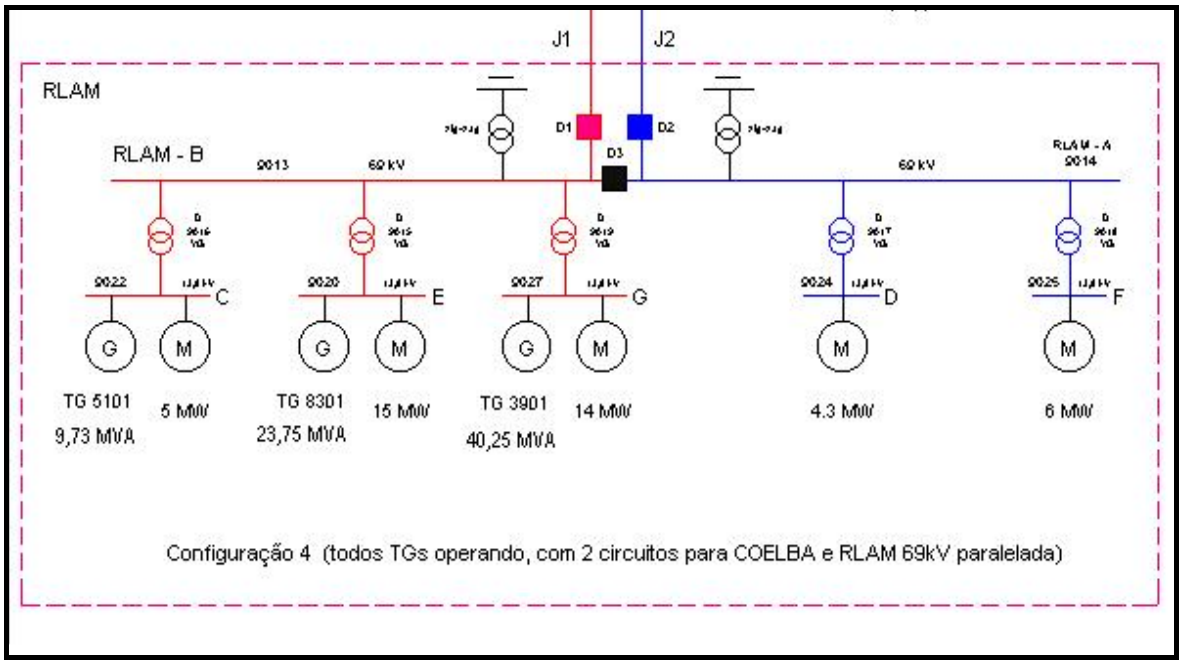


Fig. 6.1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico da RLAM

As cargas consumidoras são constituidas na sua maioria por motores trifásicos de indução, com rotor tipo gaiola. Em regra, as cargas de potência igual ou acima de 125 CV e menores ou iguais a 900 CV são alimentadas em 2.400 V através de painéis chamados Centros de Distribuição de Cargas e as cargas com potência abaixo de 125 CV são alimentadas em 480 V através de Centros de Distribuição de Cargas (> 76 CV) ou Centros de Controle de Motores (< 76 CV). Motores com potência acima de 900 CV são alimentados em 13.800 V.

6.3 - CASO PRÁTICO: PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DO TURBOGERADOR TG-8301

Em dezembro/2001, foi formado um grupo de trabalho de engenheiros e técnicos da RLAM para elaborar um plano de manutenção para o TG-8301, segundo a metodologia da MCC. O grupo contou com uma consultoria externa para treinamento do grupo e coordenação dos trabalhos. O grupo foi formado por três engenheiros mecânicos, um engenheiro eletricista,

um engenheiro de instrumentação, um técnico de operação da área de utilidades, um técnico de manutenção elétrica e um técnico de manutenção da instrumentação. Os participantes não tiveram dedicação exclusiva para o trabalho da MCC, reunindo-se em média durante 03 dias por mês e concluindo o relatório final em nove meses.

O TG-8301A consiste de uma turbina General Eletric, modelo LM2500, que utiliza o gás natural como combustível, para acionar um gerador elétrico Brush, potência nominal de 23,75MVA, 13.800V, fornecendo energia elétrica para a refinaria através do painel PN-5101E e gases de exaustão para a caldeira recuperadora GV-8301. Na MCC, o sistema foi dividido em 14 módulos ou sub-sistemas: Partida, Exaustão de Gases, Proteção de Incêndio, Lubrificação da Turbina, Lubrificação do Gerador, Sistema de Proteção Mecânica, Gás Combustível, Controle, Ventilação, Turbina, Gerador, Corrente Contínua, Corrente Alternada e Lavagem.

Para todos os módulos foi aplicada a metodologia da MCC representada na figura 6.3.

Os sub-sistemas do gerador, de corrente contínua e de corrente alternada estão diretamente relacionados aos propósitos deste trabalho, razão pela qual estes sistemas foram escolhidos para serem submetidos à metodologia proposta no capítulo 5. Os modos de falha destes três sub-sistemas foram reavaliados quanto ao impacto na segurança, saúde e meio ambiente, submetendo-se cada um deles aos passos descritos no capítulo 5.

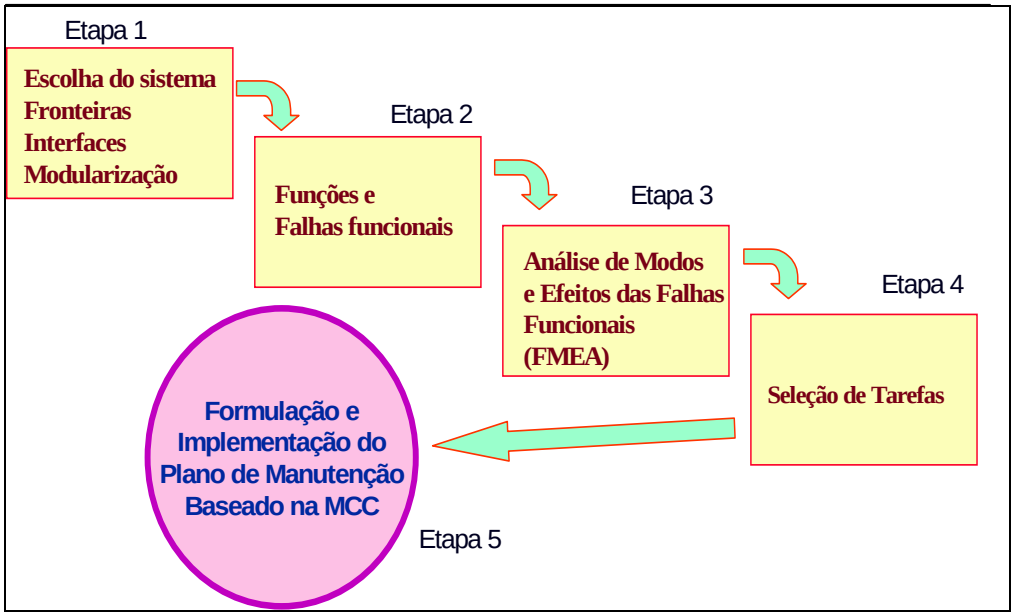


Fig. 6.2 - Metodologia da MCC do TG-8301.
Fonte: Diniz (2002)

6.3.1 - Sub-sistema Gerador

A tabela 6.1 mostra a análise funcional do sub-sistema Gerador realizada pelo grupo que elaborou a MCC do TG-8301. A análise funcional relaciona todas as funções desempenhadas pelo sistema e as possíveis falhas funcionais.

A tabela 6.2 mostra a matriz componente por falha funcional, onde cada componente está relacionado com as falhas funcionais identificadas para o sub-sistema Gerador.

No subsistema Gerador, os componentes que tiveram algum modo de falha relacionados com segurança, com base no estudo da MCC original, foram: sistema de excitação, sistema digital de proteção, disjuntor geral 52-A15, válvulas de segurança (PSV-1490/1491/1488/1489) e resistor de aterramento RT-8301.

A tabela 6.3 mostra a planilha da Análise de Modo de Falha e Efeito (FMEA) e a tabela 6.4, o diagrama de decisão para seleção de tarefas. Observa-se que as planilhas foram baseadas na árvore lógica e diagrama de seleção de tarefas de Smith (1992, p. 90; 95) mostrados na figura 3.5 do capítulo 3. Os modos de falha que foram apontados como tendo implicação na segurança (meio ambiente / pessoas) estão assinalados com "S"(Sim) na coluna S (Segurança). As colunas "E" (Evidente), "O" (Oculta) e "C" (Classificação) referem-se às informações adicionais sobre as falhas e seus efeitos. As colunas de 1 à 7 das planilhas "Seleção de Tarefas" indicam as respostas das seguintes perguntas: (1) A relação entre idade e confiabilidade para esta falha é conhecida ? (2) Existe alguma tarefa BT (baseada no tempo) que seja aplicável ? (3) Existe alguma tarefa BC (baseada na condição) que seja aplicável ? (4) A categoria desta falha é oculta ? (5) Existe alguma tarefa TDF (Teste de Detecção de Falha) que seja aplicável ? (6) Caso tenha sido especificada alguma tarefa anteriormente, a mesma é custo-eficiente ? (7) O reprojeto pode resolver o problema ?.

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade			
Análise de Falhas Funcionais			
Sistema: Turbina a Gás (TG-8301A)		Subsistema: Gerador	
Revisão: 0		Data: 16/07/2002	1/20
#	*Função*	#	*Falhas Funcionais*
1	Gerar potência elétrica (energia)	1.1	Não gerar potência elétrica
		1.2	Gerar potência elétrica fora do especificado
2	Controlar tensão e fator de potência	2.1	Não controlar tensão e fator de potência
3	Enviar/receber sinais (SCMD e painel do NetCon)	3.1	Não enviar/receber sinais ou enviar/receber sinais espúrios (SCMD e painel do NetCon)
4	Proteção do gerador	4.1	Não proteção do gerador ou atuação indevida
5	Manter a integridade (energia elétrica, água, óleo)	5.1	Não manter a integridade (fuga de energia elétrica, vazamento de água e óleo)

Tab. 6.1 - Análise funcional do sub-sistema Gerador

Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade						
Matriz Componente por Falha Funcional						
Sistema: Turbina a Gás			Subsistema: Gerador			
Revisão: 0			Data:		2/20	
Componentes	*1.1*	*1.2*	*2.1*	*3.1*	*4.1*	*5.1*
Componentes Mecânicos						
Rotor	X		X			X
Estator	X	X	X			X
Ventilador	X	X				X
Trocador de calor	X	X				X
Mancais	X	X				X
Bomba de óleo	X	X				X
Selos dos mancais						X
Válvula de segurança (PSV-1490/1491/1488/1489)				X		X
Componentes Elétricos						
Sistema de excitação (AVR, PMG)	X	X	X	X	X	X
Sistema digital de proteção (DGP)	X		X	X	X	X
Sistema de proteção de falta a terra no rotor	X		X	X	X	X
Cabos de potência (TG-CAFOR)	X		X			X
Cabos de sinais (SCMD e NetCon)	X		X	X	X	X
Sistema de monitoração digital multifunção (DMMS)				X		X
Disjuntor 52-A15	X			X	X	X
Resistências de aquecimento do estator do gerador	X				X	X
Ressistores de aterramento RT-8301		X			X	X
Componentes de Instrumentação						
Sensor de temperatura (TE-1497/1498)				X		X
Chave de nível (LSH-1831/1832)				X		X

Tab. 6.2 - Matriz componente por falha funcional - sub-sistema Gerador.
Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)				
Sistema: Turbina a Gás	Subsistema: Gerador	Revisão: 0	Data: 16/07/2002	3/20
Função: 5		Falha Funcional: 5.1		

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Rotor	Pára de funcionar	- Vibração excessiva - Falha à terra (enrolamento) - Quebra do eixo - Falha do mancal - Problemas na turbina - Quebra do acoplamento - Aquecimento - Curto-circuito entre espiras (enrolamento)	- Desarme do gerador (excitação) - Desarme da turbina (confirmar)	S
Estator	Pára de funcionar	- Falha à terra (enrolamento) - Aquecimento - Curto-circuito entre espiras (enrolamento) - Desequilíbrio de corrente - Mau contato - Reversão de potência - Sobretensão - Sobrecorrente - Curto-circuto entre fases - Atuação dos RTDs dos enrolamentos	- Atuação do DGP (desarme do gerador) - Desarme da turbina (confirmar)	S
	Funciona inadequadamente	- Aquecimento - Mau contato - Atuação dos RTDs dos enrolamentos	- Baixo rendimento do gerador	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 4/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Ventilador	Pára de funcionar	- Problema na turbina - Quebra do acoplamento - Vibração excessiva - Quebra do eixo - Falha no mancal	- Aquecimento do gerador	N
Trocador de calor	Funciona inadequadamente (perda de eficiência)	- Furo nos tubos - Sujeira - Falha nos flanges - Corrosão - Incrustação (depósito)	- Aquecimento do gerador, com possibilidade de desarme da máquina	S
	Vazamento de água	- Falha nos flanges - Furos nos tubos (água entra no gerador)	- Possibilidade de presença de água no estator/rotor levando a parada do gerador	N
Mancais	Não funciona	- Travamento (falta de lubrificação, problema de material, vibração excessiva, falha de montagem)	- Parada da máquina	S
	Funciona inadequadamente	- Desgastes naturais - Passagem indevida de corrente - Contaminação do óleo	- Possibilidade de desarme da máquina por vibração excessiva ou temperatura alta (aquecimento dos mancais) - Roçamento - Contaminação do óleo	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)				
Sistema: Turbina a Gás	Subsistema: Gerador	Revisão: 0	Data: 16/07/2002	5/20
Função: 5	Falha Funcional: 5.1			
Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Sistema de excitação (AVR, PMG)	Não funciona	- Falha no PMG (curto-circuito no estator, mau contato, quebra da fiação do enrolamento, etc.) - Falha nos enrolamentos da excitatriz - Problemas nos diodos ou fusíveis do sistema de excitação - Falha nos cabos de saída dos diodos para o rotor - Falha no AVR (terminações, bornes, cartões, relés de saída, componentes internos, etc.) - Falha nos cabos entre o AVR e o campo da excitatriz - Falha nos TCs e TPs - Falha no sistema de controle - Mau contato - Ajustes inadequados (erro de manutenção) - Falha à terra	- Atuação do DGP, levando a parada da geração de energia	S
	Funciona inadequadamente	- Ajustes inadequados (erro de manutenção) - Falha no sistema de controle	- Atuação do DGP, levando a parada da geração de energia - Possibilidade de danos aos equipamentos elétricos, incluindo a barra E	N
	Fuga de corrente	- Mau contato - Baixa isolação - Desencapamento da fiação	- Choque elétrico - Atuação do DGP, levando a parada da geração de energia	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 6/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Bomba de óleo principal do gerador	Não funciona	- Travamento das buchas - Superaquecimento (falta de óleo) - Desgastes naturais - Quebra do acoplamento/chaveta - Quebra do rotor/eixo - Vazamento de óleo (mangueiras/conexões) - Baixo nível de óleo no reservatório	- Atuação das bombas auxiliares - Possibilidade de desarme do gerador, em caso de falha das bombas auxiliares	S
	Funcionamento inadequado	- Desgastes naturais - Empeno do rotor/eixo - Ar na linha de sucção - Filtro sujo	- Atuação das bombas auxiliares	N
	Vazamento externo	- Desgaste nas vedações, mangueiras e conexões	- Desarme do TG-8301A - Contaminação da área	N
Selos dos mancais	Vazamento de óleo -	- Problema na selagem (roçamento, tomada de ar de selagem, etc.) - Falha na montagem	- Contaminação do gerador e da área	N
Sistema digital de proteção (DGP)	Não funciona	- Falha nos componentes internos (cartões, relés auxiliares de saída, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TPs e TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc)	- Possibilidade de danos severos ao gerador e ao sistema elétrico associado ao mesmo - Riscos aos operadores e equipamentos	S

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)				
Sistema: Turbina a Gás	Subsistema: Gerador	Revisão: 0	Data: 16/07/2002	7/20
Função: 5	Falha Funcional: 5.1			
Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
	Funcionamento inadequado (atuação indevida)	- Falha nos componentes internos (cartões, relés auxiliares de saída, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TPs e TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.)	- Desligamento indevido do gerador, turbina ou sistema de excitação - Problema operacional	N
	Fuga de corrente	- Falha nos componentes internos (cartões, relés auxiliares de saída, etc.) - Desencapamento nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito)	- Choque elétrico - Possibilidade de atuação indevida, desligando o gerador, turbina ou sistema de excitação	N
Sistema de proteção de falta a terra no rotor	Não funciona	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc) - Problemas na antena de transmissão de sinais (transmissor e receptor)	- Curto-circuito (danos) no rotor, levando a parada do gerador	S

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 8/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
	Funcionamento inadequado (atuação indevida)	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Problemas na antena de transmissão de sinais (transmissor e receptor)	- Desarme indevido do gerador	N
	Fuga de corrente	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, etc.) - Desencapamento nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito)	- Choque elétrico - Possibilidade de desarme indevido/devido do gerador	N
Cabos de potência (TG-CAFOR)	Pára de funcionar	- Curto-circuito - Mau contato - Rompimento - Falha no aterramento - Baixa isolação	- Atuação do DGP, levando a parada do gerador	S
Cabos de sinais (SCMD e NetCon)	Pára de funcionar	- Curto-circuito - Mau contato - Rompimento - Falha no aterramento - Baixa isolação	- Possibilidade de perda de sincronização do gerador com a COELBA - Perda de informações (tensão, corrente, fator de potência, potência) de monitoração - Perda do comando do disjuntor A15	S

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 9/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Sistema de monitoração digital multifunção (DMMS)	Pára de funcionar	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TPs e TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc) - Problemas no cabo de conexão entre o DMMS e o XYCOM	- Perda de informação local (corrente, freqüência, RPM, potência, etc.) - Perda de sincronismo local por falta de informação do DMMS	N
	Funciona inadequadamente	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TPs e TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Problemas no cabo de conexão entre o DMMS e o XYCOM	- Erro nas informações locais (corrente, freqüência, RPM, potência, etc.)	N
	Fuga de corrente	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, etc.) - Desencapamento nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito)	- Choque elétrico - Possibilidade de queima do DMMS - Perda de informação local (corrente, freqüência, RPM, potência, etc.)	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 10/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Disjuntor 52-A15	Não funciona	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, bobinas de fechamento e abertura, etc.) - Falha nos componentes externos (chaves de comando local) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc) - Problemas mecânicos - Problemas no SCMD (comando remoto)	- Não fornece tensão para a barra E - Não formece energia para a Refinaria	S
	Funciona inadequadamente (atuação indevida)	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, bobinas de fechamento e abertura, etc.) - Falha nos componentes externos (chaves de comando local) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Problemas mecânicos - Problemas no SCMD (comando remoto)	- Possibilidade de abertura indevida, levando a parada do fornecimento de energia para a barra E - Possibilidade de não retornar por falha em alguns componentes do comando	N
	Fuga de corrente	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, bobinas de fechamento e abertura, etc.) - Falha nos componentes externos (chaves de comando local) - Desencapamento nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito)	- Choque elétrico - Possibilidade de não fornecer tensão para a barra E	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 11/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Resistências de aquecimento do estator do gerador	Não funciona	- Falha na fiação - Falta de alimentação (120Vca) - Curto-circuito - Mau contato - Rompimento (abertura) da resistência - Falha nas conexões	- Baixa isolação no gerador, levando a atuação do sistema de proteção	S
	Funciona inadequadamente	- Mau contato - Falha nas conexões - Queima de algumas resistências	- Não fornece o calor necessário para manter a isolação, podendo levar a atuação do sistema de proteção do gerador	N
	Fuga de corrente	- Mau contato - Falha nas conexões - Baixa isolação	- Choque elétrico - Possibilidade de baixa isolação no gerador, levando a atuação do sistema de proteção	N
Válvula de segurança (PSV-1490/1491/1488/1489)	Não funciona	- Problemas nos componentes internos - Descalibrada - Corrosão - Choques mecânicos - Erro de montagem	- Não protege as linhas e trocador quanto a alívio térmico, no caso de fechamento indevido de válvulas e aquecimento no trocador de calor (confirmar)	S
	Funciona inadequadamente (atuação indevida)	- Problemas nos componentes internos- - Descalibrada	- Abertura e despressurizaçào indevida do sistema, levando a aumento da temperatura no gerador	N
	Vazamento de água	- Corrosão - Choques mecânicos - Falha nas juntas, conexões	- Contaminação da área com água, levando a aumento da temperatura no gerador	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 16/07/2002 | 12/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Ressistores de aterramento RT-8301	Não funciona	- Desconexão comm a malha de terra - Mau contato nas conexões - Sujeira nas resistências e conexões	- Falha da proteção - Danos materiais ou pessoais - Atuação de outras proteções, desarmando o gerador	S
	Funciona inadequadamente	- Mau contato nas conexões - Sujeira nas resistências e conexões - Baixa isolação ou quebra de isoladores	- Falha da proteção - Danos materiais ou pessoais - Atuação de outras proteções, desarmando o gerador - Atuação indevida da atuação	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação - Desencapamento da fiação - Quebra de isoladores	- Choque elétrico	N
Sensor de temperatura (TE-1497/1498)	Não funciona	- Mau contato - Descalibrado - Falha intrínseca - Falha no linknet - Falha nas conexões	- Não envia sinais de alarme de temperatura - Possibilidade de desarme do gerador por alta temperatura	N
	Funciona inadequadamente	- Mau contato - Descalibrado - Falha intrínseca - Falha no linknet - Falha nas conexões	- Envia sinais indevidos (informação errada)	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação - Desencapamento da fiação	- Choque elétrico	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)				
Sistema: Turbina a Gás	Subsistema: Gerador	Revisão: 0	Data: 16/07/2002	13/20
Função: 5	Falha Funcional: 5.1			
Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Chave de nível (LSH-1831/1832)	Não funciona	- Mau contato - Descalibrado - Falha intrínseca - Falha nas conexões	- Não envia sinais de alarme de nível - Possibilidade de desarme do gerador por atuação de baixa isolação (DGP)	S
	Funciona inadequadamente	- Mau contato - Descalibrado - Falha intrínseca - Falha nas conexões	- Envia sinais indevidos (informação errada)	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação - Desencapamento da fiação	- Choque elétrico	N

Tab. 6.3 - Planilha da FMEA - Sub-sistema Gerador

Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 17/07/2002 | 14/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Rotor	Pára de funcionar	- Vibração excessiva - Falha à terra (enrolamento) - Quebra do eixo - Falha do mancal - Problemas na turbina - Quebra do acoplamento - Aquecimento - Curto-circuito entre espiras (enrolamento)	S	N	S	B	N	-	S	N	-	S	-	1 - Acompanhamento de vibração 2 - Teste de isolamento 3 - Medição da resistência das bobinas	1 2 3	1-Semanal M 2-Anual E 3-Anual E
Estator do gerador	Pára de funcionar	- Falha à terra (enrolamento) - Aquecimento - Curto-circuito entre espiras (enrolamento) - Desequilíbrio de corrente - Mau contato - Reversão de potência - Sobretensão - Sobrecorrente - Curto-circuto entre fases - Atuação dos RTDs dos enrolamentos	S	N	S	B	S	S	N	N	-	S	-	1 - Teste de isolamento 2 - Inspecionar e remover sujeira 3 - Inspeção geral, conforme fabricante	1 2 3	1-Anual E 2-Trianual E 3-12 anos E

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 17/07/2002 | 15/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Trocador de calor do gerador	Funciona inadequadamente (perda de eficiência)	- Furo nos tubos - Sujeira - Falha nos flanges - Corrosão - Incrustação (depósito)	S	N	S	B	N	-	S	N	-	S	-	1 - Análise de perfomance (TE-1497 e TE-1498)- medição das temparaturas de entrada e saída do trocador 2 - Inspecionar 3 - Inspeção geral, conforme fabricante	1 2 3	1-Semanal M 2-Trianual M 3 - 12 anos M
Mancais do gerador	Não funciona	- Travamento (falta de lubrificação, problema de material, vibração excessiva, falha de montagem)	S	N	S	B	S	S	S	N	-	S	-	1 - Inspecionar mancais e selos 2 - Análise do óleo e trocar se necessário 3 - Medir resitência de isolamento	1 2 3	1-Quadrianual M 2-Semestral M 3-Anual E

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 17/07/2002 | 16/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Sistema de excitação (AVR, PMG)	Não funciona	- Falha no PMG (curto-circuito no estator, mau contato, quebra da fiação do enrolamento, etc.) - Falha nos enrolamentos da excitatriz - Problemas nos diodos ou fusíveis do sistema de excitação - Falha nos cabos de saída dos diodos para o rotor - Falha no AVR (terminações, bornes, cartões, relés de saída, componentes internos, etc.) - Falha nos cabos entre o AVR e o campo da excitatriz - Falha nos TCs e TPs - Falha no sistema de controle - Mau contato - Ajustes inadequados (erro de manutenção) - Falha à terra	S	S	-	A	S	S	N	N	-	S	-	1 - Reaperto das conexões e medidas das grandezas elétricas (tensão, corrente, etc.) 2 - Teste de isolamento nos TPs e TCs e na fiação 3 - Verificar e remover sujeira dos polos do rotor do PMG 4 - Verificar conexões elétricas	1 2 3 4	1-Anual E 2-Anual E 3-Trianual E 4-Trianual E

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 17/07/2002 | 17/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Bomba de óleo principal do gerador	Não funciona	- Travamento das buchas - Superaquecimento (falta de óleo) - Desgastes naturais - Quebra do acoplamento/chaveta - Quebra do rotor/eixo - Vazamento de óleo (mangueiras/conexões) - Baixo nível de óleo no reservatório	S	N	S	B	S	S	N	N	-	S	-	1 - Lubrificação do acoplamento	1	1-Semestral M
Sistema digital de proteção (DGP)	Não funciona	- Falha nos componentes internos (cartões, relés auxiliares de saída, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TPs e TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc)	N	S	-	D/A	S	S	N	S	S	S	-	1 - Teste funcional (incluindo reperto das conexões) 2 - Teste de isolamento dos TPs e TCs Obs: Este equipamento possui um teste de auto-diagnose que detecta falhas internas, sinalizando no SCMD (não detecta falhas de interface).	1 2	1-Anual E 2-Anual E

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 17/07/2002 | 18/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Sistema de proteção de falta a terra no rotor	Não funciona	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, etc.) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de parametrização (erro de ajustes) - Falha em sensores (TCs) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc) - Problemas na antena de transmissão de sinais (transmissor e receptor)	N	N	S	D/B	S	S	N	S	S	S	-	1 - Teste funcional (incluindo reperto das conexões) 2 - Teste de isolamento da fiação 3 - Teste do sistema de transmissão de sinais RF 4 - Inspecionar e/ou trocar escova de aterramento 5 - Teste do monitor - pressionar botão	1 2 3 4 5	1-Anual E 2-Anual E 3-Anual E 4-Anual E 5-Trimestral E
Cabos de potência (TG-CAFOR)	Pára de funcionar	- Curto-circuito - Mau contato - Rompimento - Falha no aterramento - Baixa isolação	S	N	S	B	S	S	N	N	-	S	-	1 - Teste de isolamento dos cabos	1	1-Anual E
Cabos de sinais (SCMD e NetCon)	Pára de funcionar	- Curto-circuito - Mau contato - Rompimento - Falha no aterramento - Baixa isolação	S	N	N	C	N	-	N	N	-	N	N	Manutenção corretiva		

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: Turbina a Gás | Subsistema: Gerador | Revisão: 0 | Data: 17/07/2002 | 19/20

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Disjuntor 52-A15	Não funciona	- Falha nos componentes internos (relés auxiliares de saída, conexões, fusíveis, bobinas de fechamento e abertura, etc.) - Falha nos componentes externos (chaves de comando local) - Falha nos cabos, conexões (mau contato, curto-circuito) - Erro de ligação (manutenção, montagem, falta de aterramento, etc.) - Falta de alimentação (125Vcc) - Problemas mecânicos - Problemas no SCMD (comando remoto)	N	S	-	D/A	S	S	S	S	S	S	-	1 - Teste funcional 2 - Teste de isolamento da fiação de comando 3 - Revisão geral 4 - Termografia (incluindo o painel)	1 2 3 4	1-Anual E 2-Anua E 3-Trianual E 4-Semestral E
Resistências de aquecimento do estator do gerador	Não funciona	- Falha na fiação - Falta de alimentação (120Vca) - Curto-circuito - Mau contato - Rompimento (abertura) da resistência - Falha nas conexões	N	N	S	D/B	S	S	S	S	S	S	-	1 - Megagem 2- Reaperto das conexões 3 - Verificação da fiação e cabos	1 2 3	1-Anual E 2-Anual E 3-Anua E

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade																
Seleção de Tarefas																
Sistema: Turbina a Gás		Subsistema: Gerador									Revisão: 0			Data: 17/07/2002		20/20
Função: 5								Falha Funcional: 5.1								
Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Válvula de segurança (PSV-1490/1491/1488/1489)	Não funciona	- Problemas nos componentes internos - Descalibrada - Corrosão - Choques mecânicos - Erro de montagem	N	S	-	D/A	S	S	N	S	S	S	-	1 - Calibração	1	1-Trianual M
Resistores de aterramento RT-8301	Não funciona	- Desconexão comm a malha de terra - Mau contato nas conexões - Sujeira nas resistências e conexões	N	S	-	D/A	N	-	S	S	S	S	-	1 - Medição da resistência ôhmica 2 - Medição da isolação 3 - Reaperto das conexões 4 - Limpeza das resistências e isoladores 5 - Medição de continuidade para a malha de terra	1 2 3 4 5	1 -Trianual E 2- Trianual E 3- Trianual E 4- Trianual E 5- Trianual E
Chave de nível (LSH-1831/1832)	Não funciona	- Mau contato - Descalibrado - Falha intrínseca - Falha nas conexões	N	N	S	D/B	N	-	N	S	S	S	-	1 - Teste de funcionamento	1	1 - Anual I

Tab. 6.4 - Diagrama de decisão para seleção de tarefas - Sub-sistema Gerador.

Fonte: Diniz (2002)

Todos os modos de falha de cada componente foram reavaliados com relação ao impacto na segurança, saúde e meio ambiente, utilizando-se a metodologia proposta no capítulo 5. A tabela 6.5 mostra o grau de risco avaliado, considerando-se o maior grau obtido entre todos decorrentes dos diversos efeitos de cada modo de falha:

COMPONENTE	MODO DE FALHA	GRAU DE RISCO	TIPO DE FALHA	AFETA MASSI
Rotor	Para de funcionar	III	A / I	Sim
Estator	Para de funcionar	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	V	A / I	Não
Ventilador	Para de funcionar	IV	A / I	Não
Trocador de Calor	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Vazamento de água	II	A / I	Sim
Mancais	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
Sistema de excitação	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A / I	Sim
Bomba de óleo	Não funciona	IV	A / I	Não
	Funciona inadequadamente	IV	A / I	Não
	Vazamento externo	III	B C / I	Sim
Selos dos mancais	Vazamento de óleo	III	A / I	Sim
Sistema de proteção digital	Não funciona	II	A B / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A / I	Sim
Sistema de proteção falta a terra no rotor	Não funciona	II	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A / I	Sim
Cabos de potência	Para de funcionar	III	A / I	Sim
Cabos de sinais	Para de funcionar	III	A / I	Sim
Sistema de monitoração digital	Para de funcionar	IV	A / I	Não
	Funciona inadequadamente	IV	A / I	Não
	Fuga de corrente	IV	A / I	Não
Disjuntor 52-A15	Não funciona	III	A B / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim

COMPONENTE	MODO DE FALHA	GRAU DE RISCO	TIPO DE FALHA	AFETA MASSI
Resistências de aquecimento	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Válvulas de segurança	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Vazamento de água	III	A / I	Sim
Resistor de aterramento	Não funciona	II	A B / I	Sim
	Funciona inadequadamente	II	A B / I	Sim
	Fuga de corrente	II	A B / I	Sim
Sensores de temperatura	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Chaves de nível	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim

Tab. 6.5 - Maior grau de risco avaliado para cada modo de falha - sub-sistema Gerador -

Para um entendimento de como se chegou aos valores da tabela 6.5 acima, descreve-se a seguir os passos descritos no capítulo 5, item 5.2.2, para o exemplo de um dos componentes. Para o componente **Sistema de proteção digital** do sub-sistema "Gerador", modo de falha **Não funciona**, aplicou-se a "Lista de Verificação" obtendo-se as informações iniciais apresentadas na figura 6.3.

Em seguida, aplicou-se o "Guia de Avaliação de Risco" não só para os quesitos indicados inicialmente na LV, mas também para os demais. O "Guia de Avaliação de Risco" preenchido é apresentado na figura 6.4, mostrando-se somente os campos do modo de falha "Não funciona" do componente "Sistema de proteção digital" do sub-sistema Gerador e contém as informações detalhadas a seguir:

- O não funcionamento do sistema de proteção digital poderá resultar nos efeitos (perigos) de: elevação de corrente ou tensão no componente, sobrecorrente ou sobretensão no sistema elétrico, fuga de corrente, funcionamento inadequado de disjuntores e sistemas de proteção, detecção e isolação elétrica, perda de energia elétrica e vapor no processo, outras falhas em cadeia, trincas (falha estrutural) no gerador, descarga/arco elétrico no sistema,

sobreaquecimento de outros componentes, possibilidade de explosão, falha do equipamento rotativo (turbogerador) e possibilidade de ejeção de partes ou fragmentos.

- Cada um destes efeitos foi classificado quanto a extensão (I/E), tipo (A/B/C) severidade (1 a 4), freqüência (1 a 5) e consequentemente o grau de risco (I à V).

- Para cada efeito, dependendo do grau de risco envolvido, foram relacionadas as ações mitigadoras: tarefas de manutenção, procedimentos operacionais, uso de EPIs, sinalização, etc.

Na tabela 6.5 registrou-se o maior grau de risco (II), a classificação da falha (AB / I) e o diagnóstico quanto ao impacto no meio ambiente, saúde e segurança industrial (Sim).

Adotou-se o procedimento acima para todos os modos de falha de cada componente, obtendo-se os demais valores mostrados na tabela 6.5.

ITEM	VERIFICAÇÕES	SIM	NÃO
1	A falha coloca em risco algum inventário perigoso ?		X
2	A falha provoca alguma condição física extrema para o processo ou pessoas ?	X	
3	A falha provoca transtornos operacionais que levem o processo para uma condição insegura ?	X	
4	A falha pode provocar outras falhas em cascata ? (EFEITO DOMINÓ)	X	
5	A falha pode provocar danos estruturais que ameacem as pessoas ?	X	
6	A falha pode desencadear fenômenos físicos/químicos que coloquem em risco a segurança e a saúde das pessoas ou ao meio ambiente ?	X	
7	A falha pode causar aceleração descontrolada de objetos ou fluídos ?	X	
8	A falha pode causar desaceleração descontrolada de objetos ou fluídos ?	X	
9	A falha pode provocar reações químicas perigosas ?		X
10	A falha pode provocar efeitos elétricos perigosos ?	X	
11	A falha pode provocar explosões ?	X	
12	A falha pode provocar fogo ou inflamar materiais potencialmente perigosos ?	X	
13	A falha pode provocar aumento de calor ou de temperatura que implique em elevação de pressão, inflamabilidade, volatilidade ou atividade ?		
14	A falha pode interferir no adequado funcionamento de equipamentos mecânicos, causando condições inseguras ?	X	
15	A falha provoca aumento de pressão de gás, ar ou líquidos causando condições inseguras ?		X
16	A falha pode interferir no adequado funcionamento de equipamentos estáticos, causando condições inseguras ?		X
17	A falha provoca vazamento de substâncias perigosas ?		X
18	A falha pode provocar emissão de radiações ?		X
19	A falha provoca liberação de substâncias tóxicas ?		X
20	A falha provoca aumento excessivo de vibração ?	X	

Fig. 6.3 - Exemplo: Lista de Verificação preenchida

SUBSISTEMA : Gerador
COMPONENTE : Sistema de proteção digital
MODO DE FALHA : Não funciona

	GRUPO DE EFEITOS	PERIGO PROVOCADO PELO EFEITO DA FALHA . O efeito do modo de falha implica em :	SELEÇÃO	TIPO	EXTENSÃO	SEVERIDADE (Y)	FREQUENCIA (F)	GRAU DE RISCO	Afeta MASSI ?	AÇÃO RECOMENDADA
2	**CONDIÇÕES FÍSICAS EXTREMAS**									
		Elevação de tensão ou corrente	**X**	**A**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
3	**TRANSTORNOS OPERACIONAIS**									
3.1	**VARIÁVEIS DE PROCESSO**									
		Sub/Sobrecorrente elétrica	**X**	**A**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
		Sub/Sobretensão elétrica	**X**	**A**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
3.3	**FALHAS DE CONTENÇÃO**									
		Fuga de corrente elétrica	**X**	**AB**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema

3.4	**FUNCIONAMENTO INADEQUADO DE EQUIPAMENTOS/SISTEMAS**									
		Chaves e disjuntores elétricos	**X**	**AB**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
		Sistemas de proteção/segurança/detecção/alívio	**X**	**AB**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
		Sistemas de isolação elétrica ou térmica	**X**	**AB**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
3.5	**PERDA DE UTILIDADES**									
		Energia elétrica	**X**	**A**	**I**	**2**	**4**	**III**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema Operar em paralelo com as demais fontes
		Vapor	**X**	**A**	**I**	**2**	**4**	**III**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema Operar em paralelo com as demais fontes
4	**EFEITO DOMINÓ**									
		Outras falhas em cadeia	**X**	**A**	**I**	**2**	**4**	**III**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema Operar em paralelo com as demais fontes
5	**ESTRUTURAS**									
		Trincas	**X**	**AB**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
6	**FENÔMENOS QUÍMICOS/FÍSICOS**									

		Descarga/arco elétrico	**X**	**AB**	**I**	**3**	**4**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
8	**DESACELERAÇÃO DESCONTROLADA**									
		Impactos (parada brusca)	**X**	**A**	**I**	**2**	**4**	**III**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
10	**FALHA EM COMPONENTES ELÉTRICOS**									
		Sobreaquecimento	**X**	**A**	**I**	**2**	**4**	**III**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
		Explosão (causa elétrica)	**X**	**AB**	**I**	**4**	**3**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema Verificar HOOD do gerador anualmente
14	**FALHA EM EQUIP. MECÂNICOS**									
		Falha em equipamentos rotativos	**X**	**A**	**I**	**3**	**3**	**III**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
		Ejeção de partes ou fragmentos	**X**	**AB**	**I**	**4**	**3**	**II**	**S**	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema Verificar HOOD do gerador anualmente

Fig. 6.4 - Exemplo: Guia de Avaliação de Risco preenchido (Sistema de proteção do gerador)

6.3.2 - Subsistema Corrente alternada

Com base no estudo da MCC original, no sub-sistema Corrente Alternada, nenhum dos componentes tiveram algum modo de falha relacionado com segurança.

A tabela 6.6 mostra a análise funcional do sub-sistema Corrente Alternada realizada pelo grupo que elaborou a MCC do TG-8301. A análise funcional relaciona todas as funções desempenhadas pelo sistema e as possíveis falhas funcionais.

A tabela 6.7 mostra a matriz componente por falha funcional, onde cada componente está relacionado com as falhas funcionais identificadas para o sub-sistema Corrente Alternada.

A tabela 6.8 mostra a planilha da Análise de Modo de Falha e Efeito (FMEA) e a tabela 6.9, o diagrama de decisão para seleção de tarefas. Observa-se que nenhum modo de falha foi assinalado com "S"(Sim) na coluna S (Segurança).

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade			
Análise de Falhas Funcionais			
Sistema:TG-8301A		Subsistema: Sistema de Corrente Alternada	
Revisão:0		Data:04/07/02	1/7
#	*Função*	#	*Falhas Funcionais*
1	Fornecer energia 120 VAC	1.1	Não fornecer energia 120 VAC
		1.2	Fornecer energia fora do especificado
2	Manter a integridade	2.1	Não manter a integridade

Tab. 6.6 - Análise funcional do sub-sistema Corrente alternada.
Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade			
Matriz Componente por Falha Funcional			
Sistema:		Subsistema:	
Revisão:		Data:	2/7
Componentes	*1.1*	*1.2*	*2.1*
Componentes Elétricos			
Disjuntor geral 480 V	X	X	X
Transformador 30 KVA, 480/208-120V	X	X	X
Disjuntor geral 208V	X	X	X
Barramentos do quadro de distribuição	X	X	X
Disjuntores de circuitos de saída	X	X	X
Condutores elétricos	X	X	X

Tab. 6.7 - Matriz componente por falha funcional - sub-sistema Corrente alternada.
Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema:TG-8301A | Subsistema:Sistema de Corrente Alternada | Revisão:0 | Data:04/07/2002 | 3/7

Função: 2 | Falha Funcional: 2.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Disjuntor geral 480 V	Não abre na ocorrência de defeito no sistema elétrico	- Contatos colados - Falha do sensor de corrente - Problema no mecanismo de abertura - Falha no dimensionamento	- Possibilidade de queima do transformador de 30KVA, 480/208-120V, ficando os sistemas alimentados em 24Vcc e 125Vcc limitados a capacidade das baterias - Possibilidade de parada do TG-8301 A se o transformador não for trocado dentro do tempo de autonomia das baterias. - Possibilidade de abertura do disjuntor do PN-8304, ocasionando parada dos motores do ventilador do gerador, exaustor da turbina, ventilador do trocador de calor do óleo de lubrificação, exaustor do filtro inercial. (Os motores reserva não são afetados pois estão em outro painel).	S
	Abre indevidamente	- Falha do sensor de corrente - Falha de isolação - Falha de operação	- Possibilidade de parada do TG-8301 A se o disjuntor não for reparado ou ajustado dentro do tempo de autonomia das baterias.	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação; - Desemcapamento dos cabos	- Choque elétrico - Danos pessoais	N
Transformador 30 KVA, 480/208-120V	Não funciona	- Falta de energia elétrica - Atuação da proteção(sobrecarga, baixa isolação) - Falha disjuntor de proteção - Superaquecimento - Queimado - Curto-circuito - Baixa isolação	- Os sistemas alimentados em 24Vcc e 125Vcc ficam limitados a capacidade das baterias. - Possibilidade de parada do TG-8301 A se o transformador não for trocado dentro do tempo de autonomia das baterias.	S

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema:TG-8301A | Subsistema:Sistema de Corrente Alternada | Revisão:0 | Data:04/07/2002 | 4/7

Função: 2 | Falha Funcional: 2.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
	Aquecimento	- Sobrecarga	- Atuação da proteção. - Redução da vida útil do transformador	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação; - Desencapamento dos cabos	- Danos pessoais; - Possibilidade de choque elétrico	N
Disjuntor geral 208V	Não abre na ocorrência de defeito no sistema elétrico	- Contatos colados - Falha do sensor de corrente - Problema no mecanismo de abertura - Erro no dimensionamento	- Possibilidade de dano no quadro de distribuição e iluminação, ficando os sistemas alimentados em 24Vcc e 125Vcc limitados a capacidade das baterias - Possibilidade de parada do TG-8301 A se o quadro não for reparado dentro do tempo de autonomia das baterias.	S
	Abre indevidamente	- Falha do sensor de corrente - Erro no dimensionamento - Falha de isolação - Falha de operação	- Possibilidade de parada do TG-8301 A se o disjuntor não for reparado ou ajustado dentro do tempo de autonomia das baterias.	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação; - Desemcapamento dos cabos	- Danos pessoais; - Possibilidade de choque elétrico; - Alarme do sistema de aterramento de alta impedância.	N
Barramentos do quadro de distribuição	Interrupção de condução de corrente	- Falha de conexão - Abertura do disjuntor - Erro de operação - Quebra do barramento	- Atuação do disjuntor de entrada do quadro, faltando energia para os circuitos. - Possibilidade de parada do TG-8301 A se os barramentos não forem reparados dentro do tempo de autonomia das baterias.	S

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)				
Sistema:TG-8301A	Subsistema:Sistema de Corrente Alternada	Revisão:0	Data:04/07/2002	5/7
Função: 2	Falha Funcional: 2.1			

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
	Fuga de corrente	- Baixa isolação; - Desemcapamento dos cabos	- Danos pessoais; - Possibilidade de choque elétrico; - Alarme do sistema de aterramento de alta impedância.	N
Disjuntores de circuitos de saída	Não abre na ocorrência de defeito no circuito	- Contatos colados - Falha do sensor de corrente - Problema no mecanismo de abertura - Erro no dimensionamento	- Possibilidade de atuação do disjuntor de 208V , ficando os sistemas alimentados em 24Vcc e 125Vcc limitados a capacidade das baterias. - Possibilidade de parada do TG-8301 A se o circuito defeituoso não for isolado ou reparado dentro do tempo de autonomia das baterias. Isto ocorrerá se os circuitos afetados forem os dos retificadores de 24 e 125Vcc.	S
	Abre indevidamente	- Falha do sensor de corrente - Erro no dimensionamento - Falha de isolação - Falha de operação	- Possibilidade de parada do TG-8301 A se o disjuntor não for reparado dentro do tempo de autonomia das baterias. Isto ocorrerá se os circuitos afetados forem os dos retificadores de 24 e 125Vcc.	N
	Fuga de corrente	- Baixa isolação; - Desemcapamento dos cabos	- Danos pessoais; - Possibilidade de choque elétrico; - Alarme do sistema de aterramento de alta impedância.	N

Tab. 6.8 - Planilha da FMEA - sub-sistema Corrente alternada.
Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema:TG-8301A | Subsistema:Sistema de Corrente Alternada | Revisão:0 | Data:04/07/2002 | 6/7

Função:2 | Falha Funcional:2.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Disjuntor geral 480 V	Não abre na ocorrência de defeito no sistema elétrico	- Contatos colados - Falha do sensor de corrente - Problema no mecanismo de abertura - Falha no dimensionamento	S	N	S	B	N	-	S	N	-	N	-	1-Termografia	1	1- Semestral E
Transformador 30 KVA, 480/208-120V	Não funciona	- Falta de energia elétrica - Atuação da proteção(sobrecarga, baixa isolação) - Falha disjuntor de proteção - Superaquecimento - Queimado - Curto-circuito - Baixa isolação	S	N	S	B	N	-	S	N	-	N	-	1-Termografia	1	1- Semestral E
Disjuntor geral 208V	Não abre na ocorrência de defeito no sistema elétrico	- Contatos colados - Falha do sensor de corrente - Problema no mecanismo de abertura - Erro no dimensionamento	S	N	S	B	N	-	S	N	-	N	-	1-Termografia	1	1- Semestral E

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade																	
Seleção de Tarefas																	
Sistema:TG-8301A		Subsistema:Sistema de Corrente Alternada								Revisão:0				Data:04/07/2002		7/7	
Função:2			Falha Funcional:2.1														
Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*	
Barramentos do quadro de distribuição	Interrupção de corrente	- Falha de conexão - Abertura do disjuntor - Erro de operação - Quebra do barramento	S	N	S	B	N	-	S	N	-	N	-	1-Termografia	1	1- Semestral E	
Disjuntores de circuitos de saída	Não abre na ocorrência de defeito no circuito	- Contatos colados - Falha do sensor de corrente - Problema no mecanismo de abertura - Erro no dimensionamento	S	N	S	B	N	-	S	N	-	N	-	1-Termografia	1	1- Semestral E	

Tab. 6.9 - Diagram de decisão para seleção de tarefas - Sub-sistema corrente alternada.

Fonte: Diniz (2002)

Seguindo-se os mesmos passos descritos no item 6.3.1. todos os modos de falha de cada componente foram reavaliados com relação ao impacto na segurança, saúde e meio ambiente. A tabela 6.10 mostra o grau de risco avaliado, considerando-se o maior grau obtido entre todos aqueles decorrentes dos diversos efeitos de cada modo de falha.

COMPONENTE	MODO DE FALHA	GRAU DE RISCO	TIPO DE FALHA	AFETA MASSI
Disjuntor geral (480 V)	Não abre qdo. solicitado	II	A B / I	Sim
	Abre indevidamente	II	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Transformador 30 KVA 480 / 208-120 V	Não funciona	II	A / I	Sim
	Aquecimento	III	A B / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Disjuntor geral (208 V)	Não abre qdo. solicitado	II	A B / I	Sim
	Abre indevidamente	II	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Barramentos do Q.D.	Interrupção da corrente	II	B / I	Sim
	Fuga de corrente	V	A B / I	Não
Disjuntores de saída	Não abre qdo. solicitado	II	A B / I	Sim
	Abre indevidamente	II	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Bomba de esgota-mento da sala de cabos	Não funciona	III	A / I	Sim
	Funciona inadequadamente	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim

Tab. 6.10 - Maior grau de risco avaliado para cada modo de falha. Sub-sistema Corrente alternada.

6.3.3 - Subsistema Corrente contínua

Com base no estudo da MCC original, no sub-sistema Corrente Contínua, nenhum dos componentes tiveram algum modo de falha relacionado com segurança.

A tabela 6.11 mostra a análise funcional do sub-sistema Corrente Contínua realizada pelo grupo que elaborou a MCC do TG-8301. A análise funcional relaciona todas as funções desempenhadas pelo sistema e as possíveis falhas funcionais.

A tabela 6.12 mostra a matriz componente por falha funcional, onde cada componente está relacionado com as falhas funcionais identificadas para o sub-sistema Corrente Contínua.

O tabela 6.13 mostra a planilha da Análise de Modo de Falha e Efeito (FMEA) e a tabela 6.14, o diagrama de decisão para seleção de tarefas. Observa-se que nenhum modo de falha foi assinalado com "S"(Sim) na coluna S (Segurança).

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade			
Análise de Falhas Funcionais			
Sistema: TG-8301A		Subsistema: Corrente Contínua	
Revisão: 0		Data: 27/06/2002	1/7
#	*Função*	#	*Falhas Funcionais*
1	Fornecer corrente contínua 24 Vcc	1.1	Não fornecer corrente contínua 24 Vcc
		1.2	Fornecer corrente fora do especificado
2	Fornecer corrente contínua 125 Vcc	2.1	Não fornecer corrente contínua 125 Vcc
		2.2	Fornecer corrente fora do especificado
3	Manter as baterias carregadas	3.1	Não manter as baterias carregadas
4	Carregar as baterias	4.1	Não carregar as baterias
5	Manter integridade	5.1	Não manter integridade

Tab. 6.11 - Análise funcional do sub-sistema Corrente contínua.
Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade							
Matriz Componente por Falha Funcional							
Sistema:TG-8301A			Subsistema:Corrente Contínua				
Revisão: 0				Data:27/06/2002		2/7	
Componentes	*1.1*	*1.2*	*2.1*	*2.2*	*3.1*	*4.1*	*5.1*
Componentes Elétricos							
Banco de baterias 24 Vcc para Sistema de Incêndio	X	X					X
Banco de baterias 24 Vcc para o sistema de controle de potência	X	X					X
Banco de baterias 125 Vcc para o NETCOM e para bomba auxiliar de óleo do gerador			X	X			X
Retificadores					X	X	X

Tab. 6.12 - Matriz componente por falha funcional do sub-sistema Corrente contínua.

Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: TG-8301A | Subsistema: Corrente Contínua | Revisão: 0 | Data: 27/06/2002 | 3/7

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Banco de baterias 24 Vcc para Sistema de Incêndio	Não fornece energia	- Bateria descarregada; - Falha no retificador; - Falha no elemento da bateria - Mau contato	- Desarme do TG-8301A - Perda do sistema de incêndio	S
	Fornece energia abaixo do especificado	- Falha de ajuste no retificador	- Funcionamento incorreto do sistema de incêndio	N
	Fuga de corrente	- Falta de isolação; - Problemas no vaso da bateria	- Descarregar o banco de baterias indevidamente; - Alarme de falha à terra; - Choque elétrico; - Vazamento de ácido; - Possibilidade de queimadura por ácido; - Possibilidade de incêndio e explosão.	N
Banco de baterias 24 Vcc para o sistema de controle de potência	Não fornece energia	- Bateria descarregada; - Falha no retificador; - Falha no elemento da bateria; - Mau contato.	- Desarme do TG-8301A - Perda do NETCOM	S
	Fornece energia abaixo do especificado	- Falha de ajuste no retificador	- Funcionamento incorreto do NETCOM	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

Sistema: TG-8301A | Subsistema: Corrente Contínua | Revisão: 0 | Data: 27/06/2002 | 4/7

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
	Fuga de corrente	- Falta de isolação; - Problemas no vaso da bateria	- Descarregar o banco de baterias indevidamente; - Alarme de falha à terra; - Choque elétrico; - Vazamento de ácido; - Possibilidade de queimadura por ácido; - Possibilidade de incêndio e explosão.	N
Banco de baterias 125 Vcc para o NETCOM e para bomba auxiliar de óleo do gerador	Não fornece energia	- Bateria descarregada; - Falha no retificador; - Falha no elemento da bateria - Mau contato.	- Impede a partida do TG-8301A - Dano nos mancais se houver falha na bomba de óleo AC em caso de parada do TG-8301A. - Perda do NETCOM	S
	Fornece energia abaixo do especificado	- Falha de ajuste no retificador	- Mal funcionamento do NETCOM; - Motor da bomba de óleo auxiliar cc pode não partir; - Alarme de sub-tensão no retificador.	N
	Fuga de corrente	- Falta de isolação; - Problemas no vaso da bateria	- Descarregar o banco de baterias indevidamente; - Alarme de falha à terra; - Choque elétrico; - Vazamento de ácido; - Possibilidade de queimadura por ácido; - Possibilidade de incêndio e explosão	N

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)				
Sistema: TG-8301A	Subsistema: Corrente Contínua	Revisão: 0	Data: 27/06/2002	5/7
Função: 5	Falha Funcional: 5.1			
Componente	*Modo de Falha*	*Causa da Falha*	*Efeitos da Falha*	*D.D.*
Retificadores	Não fornece energia	- Falha nos cartões; - Queima de fusível; - Curto circuito no cabo de alimentação do retificador; - Mal contato; - Desarme do disjuntor; - Falhas nos ajustes do retificador.	- Não carrega o banco de baterias; - Não mantém a carga do banco de baterias; - Não alimenta o sistema de cc. OBS: O sistema permanece energizado pelo banco de baterias por apenas 3 horas.	S
	Fornece energia abaixo do especificado	- Falha nos cartões; - Mal contato; - Falhas nos ajustes do retificador.	- Sistema cc funciona incorretamente; - O banco de baterias fica com a tensão abaixo do nominal; - Desarme do retificador por sobre-tensão.	N
	Fuga de corrente	- Falta de isolação; - Curto-circuito.	- Descarregar o banco de baterias indevidamente; - Alarme de falha à terra; - Choque elétrico; - Vazamento de ácido das baterias; - Possibilidade de queimadura por ácido. - Possibilidade de incêndio e explosão das baterias.	N

Tab. 6.13 - Planilha da FMEA - sub-sistema Corrente Contínua.
Fonte: Diniz (2002)

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

Seleção de Tarefas

Sistema: TG-8301A | Subsistema: Corrente Contínua | Revisão: 0 | Data: 27/06/2002 | 6/7

Função: 5 | Falha Funcional: 5.1

Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Banco de baterias 24 Vcc para Sistema de Incêndio	Não fornece energia	- Bateria descarregada; - Falha no retificador; - Falha no elemento da bateria - Mau contato	S	N	S	B	N	-	S	N	-	S	-	1- Medir tensão 2- Verificar conexão 3- Verificar vazamento 4- Completar nível do eletrólito 5- Inspecionar retificador	1 2 3 4 5	1 -Quadrimes-tral E 2- Quadrimes-tral E 3- Quadrimes-tral E 4- Quadrimes-tral E 5- Diária O
Banco de baterias 24 Vcc para o sistema de controle de potência	Não fornece energia	- Bateria descarregada; - Falha no retificador; - Falha no elemento da bateria; - Mau contato.	S	N	S	B	N	-	S	N	-	S	-	1- Medir tensão 2- Verificar conexão 3- Verificar vazamento 4- Completar nível do eletrólito 5- Inspecionar retificador;	1 2 3 4 5	1- Quadrimes-tral E 2- Quadrimes-tral E 3- Quadrimes-tral E 4- Quadrimes-tral E 5- Diária O

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade																
Seleção de Tarefas																
Sistema: TG-8301A		Subsistema: Corrente Contínua									Revisão: 0			Data: 27/06/2002		7/7
Função: 5								Falha Funcional: 5.1								
Componente	*Modo de Falha*	*Causas*	*E*	*S*	*O*	*C*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Tarefas Candidatas*	*Sel.*	*Freq. Est.*
Banco de baterias 125 Vcc para o NETCOM e para bomba auxiliar de óleo do gerador	Não fornece energia	- Bateria descarregada; - Falha no retificador; - Falha no elemento da bateria - Mau contato.	S	N	S	B	N	-	S	N	-	S	-	1- Medir tensão 2- Verificar conexão 3- Verificar vazamento 4- Completar nível do eletrólito 5- Inspecionar retificador	1 2 3 4 5	1- Quadrimes-tral E 2- Quadrimes-tral E 3- Quadrimes-tral E 4- Quadrimes-tral E 5- Diária O
Retificadores	Não fornece energia	- Falha nos cartões; - Queima de fusível; - Curto circuito no cabo de alimentação do retificador; - Mal contato; - Desarme do disjuntor; - Falhas nos ajustes do retificador.	S	N	S	B	N	-	S	N	-	S	-	1- Verificar tensão/corrente 2- Teste de lâmpada 3- Inspecionar condições da bateria/sinalizações 4- Inspeção do retificador; 5- Preventiva do retificador	1 2 3 4 5	1- Quadrimes-tral E 2- Quadrimes-tral E 3- Quadrimes-tral E 4- Diária O 5- Anual E

Tab. 6.14 - Diagrama de decisão para seleção de tarefas - sub-sistema Corrente Contínua.
Fonte: Diniz (2002)

Seguindo-se os mesmos passos descritos no item 6.3.1, todos os modos de falha de cada componente foram reavaliados com relação ao impacto na segurança, saúde e meio ambiente. A tabela 6.15 mostra o grau de risco avaliado, considerando-se o maior grau obtido entre todos decorrentes dos diversos efeitos de cada modo de falha.

COMPONENTE	MODO DE FALHA	GRAU DE RISCO	TIPO DE FALHA	AFETA MASSI
Banco de baterias do Sistema de Incêndio (24 Vcc)	Não fornece energia	II	A / I	Sim
	Fornece energia abaixo do especificidado	II	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Banco de baterias do Sistema de Controle de Potência (24 Vcc)	Não fornece energia	III	A / I	Sim
	Fornece energia abaixo do especificidado	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B / I	Sim
Banco de baterias do NETCOM e bomba auxiliar de óleo do gerador (125 Vcc)	Não fornece energia	III	A / I	Sim
	Fornece energia abaixo do especificidado	III	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B C / I	Sim
Retificadores	Não fornece energia	II	A / I	Sim
	Fornece energia abaixo do especificidado	II	A / I	Sim
	Fuga de corrente	III	A B C / I	Sim

Tab. 6.15 - Maior grau de risco avaliado para cada modo de falha Sub-sistema Corrente contínua.

6.3.4 - Análise de resultados

Foram reavaliados os riscos envolvidos em 73 modos de falha, sendo 44 modos de falha do sub-sistema GERADOR, 17 modos de falha do sub-sistema CORRENTE ALTERNADA e 12 no sub-sistema CORRENTE CONTÍNUA.

Dos 73 modos de falha reavaliados, 65 deles afetam ou têm algum impacto na segurança, a saúde ocupacional ou meio ambiente. Oito dos modos de falha não tiveram impacto em MASSI.

Três modos de falha relacionados com a bomba de esgotamento da sala de cabos, não estavam previstos no relatório original da MCC. Estes modos de falha foram acresentados, considerando sua importância para a operação da planta.

Dos 65 modos de falha que impactam na segurança, 41 resultaram em falhas tipo A, 1 em falha tipo B, 1 em falha tipo BC, 20 em falhas tipo AB e 2 em falhas tipo ABC, o que está resumido na tabela a seguir.

	TIPO DE FALHA						
TOTAL	A	B	C	ABC	AB	BC	AC
73	48	1	0	2	21	1	0
100%	66%	1.4%	0%	2.7%	29%	1.4%	0%

Tab. 6.16 - Quantidades de falha x tipo de falha

Em relação ao grau de risco das falhas obteve-se os seguintes valores:

RISCO	I	II	III	IV	V
Qte. Falhas	0	18	47	6	2

Tab. 6.17 - Quantidade de falhas x grau de risco

GRAU DE RISCO	**TIPOS DE FALHAS**						
	A	**B**	**C**	**AB**	**AC**	**BC**	**ABC**
I	0	0	0	0	0	0	0
II	10	1	0	7	0	0	0
III	31	0	0	13	0	1	2
IV	6	0	0	0	0	0	0
V	1	0	0	1	0	0	0

Tab. 6.18 - Quantidades: grau de risco x tipo de falha

Conforme definido no item 5.2.2.3 o grau de risco III (MODERADO) é aceitável, desde que alguns controles sejam estabelecidos. O grau de risco II (SÉRIO) é indesejável, devendo-se tomar medidas para reduzi-lo para grau III ou menos. Segundo Hauge e Johnston (2001, p.39), o objetivo das tarefas de manutenção preditiva, preventiva e de busca de falhas ocultas é reduzir a probabilidade de um risco e consequentemente a sua magnitude, mas somente uma revisão de projeto pode reduzir a severidade de uma falha. As falhas

classificadas em grau de risco II ou III, são aquelas que Hauge e Johnston (2001, p.38) citam como pertencentes à "Zona Amarela" e que necessitam da análise de risco, referindo-se a situações em que os riscos envolvidos não são claros para aqueles que participam do grupo da MCC.

No relatório da MCC original as falhas com impacto na segurança foram:

- Sub-sistema Gerador: sistema de excitação, sistema digital de proteção, disjuntor 52-A15, válvulas de segurança e resistor de aterramento.

- Sub-sistema Corrente Alternada: nenhum dos modos de falha.

- Sub-sistema Corrente Contínua: nenhum dos modos de falha.

Considerando-se que cada componente citado tem 3 modos de falha, um total de 15 (21%) modos de falha afetam a segurança pelo relatório original da MCC, sem qualquer discriminação se a falha impacta no meio ambiente, saúde ocupacional ou segurança industrial. Também não há referência ao grau de risco envolvido nas falhas avaliadas, portanto sendo atribuida a mesma importância a todas.

As falhas que no estudo original da MCC foram consideradas como tendo impacto na segurança, foram classificadas como de grau de risco II ou III através da metodologia proposta. A tabela 6.19 mostra os dados de falhas com grau de risco II e III obtidos em cada estudo da MCC.

TIPOS DE FALHA Grau de risco II e III	**MCC COM ANÁLISE DE RISCO**	**MCC ORIGINAL**
A	41	não há informação
B	01	não há informação
C	00	não há informação
AC	00	não há informação
BC	01	não há informação
AB	20	não há informação
ABC	02	não há informação
TOTAL	65	15

Tab. 6.19 - Quantidade por tipo de falhas em cada MCC
(Grau de risco II e III)

Na tabela 6.20 mostram-se somente as falhas que resultaram em grau de risco II (SÉRIO) e as ações de mitigação ou reprojetos propostos. Para as falhas com grau de risco III

(ACEITÁVEL com controles) as ações de mitigação referem-se a execução das tarefas de manutenção propostas e adição de medidas de controle, acompanhamento ou sinalização julgadas importantes na reavaliação feita durante este trabalho. Na tabela 6.20 observa-se que medidas operacionais como "Operar em paralelo com as demais fontes" também reduzem a intensidade de um risco associado a determinado modo de falha.

COMPONENTE	MODO DE FALHA	GRAU DE RISCO	TIPO DE FALHA	AÇÃO OU REPROJETO
Trocador de Calor	Vazamento de água	II	A / I	Executar as tarefas BT recomendadas Operar em paralelo com as demais fontes
Sistema de proteção digital	Não funciona	II	A B / I	Executar as tarefas BT recomendadas Acompanhar alarme de autodiagnose do sistema
Sistema de proteção falta a terra no rotor	Não funciona	II	A / I	Executar as tarefas BT recomendadas Operar em paralelo com as demais fontes
Resistor de aterramento	Não funciona	II	A B / I	Executar as tarefas BT recomendadas Rever periodicidade de realização das tarefas Dermarcar área de segurança em torno do equipamento
	Funciona inadequadamente	II	A B / I	Executar as tarefas BT recomendadas Rever periodicidade de realização das tarefas Dermarcar área de segurança em torno do equipamento
	Fuga de corrente	II	A B / I	Executar as tarefas BT recomendadas Rever periodicidade de realização das tarefas
Disjuntor geral (480 V)	Não abre qdo. solicitado	II	A B / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar alimentação elétrica redundante para o quadro de 208 Vca . Uso obrigatório de EPIs adequados
	Abre indevidamente	II	A / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar alimentação elétrica redundante para o quadro de 208 Vca
Transformador 30 KVA 480/208-120 V	Não funciona	II	A / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar alimentação elétrica redundante para o quadro de 208 Vca
Disjuntor geral (208 V)	Não abre qdo. solicitado	II	A B / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar alimentação elétrica redundante para o quadro de 208 Vca Uso obrigatório de EPIs adequados
	Abre indevidamente	II	A / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar alimentação elétrica redundante para o quadro de 208 Vca

COMPONENTE	MODO DE FALHA	GRAU DE RISCO	TIPO DE FALHA	AÇÃO OU REPROJETO
Barramentos do Q.D.	Interrupção da corrente	II	B / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Uso obrigatório de EPIs adequados
Disjuntores de saída	Não abre qdo. solicitado	II	A B / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Uso obrigatório de EPIs adequados
	Abre indevidamente	II	A / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Prever disjuntores sobressalentes para o quadro de 208 Vca
Banco de baterias do Sistema de Incêndio (24 Vcc)	Não fornece energia	II	A / I	Executar as tarefas BT recomendadas Analisar: redundância do conjunto retificador/baterias ou alimentação de outra fonte alternativa
	Fornece energia abaixo do especificidado	II	A / I	Deve ser revisto projeto para reduzir grau de risco de II para III. Analisar: redundância do conjunto retificador/baterias ou alimentação de outra fonte alternativa
Retificadores	Não fornece energia	II	A / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar sistema redundante 24 Vcc para alimentação dos equipamentos de combate à incêndio
	Fornece energia abaixo do especificidado	II	A / I	Executar as tarefas de BT recomendadas Avaliar viabilidade de instalar sistema redundante 24 Vcc para alimentação dos equipamentos de combate à incêndio

Tab. 6.20 - Componentes e modos de falha dos três subsistemas com grau de risco II

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação propôs a introdução de melhorias na metodologia da MCC-Manutenção Centrada em Confiabilidade para reduzir a subjetividade no julgamento do especialista na etapa de classificação dos modos de falha no Diagrama de Decisão, através de mecanismos que auxiliem a definição da existência de impacto na segurança industrial, meio ambiente ou na saúde das pessoas. A proposta introduziu uma contribuição ao método da MCC através da implementação de uma Lista de Verificação e de um Guia de Análise de Riscos para cada modo de falha da planilha da FMEA, estabelecendo-se um elo com o diagrama de decisão da metodologia da MCC.

Os resultados mostram que é possível executar os passos do diagrama de decisão dos estudos da MCC com uma metodologia adequada e simples para tratamento dos riscos de segurança envolvidos com a realização de atividades de manutenção. Estabeleceu-se um elo entre a MCC e a análise de riscos, reduzindo-se a dependência da experiência do analista e ampliando o enfoque da segurança industrial com introdução das conseqüências à saúde ocupacional e ao meio ambiente na tabela de severidade.

A introdução de técnicas de análise de risco na metologia da MCC permitiu uma classificação detalhada dos tipos de falha relacionados com a segurança industrial, meio ambiente e saúde ocupacional, a abrangência ou extensão destas falhas em relação aos limites físicos da área industrial e o conhecimento qualitativo do risco (severidade x probabilidade) de cada modo de falha para a instalação. Tais informações não estavam disponíveis com a elaboração da MCC original, mostrando que o uso da avaliação de risco contribui para o aprofundamento das análises no diagrama ou árvore de decisão.

As melhorias propostas na sistemática foram aplicadas em um caso real utilizando dados do sistema de geração de uma refinaria de petróleo de grande porte, mais especificamente dos sub-sistemas relacionados à especialidade elétrica: gerador, sistema auxiliar de corrente alternada e sistema auxiliar em corrente contínua. Entretanto, a sistemática desenvolvida nesta dissertação é aplicável a qualquer sub-sistema do turbo-gerador ou a outros equipamentos cujos benefícios de aplicação da MCC estejam definidos.

O uso da análise de risco na MCC do TG-8301 da RLAM permitiu conhecer quais os componentes do equipamento, entre aqueles pertencentes aos sub-sistemas estudados nesta dissertação, que apresentam maior risco sob o ponto de vista de MASSI. Os resultados obtidos mostram que estes componentes são: trocador de calor, sistema de proteção digital, sistema de proteção de falta à terra no rotor, resistor de aterramento, disjuntor geral de 480V,

transformador de 480/208-120 V, disjuntores e barramentos do quadro de distribuição de corrente alternada, banco de baterias 24 Vcc do sistema de incêndio e os retificadores. Estes sistemas apresentaram grau de risco II (SÉRIO), requerendo medidas mitigadoras que reduzam este grau.

As medidas mitigadoras indicadas para redução do grau de risco foram definidas de forma a manter aquelas que foram recomendadas no estudo original da MCC, basicamente tarefas de manutenção preventivas ou preditivas, e acrescentando-se outras julgadas relevantes para redução de severidade de conseqüências ou de probabilidade de ocorrência dos modos de falha que não estavam previstas no relatório original. Entre as medidas acrescentadas, algumas são de execução simples, mas de grande impacto no grau de risco: uso de equipamentos de proteção individual, colocação de sinalização e avisos nos locais perigosos, demarcação de área de risco e alteração no modo de operação do equipamento. Em alguns casos, principalmente relacionados a componentes dos sistemas auxiliares, medidas como redundância de alimentação elétrica ou componentes e previsão de sobressalentes são eficazes na redução de riscos de segurança.

Como recomendação para trabalhos futuros a serem desenvolvidos, sugere-se:

- análise para introdução de métodos quantitativos de análise de risco, sobretudo para os modos de falha cujas conseqüências apresentem grau de risco I ou II;
- desenvolvimento de uma ferramenta computacional que gerencie a base de dados de modos de falha de equipamentos submetidos à análise de risco na MCC;
- aplicação da sistemática proposta de análise de risco na MCC de um equipamento que não possua um plano de manutenção definido através desta metodologia;
- introdução de métodos para determinação da periodicidade ótima de execução de tarefas de manutenção em componentes cujos modos de falha tenham impacto em MASSI.

REFERÊNCIAS

ADJAYE, R. E. Design and optimised operation with reliability centred maintenance. In: ELECTRICAL SAFETY IN HAZARDOUS ENVIRONMENTS CONFERENCE, n.390, 1994, IEE, 1994. p.165-171.

Agência Européia para a Segurança e a Saúde no Trabalho. **Avaliação econômica da prevenção dos acidentes de trabalho ao nível das empresas.** *Belgium,* 2002. Disponível em: http://agency.osha.eu.int/publications/factsheets/28. Acesso em: 01/mar/2004.

ARAÚJO E LIMA, J. C. de (Coord.). **Manual de análise de risco e de confiabilidade**. Rio de Janeiro: Petrobras/Reduc, [199-].

BARREIRO, S. R. **Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC para formulação do plano de manutenção do sistema de compressão de gás residual da unidade PSA**. 1999. Dissertação de mestrado - Engenharia mecânica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

BERTLING, L.; ERIKSSON, R.; ALLAN, R. N. Relation between preventive maintenance and reliability for a cost-effective distribution system. In: POWER TECH CONFERENCE, 2001, Porto-Portugal. **Proceedings:** IEEE, 2000. Não paginado.

BILLINTON, R. ; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Engineering Systems - Concepts and Techniques.** 2nd. ed. New York: Plenum, 1992.

CARNEIRO FILHO, T. **Inspeções de segurança.** Maceió: Editora da Universidade Federal de Alagoas, 1985.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. **Guidelines for hazard evaluation procedures**: with worked examples. 2nd ed. New York , 1992.

D'ADDIO, G. F.; FIRPO, P.; SAVIO, S. Reliabitity centered maintenance: A solution to optimise mass transit system cost effectiveness. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN MASS TRANSIT SYSTEMS, n.543, 1998, IEE, 1998. p.211-216.

DET NORSKE VERITAS - PRINCIPIA. **Metodologia de Análise Preliminar de Perigo**. 2003.

DHILLON, B. S. **Reliability engineering in systems design and operation.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

DINIZ, F. L. B. , **Manutenção Centrada em Confiabilidade.** Apostila de curso. Salvador: DNV Principia, 2001.

DINIZ, F. L. B. et al. **Aplicação de MCC no sistema de turbina a gás (TG-8301) da RLAM**. Relatório. Salvador: Petrobras e DNV, 2002

DINIZ, F. L. B. et al. **Aplicação de MCC no sistema de geração de vapor da caldeira GV-3901 da RLAM**. Relatório. Salvador: Petrobras e DNV, 2003

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Use of Reliability-Centered Maintenance for the McGuire Nuclear Station Feedwater System**. Relatório EPRI NP-4795, 1986.

ENDRENYI, J. et al. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability**. IEEE Transactions on Power Systems,** Risk and Probability Applications Subcommitte, E.U.A, vol. 16, n. 4, p.638-646, nov. 2001.

FARQUHARSON, J. A.; MCDUFFEE, J. L. Using quantitative analysis to make risk-based decisions. In: ANNUAL RELIABLITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2003, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2003. p.170-176.

FERREIRA, N. R.; LIMA, J. E. P.; RAPOSO, J. L. O. **Aplicação de manutenção centrada em confiabilidade em sistemas elétricos**. 2003. Projeto de Pesquisa - Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador.

GRAMACHO, W. N. **Análise de risco adaptada ao processo em mina subterrânea**. 2002. Dissertação de mestrado em andamento - Engenharia de Minas, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

HAUGE, B. S. et al. Reliability-centered maintenance on the space shuttle program. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2000, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2000. p.311-316.

HAUGE, B. S. Optimizing intervals for inspection and failure-finding tasks. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2002, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2002. p.14-19.

HAUGE, B. S.; JOHNSTON, D. C. Reliability centered maintenance and risk assessment. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2001, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2001. p.36-40.

HOLMBERG, K.; FOLKESON, A. **Operational Reliability and Systematic Maintenanc**e. England : Elsevier Science Publishers, 1991.

JOHNSTON, D. C. Measuring RCM implementation. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2002a, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2002. p.511-515.

JOHNSTON, D. C. Plausible reasoning theory in reliability-centered maintenance analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2002b, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2002. p.367-371.

JOHNSTON, D. C. Simulation in RCM training. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2001, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2001. p.235-239.

KBC Advanced Technologies Inc., **Eliminação de Defeitos.** Apostila de curso. Salvador: 2004.

KING, R.W.; MAGID, J. **Industrial hazard and safety handbook**. London, UK: Newnes-Butterworths, 1979.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEES, F. P. **Loss prevention in the process industries.** 1st. ed. rev. atual. London, UK: Butterworth-Heinemann, 1991. 2 v.

MELO, C. H. de et al. Avaliação de riscos para priorização do plano de segurança. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2002, Niterói. Universidade Federal Fluminense - Centro Tecnológico - Escola de Engenharia. p.1-9.

MONCHY, F. **La Fonction Maintenance**. Paris: Masson, 1987.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. London : Butterworth Heinemann, 1992.

MOUBRAY, J. **Manutenção centrada em confiabilidade**. 3a. ed. aum. Lutterworth : Aladon, 2000.

MOUBRAY, J. **The case against streamlined RCM**. 2000. Disponível em: < http://www.aladon.co.uk/08ap.html >. Acesso em: 11/mai/2003.

NICHOLS, J. .; MATUSHESKI, B. **Maintaining Substation Reliability Using an Asset Management Strategy.** Electricity Today, Oct./Nov 2000. Disponível em: < http://www.electricity-today.com/et/oct00/asset.htm >. Acesso em: 15/abr/2004.

NUNES, E. L. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada**. 2001. Dissertação de mestrado - Engenharia de produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

O'CONNOR, P. D. T.; NEWTON, D; BROMBLEY, R. **Practical reliability enginneering.** 3th. ed. rev . Chichester: John Wiley & Sons, 1998.

PINTO, A. K. ; XAVIER, J. de A. N. **Manutenção: função estratégica.** 2a. ed. rev. amp. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

REDER, W.; FLATEN, D. Reliability centered maintenance for distribution underground systems. In: [S.I.], 2000, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 2000. p.551-556.

ROVISCO, I. **Tipos de análise de Risco.** Disponível em: < http://www.dct.fct.unl.pt/ Ensino/cursos/Disc/Geoamb/Analiserisco.pdf > . Acesso em: 25/fev/2004.

SEIXAS DE OLIVEIRA, L. F. O estágio atual da aplicação de confiabilidade na indústria brasileira de processos químicos. In: IV ENCONTRO TÉCNICO SOBRE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE, 1995, Rio de Janeiro/RJ. PETROBRAS. p.1-10.

SHERWIN, D. J. A constructive critique of Reliability-centered maintenance. In: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1999, IEEE. **Proceedings:** IEEE, 1999. p.238-244.

SMITH, A. M. **Reliability-centered maintenance.** New York: McGraw-Hill, 1993

ZOCCHIO, A. **Prática da prevenção de acidentes - ABC da segurança do trabalho.** 5a. ed. rev. amp. São Paulo: Atlas, 1992.

APÊNDICE A - Formulário do Guia de Avaliaçao de Risco

SUBSISTEMA :
COMPONENTE :
MODO DE FALHA :

	GRUPO DE EFEITOS	PERIGO PROVOCADO PELO EFEITO DA FALHA. O efeito do modo de falha implica em :	SELEÇÃO	TIPO	EXTENSÃO	SEVERIDADE (Y)	FREQUENCIA (F)	GRAU DE RISCO	Afeta MASSI ?	AÇÃO RECOMENDADA
1	EFEITOS SOBRE INVENTÁRIOS PERIGOSOS									
		Ignição de materiais inflamáveis								
		Combustão de materiais								
		Instabilidade em materiais								
		Corrosão nos demais equipamentos								
		Liberação de produtos asfixiantes								
		Choques em materiais sensíveis								
		Liberação de materiais altamente reagentes								
		Liberação de gases tóxicos								
2	CONDIÇÕES FÍSICAS EXTREMAS									
		Elevação de temperatura								
		Redução para temperaturas criogênicas								
		Elevação de pressão								
		Formação de vácuo								
		pressões								
		Vibrações / golpes de ariete								
		Liberação de radiação ionizante								
		Elevação de tensão ou corrente								
		Corrosão								
		Erosão								
		Acúmulo de eletricidade estática								
		Aquecimento de superfícies								
3	TRANSTORNOS OPERACIONAIS									
3.1	VARIÁVEIS DE PROCESSO									
		Desvio na pressão								
		Desvio na temperatura								
		Desvio na vazão								
		Desvio na concentração								
		Alteração na mudança de fase/estado								
		Aumento de impurezas								
		Desvio na taxa de reação /reação de calor								
		Sub/Sobrecorrente elétrica								
		Sub/Sobretensão elétrica								
3.2	REAÇÕES EXPONTÂNEAS									
		Polimerização								
		Reação fugitiva								
		Explosão interna								
		Decomposição								
3.3	FALHAS DE CONTENÇÃO									
		Rompimento de tubulação, tanques, vasos de pressão, juntas/selos, diques								
		Fuga de corrente elétrica								
		Perdas térmicas								
3.4	FUNCIONAMENTO INADEQUADO DE EQUIPAMENTOS/SISTEMAS									
		Bombas, válvulas, instrumentos, sensores, intertravamentos.								
		Fornos, flares, incineradores								
		Veículos								
		Chaves e disjuntores elétricos								
		Sistemas de proteção/segurança/detecção/alívio								

		Sistemas de								
		Sistemas de isolação elétrica ou térmica								
		Sistemas de alarmes/sinalização/avisos								
		Sistemas de back-up/emergência								
		Sistemas de abrigo, evacuação, fuga								
		Sistemas/Equipamentos elétricos para atmosfera potencialmente explosiva								
3.5	**PERDA DE UTILIDADES**									
		Energia elétrica								
		Nitrogênio								
		Água								
		Refrigeração								
		Ar								
		Fluídos de transferência de calor								
		Vapor								
		Ventilação								
		Óleo combustível								
		Gás								
4	**EFEITO DOMINÓ**									
		Outras falhas em cadeia								
5	**ESTRUTURAS**									
		Desabamento								
		Trincas								
6	**FENÔMENOS QUÍMICOS / FÍSICOS**									
		Descarga/arco elétrico								
		Flash e evaporação								
		Concentração/mistura (gases)								
		Fogo/Incêndio								
		Explosões								
		Formação de projéteis.								
		Detonações								
		Condensação								
7	**ACELERAÇÃO DESCONTROLADA**									
		Movimento inadvertido								
		Ejeção de jatos de líquidos								
		Translação de objetos soltos								
8	**DESACELERAÇÃO DESCONTROLADA**									
		Impactos (parada brusca)								
		Falha de freio, volantes, pneus, etc.								
		Queda de objetos								
		Fragmentos ou projéteis.								
9	**REAÇÃO QUÍMICA**									
		Desassociação								
		Combinação								
		Corrosão								
10	**FALHA EM COMPONENTES ELÉTRICOS**									
		Choque								
		Queimaduras								
		Sobreaquecimento								
		Ignição de combustíveis								
		Ativação inadvertida								
		Explosão (causa elétrica)								
11	**EXPLOSÕES**									
		Explosão de produtos comerciais								
		Explosão de gás								
		Explosão de líquido								
		Explosão de poeira								
12	**FOGO E INFLAMABILIDADE**									
		Formação de combustíveis - sólidos, líquidos, gasosos								
		Formação de oxidante forte - oxigênio, peróxido, etc,								
		Formação de fonte de ignição - acendedores, aquecedores								
13	**CALOR E TEMPERATURA**									
		Fonte de calor (não elétrica)								
		Queimadura devido superfícies quentes								

		Queimadura devido superfícies muito frias								
		Aumento de pressão de gás								
		Aumento de inflamabilidade de gás								
		Aumento de volatibilidade de gás								
		Aumento de atividade de gás								
14	**FALHA EM EQUIP. MECÂNICOS**									
		Formação de pontas ou bordas ponteagudas								
		Falha em equipamentos rotativos								
		Falha em equipamentos alternativos								
		apertados								
		Falha durante elevação de cargas								
		Instabilidade/tendência de queda								
		Ejeção de partes ou fragmentos								
		Lubrificação excessiva								
15	**SOBREPRESSÃO**									
		Em gás comprimido								
		Em ferramentas de ar comprimido								
		Ativa o sistema de exaustão								
		Alívio acidental								
		Impulsão de objetos								
		Em tubulações								
		Movimento brusco de mangueiras flexíveis								
16	**FALHAS EM EQUIPAMENTOS ESTÁTICOS**									
		Ruptura de carcaça, paredes ou abrigo								
		Sobrepressão								
		Efeitos sob pressão negativa								
17	**VAZAMENTOS DE SUBSTÂNCIAS PERIGOSAS**									
		Formação de misturas inflamáveis								
		Liberação de substâncias tóxicas								
		Liberação de substâncias corrosivas								
		Formação de mistura escorregadia								
		Contaminação de produtos								
		Contaminação da água								
		Contaminação do ar								
		Contaminação do solo								
18	**EMISSÕES RADIATIVAS**									
		Ionizantes								
		Ultravioleta								
		Luz de alta intensidade								
		Infravermelho								
		Laser								
		Eletromagnéticas								
19	**EMISSÕES TÓXICAS**									
		Gases ou líquidos asfixiantes								
		Gases ou líquidos irritantes								
		Gases ou líquidos venenosos								
		Gases ou líquidos carcinogênicos								
		Gases ou líquidos mutagênicos								
		Produto de combinação								
		Produto de combustão								
20	**AUMENTO DE VIBRAÇÃO**									
		Vibração em ferramentas								
		Aumento do nível de ruído								
		Fadiga Mental								
		Jato ou fluxo de fluídos								
		Alteração na frequência sonora								