

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
VII CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO INDUSTRIAL  
PRODUÇÃO E MANUTENÇÃO**

**LEANDRO ROBERTO BARAN**

**MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA  
NA REDUÇÃO DE FALHAS: UM ESTUDO DE CASO**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2011**

**LEANDRO ROBERTO BARAN**

**MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA  
NA REDUÇÃO DE FALHAS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Industrial: Produção e Manutenção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. MSc. Flávio Trojan

**PONTA GROSSA**

**2011**



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS PONTA GROSSA**  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Título da Monografia

**MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA REDUÇÃO DE FALHAS:  
UM ESTUDO DE CASO**

por

**Leandro Roberto Baran**

Esta monografia foi apresentada no dia 10 de dezembro de 2012 como requisito parcial para a obtenção do título de ESPECIALISTA EM GESTÃO INDUSTRIAL: PRODUÇÃO E MANUTENÇÃO. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Guataçara dos Santos Junior**  
(UTFPR)

**Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson**  
(UTFPR)

**Prof. Msc. Flavio Trojan (UTFPR)**  
Orientador

Visto do Coordenador:

---

**Prof. Dr. Guataçara dos Santos Junior**  
Coordenador ESPGI-PM  
UTFPR – Campus Ponta Grossa

**A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Secretaria**

## **AGRADECIMENTOS**

Neste momento agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus sem o qual não seria possível essa conquista, fornecendo a proteção, sabedoria e ânimo necessário para vencer esta jornada.

Ao Professor Dr. Flávio Trojan, pela amizade e fundamentos transmitidos durante a graduação e principalmente pela orientação e voto de confiança na realização deste trabalho.

Aos docentes do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e em especial à Prof. Dr.<sup>a</sup> Simone Nasser pelos primeiros conselhos durante o início do curso.

Aos meus pais que acreditaram nesse sonho e não mediram esforços para que eu pudesse concretizá-lo, estando sempre ao meu lado com todo o apoio necessário.

A minha noiva Fabiane Erdmann, por todo apoio, amor e companheirismo demonstrados nesse ano que foram fundamentais não só na conclusão deste trabalho, mas também nos passos mais importantes da minha vida.

A todos os meus amigos por contribuírem, cada um à maneira, com a realização deste trabalho, em especial ao companheiro de curso Ademir Piechnicki por dividir todas as dificuldades e sucessos durante este ano.

Ao SENAI, por contribuir não só com o apoio financeiro, mas por minha formação como profissional e cidadão, em especial ao amigo Flávio Piechnicki pelos conselhos e pela ajuda profissional.

A todos vocês meu muito obrigado.

## RESUMO

BARAN, Leandro Roberto. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada na Redução de Falhas**: um estudo de caso. 2011. 102 fls. Monografia (Especialização em Gestão Industrial: Produção e Manutenção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011.

Os sistemas industriais contemporâneos são obrigados a operar dentro de limites, parâmetros e metas estabelecidas, objetivando redução de custos e a garantia da disponibilidade e confiabilidade. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é uma técnica que pode auxiliar organizações a desenvolverem um programa de manutenção sistemática, atingindo os objetivos em relação ao custo-benefício de forma eficaz. A MCC combina outras técnicas e ferramentas em uma metodologia estruturada para seleção das ações de manutenção, reduzindo os custos e atividades desnecessárias e aumentando a confiabilidade do sistema, através da redução de ocorrências das falhas. O modelo de implantação proposto nesse trabalho é composto das etapas: (i) seleção do sistema e coleta de informações; (ii) identificação das funções e falhas funcionais do sistema; (iii) análise crítica dos modos de falha e efeitos (FMECA); (iv) seleção das atividades de manutenção; (v) plano de manutenção; e (vi) melhoria contínua. Este trabalho descreve a metodologia para implantação da MCC visando reduzir as falhas funcionais de Sistema de Controle de Tensão, de um Processo de Laminação, selecionando os componentes críticos e identificando atividades de manutenção com base no contexto operacional de cada componente e as consequências decorrentes de suas falhas.

**Palavras-chave:** Manutenção; Manutenção Centrada em Confiabilidade; Implantação; Análise de Falhas.

## ABSTRACT

BARAN, Leandro Roberto. **Reliability Centered Maintenance applied in reduction of failures**: a case study. 2011. 102 fls. Monograph (Specialization in Industrial Management, Production and Maintenance) - Federal Technological University of Parana. Ponta Grossa, 2011.

The contemporary industrial systems are required to operate within limits, parameters and targets set, aimed at reducing costs and ensuring the availability and reliability. The Reliability Centered Maintenance (RCM) is techniques that can help organizations develop a systematic maintenance program to reach the goals effectively with a lower cost. The RCM combines other techniques and tools in a structured methodology for the selection of maintenance actions, reducing costs and unnecessary activities and increasing system reliability by reducing the occurrence of failures. The deployment model proposed in this work consists of steps: (i) system selection and data collection; (ii) identification of functions and functional failures of the system, (iii) Failure Mode Effects & Criticality Analysis (FMECA), (iv) selection of maintenance activities; (v) maintenance plan, and (vi) continuous improvement. This paper describes the methodology for implantation of MCC to reduce the functional failures of System Voltage Control of a lamination process, selecting critical components and identifying maintenance activities based on the operational context of each component and the consequences of their failures.

**Keywords:** Maintenance, Reliability Centered Maintenance, Implantation, Failure Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução temporal da manutenção .....	18
Figura 2: Desenvolvimento das técnicas de manutenção .....	21
Figura 3: Técnicas de manutenção .....	26
Figura 4: Evolução da MCC .....	30
Figura 5: Diagrama de Implantação da MCC .....	32
Figura 6: Diagrama de Blocos para uma Malha de Controle de Velocidade .....	35
Figura 7: Intervalo P-F .....	38
Figura 8: Curva da Banheira .....	39
Figura 9: Padrões de Falha .....	40
Figura 10: Fluxo de Aplicação do FMECA .....	44
Figura 11: Consequências de um modo de falha em vários níveis .....	45
Figura 12: Matriz de Criticidade.....	51
Figura 13: Fluxo de Decisão das Funções Significativas .....	53
Figura 14: Níveis de avaliação das consequências.....	55
Figura 15: Formulário para registro das consequências das falhas .....	55
Figura 16: Formulário de Análise Decisional.....	61
Figura 17: Diagrama Decisional .....	63
Figura 18: Modelo de implantação da MCC .....	67
Figura 19: Planilha de Descrição do Sistema.....	71
Figura 20: Diagrama Funcional do Controle de Tensão .....	72
Figura 21: Análise de Criticidade dos Componentes do Sistema.....	75
Figura 22: Formulário de Análise FMECA.....	78
Figura 23: Diagrama de seleção das tarefas em função do RPN.....	79
Figura 24: Formulário do Esquema Decisional.....	80
Figura 25: Formulário Diagrama Decisional .....	81
Figura 26: Média mensal de falhas de tensionamento .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de Severidade .....	47
Tabela 2 – Níveis de Frequência.....	48
Tabela 3 – Níveis de Detecção .....	50
Tabela 4 – Parâmetros de Criticidade .....	73

## LISTA DE SIGLAS

ATA	<i>Air Transport Association of America</i>
CA	Análise de Criticidade
CBM	Manutenção Baseada em Condições
DoD	Departamento de Defesa Americano
ECM	<i>Experience-Centered Maintenance</i>
EOE	Evidente Operacional/Econômica)
ESA	Evidente Segurança/Ambiental)
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
FF	Falhas Funcionais para cada Função
<i>FMEA</i>	Análise dos Modos de Falha e Efeitos
<i>FMEA</i>	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
<i>FMECA</i>	<i>Failure Mode Effects &amp; Criticality Analysis</i>
<i>FMECA</i>	Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MSG	<i>Maintenance Steering Group</i>
OOE	Oculto Operacional/Econômica);
OSA	Oculto Segurança/Ambiental
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
<i>RPN</i>	Número de risco
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
TBM	Manutenção Baseada no Tempo
TPM	Manutenção Produtiva Total
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 TEMA E JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1    Objetivo Principal .....	14
1.2.2    Objetivos Específicos.....	14
1.3 MÉTODO DE PESQUISA .....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1 MANUTENÇÃO .....	17
2.2 CONCEITO DE MANUTENÇÃO.....	17
2.3 EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	18
2.3.1    Primeira Geração .....	19
2.3.2    Segunda Geração .....	19
2.3.3    Terceira Geração .....	20
2.4 CLASSIFICAÇÃO DE MANUTENÇÃO .....	22
2.4.1    Manutenção Corretiva.....	22
2.4.2    Manutenção Preventiva .....	23
2.4.3    Manutenção Preditiva .....	24
<b>3 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE .....</b>	<b>27</b>
3.1 FUNDAMENTOS DA MCC .....	27
3.1.1    Objetivos do MCC .....	28
3.1.2    Histórico da MCC.....	29
3.2 PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO.....	30
3.3 FUNÇÕES DO SISTEMA .....	32
3.3.1    Nível de análise.....	32
3.3.2    Seleção do sistema e coleta de informações.....	33
3.3.2.1 Coleta de informações .....	33
3.3.3    Identificação do sistema.....	34
3.3.3.1 Documentação.....	34
3.3.3.2 Limites e interfaces do sistema .....	35
3.3.3.3 Contexto operacional .....	36
3.3.4    Funções do Sistema .....	36
3.4 ANÁLISE DAS FALHAS.....	37
3.4.1    Classificação das Falhas .....	37
3.4.2    Mecanismos de Falhas .....	39
3.4.3    Modos de Falha .....	41
3.4.3.1 Causas de falhas .....	41

3.5 DOCUMENTAÇÃO DAS FALHAS.....	42
3.5.1    Análise FMEA .....	42
3.5.2    Análise FMECA.....	43
3.5.2.1 Fluxo de aplicação do FMECA.....	44
3.5.2.2 Planilha de análise .....	44
3.6 EFEITOS DAS FALHAS .....	45
3.6.1.1 Classificação dos efeitos.....	46
3.6.1.2 Severidade .....	46
3.6.1.3 Frequência .....	47
3.6.1.4 Análise de criticidade .....	48
3.6.1.4.1 Avaliação do risco.....	49
3.6.1.4.2 Nível de detecção .....	50
3.6.1.5 Aceitabilidade do risco .....	50
3.6.1.5.1 Matriz de criticidade .....	51
3.7 ANÁLISE E DECISÃO .....	51
3.7.1    Consequências das Falhas .....	52
3.7.2    Funções Significantes .....	52
3.7.2.1 Evidência da falha.....	53
3.7.2.2 Impactos ambientais e de segurança.....	54
3.7.2.3 Impactos operacionais e econômicos .....	54
3.7.3    Lógica de Decisão.....	54
3.7.4    Aplicabilidade da manutenção .....	56
3.7.4.1 Denominação das atividades .....	57
3.7.4.1.1 Inspeção preditiva.....	57
3.7.4.1.2 Reparação preventiva.....	58
3.7.4.1.3 Substituição preventiva.....	58
3.7.4.1.4 Detecção de falha .....	59
3.7.4.1.5 Reparo funcional.....	59
3.7.4.1.6 Mudança de projeto .....	60
3.7.5    Efetividade da manutenção.....	60
3.7.6    Seleção das atividades .....	60
3.7.7    Periodicidade das atividades.....	64
3.8 PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO E REVISÃO.....	65
<b>4 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>66</b>
4.1 MODELO PROPOSTO DE IMPLANTAÇÃO.....	66
4.2 APLICAÇÃO DO MCC NO CONTROLE DE TENSÃO .....	68
4.2.1    Seleção do Sistema e Coleta de Informações .....	68
4.2.1.1 Estudo e embasamento teórico .....	69
4.2.2    Identificação das Funções e Falhas do Sistema .....	69
4.2.2.1 Fronteiras e interfaces .....	70
4.2.2.2 Diagramas funcionais.....	70

4.2.3	Seleção dos subsistemas.....	73
4.2.4	Seleção dos Componentes Críticos .....	73
4.2.5	Análise FMECA.....	76
4.2.6	Seleção das atividades de manutenção.....	76
4.2.6.1	Plano de manutenção .....	77
4.2.7	Processo de Atualização e Melhoria Contínua da Análise.....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE A - Diagramas funcionais utilizados na análise MCC.....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE B - Formulário de Análise de Criticidade do Componente.....</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE C - Classificação ABC .....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE D - Critérios de Aplicabilidade e Efetividade.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O ambiente econômico contemporâneo evidencia a necessidade de mudar o contexto no qual a função da manutenção é vista dentro das organizações, deixando de ser apenas uma despesa necessária, para ser enfatizada como uma ferramenta estratégica para o sucesso da organização.

As atuais políticas de gestão resultam em estoques cada vez menores, processos mais enxutos e sistemas dimensionados praticamente no limite de sua capacidade operacional, que fazem da manutenção uma ferramenta fundamental na garantia da disponibilidade e confiabilidade das empresas. Esses fatores refletem a necessidade de um planejamento de manutenção eficiente, com atividades que se adaptem ao processo de produção, estabelecidas em função da prioridade desse processo, atendendo a prazos, metas e a um melhor custo-benefício.

Tsang (2002) afirma que o desenvolvimento de técnicas e métodos de manutenção deve fazer frente à:

- ✓ estratégias atuais de operação,
- ✓ expectativas de preservação ambientais e de segurança por parte da sociedade,
- ✓ mudanças tecnológicas crescentes e,
- ✓ mudanças organizacionais.

Existem várias metodologias, políticas e métodos que auxiliam na gestão das atividades e custos relacionados à manutenção dos sistemas, entre as mais utilizadas estão: a Manutenção Produtiva Total, TPM (do inglês *Total Productive Maintenance*) e a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, MCC ou RCM, do inglês (*Reliability Centered Maintenance*).

### 1.1 TEMA E JUSTIFICATIVA

A pesquisa está relacionada ao tema gestão da manutenção, especificamente no desenvolvimento de um modelo orientado e adaptado para redução e prevenção de falhas em sistemas industriais, através da ferramenta MCC.

Políticas tradicionais de manutenção disseminam a crença de que todas as falhas são ruins e devem ser evitadas, contudo, uma análise mais detalhada confronta essa afirmação sob dois aspectos:

- (i) muitas vezes, do ponto de vista técnico, não é viável evitar uma falha;
- (ii) mesmo que todas as falhas pudessem ser evitadas qual seria o custo dessa ação?

Deshpande (2002) afirma que a metodologia MCC oferece uma estrutura capaz de reduzir as atividades de manutenção e os custos relacionados à elas ao mínimo possível, sem afetar o desempenho da planta, qualidade do produto, a segurança ou a integridade ambiental.

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de abordar a implantação da MCC na redução de falhas em um subsistema industrial. Embora a literatura apresente materiais relacionados aos conceitos técnicos e etapas de implantação da MCC, grande parte destina-se a plantas de grande e médio porte, ou aplicações em sistemas e equipamentos que não possuem uma política de manutenção definida. Porém poucos abordam a implantação da MCC no controle e redução de falhas de sistemas e subsistemas com um número reduzido de componentes, onde já existe um plano de manutenção definido.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a metodologia MCC, criando um modelo orientado e adaptado para redução e prevenção de falhas em sistemas industriais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- (i) apresentar um estudo bibliográfico atualizado do tema Manutenção Centrada em Confiabilidade;

- (ii) conceituar a manutenção, seus métodos, planejamento e ações com foco orientado para Manutenção Centrada em Confiabilidade;
- (iii) descrever e analisar a aplicação de um modelo proposto de implantação da MCC, adaptado para redução das falhas funcionais de um Sistema de Controle de Tensão em uma Indústria de Embalagens;
- (iv) avaliar os resultados da implantação da MCC como ferramenta de apoio a manutenção.

### 1.3 MÉTODO DE PESQUISA

Luna (1997) define que pesquisa é a produção de um novo conhecimento, significativo dentro do contexto teórico e social, preenchendo uma lacuna importante em uma determinada área de conhecimento. Gil (2002) destaca que a pesquisa é uma atividade racional e sistemática, exigindo que as ações por ela produzidas sejam planejadas em todas suas etapas.

Um método de pesquisa constitui-se de um conjunto de etapas ordenadas, que aliadas ao conhecimento, propiciam a investigação de um fenômeno científico. As etapas abrangem desde a escolha do tema, o planejamento da investigação, o desenvolvimento metodológico, a coleta e a tabulação de dados, a análise dos resultados, a elaboração das conclusões e finalizando a divulgação de resultados (SILVA e MENEZES, 2005).

Para realização deste trabalho, optou-se por uma pesquisa de natureza aplicada, com enfoque exploratório, visando maior familiaridade com o problema, evidenciando-o e aplicando os conhecimentos gerados na investigação de uma situação real de análise.

O método de pesquisa empregado foi o de estudo de caso, devido à necessidade de compreensão do tema de forma completa e profunda. Para Gil (2002) a utilização do estudo de caso delimita a descrição de um fenômeno dentro do seu real contexto.

Para realização dos objetivos da pesquisa utilizou-se uma revisão bibliográfica atualizada, identificando o tema sob o contexto e percepção de vários autores, sendo consultadas obras técnicas, didáticas, científicas e publicações em periódicos.

O processo de revisão bibliográfica foi delimitado aos seguintes temas: (i) Manutenção Industrial, sua conceituação e contexto histórico; (ii) definições e métodos de manutenção; e (iii) Manutenção Centrada em Confiabilidade.

A implantação da metodologia MCC no sistema contemplou as fases: (i) preparação do estudo; (ii) seleção do sistema; (iii) identificação das funções e falhas funcionais; (iv) seleção dos sistemas e subsistemas críticos; (v) análise dos modos de falha e efeitos; (vi) seleção das atividades de manutenção; e (vii) melhoria contínua.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é apresentado e estruturado nos seguintes capítulos:

No capítulo 1 são realizados os comentários iniciais, apresentação e justificativa do tema, exposição dos objetivos, métodos de pesquisa e estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica para desenvolvimento do trabalho, descrevendo a Manutenção Industrial, apresentando seu contexto histórico e evolução dos seus métodos e técnicas, onde são conceituados os diferentes métodos de manutenção, em função das técnicas e políticas empregadas.

No capítulo 3 são revisados os conceitos e definições empregados na MCC, sua evolução temporal, descrição das ferramentas utilizadas e descrição do fluxo de aplicação.

No capítulo 4 é apresentada a proposta de modelo baseado na metodologia de implantação da MCC, com uma breve descrição operacional das etapas. Em seguida apresenta-se o estudo de caso da aplicação do modelo e da metodologia MCC na redução das falhas de um Sistema de Controle de Tensão de um Processo de Laminação.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANUTENÇÃO

Sistemas de produção industriais estão sujeitos à deterioração em consequência do uso e vida útil. Essa deterioração pode levar ao aumento dos custos de produção, menor qualidade e a possibilidade de um acidente (DOHI, *et al.*, 2001). Portanto um processo de manutenção é importante para reduzir a probabilidade dessas ocorrências.

Desde a Revolução Industrial, a manutenção tem sido um desafio, pois apesar do grande progresso, oriundo do avanço tecnológico, essa ainda é uma atividade desafiadora devido a fatores como: complexidade, custo e concorrência, que aliados a uma nova filosofia de organização e responsabilidades, fizeram da manutenção uma das atividades que mais mudaram nas últimas duas décadas (DHILLON, 2002; MOUBRAY, 1997).

Na indústria atual a manutenção está se tornando ainda mais importante, com as empresas adotando-a como uma ferramenta de negócios para geração de lucros, capaz de mantê-las de forma eficiente, eficaz e econômica sustentando sua sobrevivência a longo prazo (SHARMA, *et al.*, 2011).

### 2.2 CONCEITO DE MANUTENÇÃO

A literatura apresenta diferentes definições para manutenção, cada uma dentro de um momento e um ambiente distinto, porém sempre apresentando elementos comuns que possibilitam identificar o conceito e a função da manutenção.

Ferreira (1997) define manutenção como: “Ato ou efeito de manter-se. As medidas necessárias para conservação ou permanência de alguma coisa ou situação”.

Para um conceito técnico, as normas regulamentadoras apresentam manutenção como: “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa executar a função desejada” (NBR-5462, 1994; BS EN-13306, 2001).

Dhillon (2006) apresenta manutenção como: “todas as ações necessárias para manter um ativo ou restaurá-lo, para uma condição satisfatória”. Contudo, para utilizar esse contexto, faz-se necessário definir qual a condição satisfatória do ativo, respondendo qual a função esperada do mesmo.

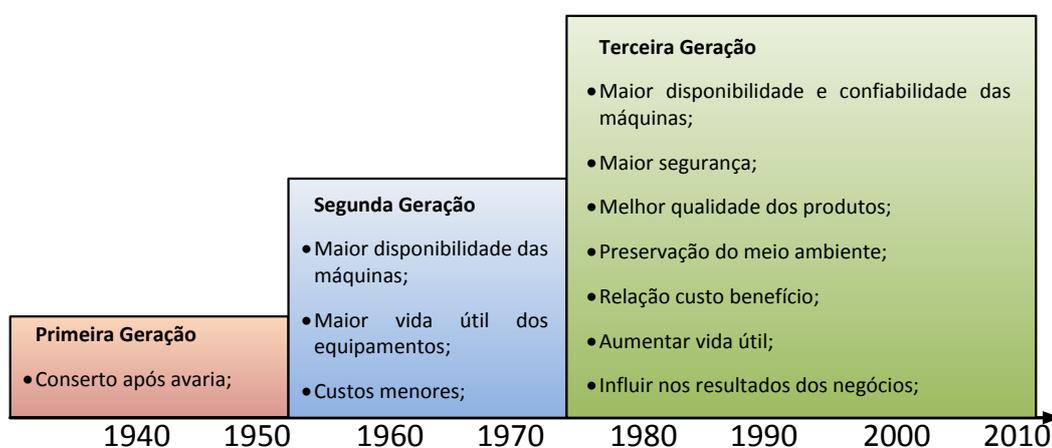
Kardec e Nasfic (2009) afirmam que além de executar sua função, a manutenção deve garantir a confiabilidade e disponibilidade do item físico ou instalação, atendendo ao processo com segurança, preservando o meio-ambiente e com custos adequados, sendo essa a missão da manutenção.

Assim conceituar manutenção envolve vários aspectos, dentre eles disponibilidade, confiabilidade, função do sistema, segurança, meio-ambiente, custos, administração e supervisão, o que a torna parte fundamental dentro da organização.

Mobley *et al.* (2008) observam, que vista de um ângulo positivo, a manutenção é uma ciência que desde a sua execução influenciará, mais cedo ou mais tarde, sobre a maior parte ou todas as ciências.

## 2.3 EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO

Moubray (1997) e Siqueira (2009) dividem a evolução da manutenção em três gerações distintas, onde cada geração corresponde a um período tecnológico de produção, resultando em novos conceitos, filosofias e atividades de manutenção. A figura 1 apresenta as três gerações da manutenção e o enfoque de cada uma.



**Figura 1:** Evolução temporal da manutenção  
**Fonte:** MOUBRAY, John (1997, pg. 7)

### 2.3.1 Primeira Geração

O desenvolvimento técnico da manutenção é acompanhado pela história da humanidade, tendo seu início com a invenção da máquina a vapor de James Watt (1736-1819), quando houve a necessidade de reparo das primeiras máquinas industriais (DHILLON, 2006; TAVARES, 1999).

A primeira geração estende-se até a Segunda Guerra Mundial, caracterizada por uma indústria altamente mecanizada, com sistemas simples e de capacidade superdimensionada, onde o desempenho não era um fator crucial, permitindo tempos inativos do sistema. Como consequência, as atividades de manutenção se resumiam a corretivas executadas após uma falha ou defeito e rotinas operacionais como atividades de limpeza, controle e lubrificação (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009).

### 2.3.2 Segunda Geração

O ponto de partida para a segunda geração foi o período pós-guerra, final dos anos 50, marcado pela grande demanda de produtos, serviços e pela escassez de mão-de-obra especializada. Isso acarretou uma mecanização ainda maior do processo de produção, que com a disseminação da linha de produção contínua, apresentava máquinas mais numerosas e complexas, aumentando os custos relacionados à manutenção (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009).

Estes fatores criaram uma expectativa em relação ao desempenho das máquinas, evidenciando a necessidade de garantir sua confiabilidade e disponibilidade, visando atender a demanda de produção e diminuir os custos operacionais decorrente das falhas (KARDEC e NASFIC, 2009).

É na segunda geração que aflora a idéia de antecipar a ocorrência de uma falha, através de revisões gerais com uma periodicidade determinada, surgindo o conceito de manutenção preventiva ou Manutenção Baseada no Tempo (TBM). Outra contribuição dessa geração foi o início de pesquisas científicas no desenvolvimento de técnicas de manutenção baseadas na disponibilidade e desempenho do equipamento, conhecida como Manutenção Baseada em Condições (CBM) ou manutenção preditiva (RAPOSO, 2004; SIQUEIRA, 2009).

### 2.3.3 Terceira Geração

A partir da década de 70, as técnicas de manutenção oriundas da primeira e segunda geração, mostram-se pouco eficientes frente às novas exigências dos processos de produção, e da automação ocorrida nas indústrias. A utilização do sistema “*just-in-time*”, onde se trabalha sempre com o menor estoque possível, agravou as consequências que uma falha poderia causar sobre toda a produção (KARDEC e NASFIC, 2009; MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009).

Conforme Moubray (1997) nessa geração os sistemas começaram a ser projetados para trabalhar com uma maior precisão, sendo dimensionados nos limites operacionais, aumentando a importância da disponibilidade e confiabilidade, visando elevar o padrão de produtividade e de qualidade.

Siqueira (2009) observa que com a automação, aumentou-se a possibilidade de ocorrer uma falha ou defeito, em razão à introdução de novas tecnologias. Shenoy e Bhadury (2005) afirmam que para fazer *jus* a essas expectativas, exigiu-se da manutenção um desenvolvimento visando garantir que os equipamentos continuarão a desempenhar as suas funções a um gasto mínimo de recursos.

Moubray (1997) cita três fatores principais para o surgimento da terceira geração: (i) novas expectativas dos equipamentos, (ii) novas pesquisas e (iii) novas ferramentas e técnicas de manutenção.

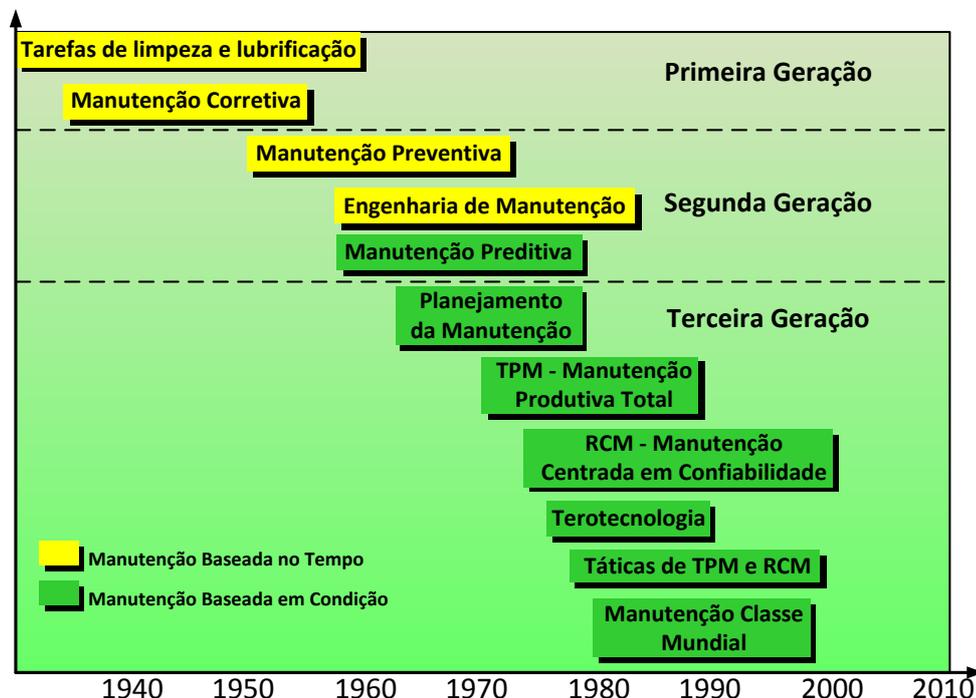
Durante essa geração ocorreu:

- Descoberta de novos modos de falhas e avanço no desenvolvimento e aplicação da manutenção preditiva (KARDEC e NASCIF, 2009; MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009);
- Utilização de sistemas informatizados para o planejamento e controle da manutenção (ZAIONS, 2003; KARDEC e NASFIC, 2009);
- Nascimento e desenvolvimento do conceito de confiabilidade na Engenharia de Manutenção e maior ênfase dos projetos industriais na confiabilidade e manutenção (KARDEC e NASFIC, 2009; MOUBRAY, 1997);

Uma vez que as empresas possuíam a maturidade dos conceitos e aplicações das ações de manutenção, iniciam a adoção de uma estrutura para desenvolvimento do conjunto de ferramentas utilizadas, com objetivo de gerir e operar a manutenção sob um sistema organizado, culminando no surgimento das metodologias de manutenção: *Reliability Centered Maintenance* (RCM) na indústria aeronáutica americana, *Total Productive Maintenance* (TPM) no Japão, Terotecnologia na Inglaterra e combinação destas técnicas (GUTIÉRREZ, 2005; KARDEC e NASCIF, 2009; MOUBRAY, 1997).

É essencial salientar que essas metodologias não foram adotadas de forma cronológica e sequencial ao seu desenvolvimento, e sim adaptadas, conforme a necessidade de cada empresa. Isto possibilitou um desenvolvimento da manutenção, conciliando-a com ferramentas de outras ciências e orientando seus resultados para: negócios, competitividade, inovação tecnológica, logística e gestão de ativos (GUTIÉRREZ, 2005; KARDEC e NASCIF, 2009; TAVARES, 1999).

O desenvolvimento das principais técnicas e filosofias de manutenção são apresentadas na figura 2.



**Figura 2:** Desenvolvimento das técnicas de manutenção  
**Fonte:** GUTIÉRREZ, Luis A. Mora. (2005, pg. 27)

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DE MANUTENÇÃO

Tradicionalmente a classificação da manutenção é realizada em função da forma de planejamento das atividades e em função dos objetivos do método de manutenção aplicado (SIQUEIRA; 2009). Com relação ao planejamento, a manutenção pode ser realizada de forma planejada, executada sob um tempo e condições pré-estabelecidas, ou de forma não planejada, em função da necessidade. (FILHO, 2008; SIQUEIRA; 2009).

Zaions (2003) observa que os métodos ou políticas de manutenção expressam a maneira pela qual a intervenção é realizada nos equipamentos, Mobley *et al.* (2008) complementa que a diferença entre esses métodos está no momento em que a atividade de manutenção é executada.

Alsyouf (2009) afirma que os métodos de manutenção podem assumir três formas:

- ✓ manutenção corretiva,
- ✓ manutenção preventiva ou
- ✓ Manutenção Baseada em Condições (CBM), também conhecida como manutenção preditiva.

### 2.4.1 Manutenção Corretiva

Bloom (2006) define manutenção corretiva como: todo trabalho executado em uma máquina ou equipamento em falha com objetivo de repará-la. Dillhon (2006) descreve este tipo de manutenção como toda a ação de reparo, decorrente de uma falha ou defeito, restabelecendo um item a uma condição operacional satisfatória.

Filho (2008) divide a manutenção corretiva em duas classes: corretiva planejada, onde o reparo ou remoção da falha é realizado em data posterior a falha, e corretiva não planejada ou de emergência, onde a reparo ocorre após a falha.

Kardec e Nascif (2009) e Papic *et al.* (2009) afirmam que uma limitação da corretiva é incapacidade de planejar as necessidades de manutenção e prever a disponibilidade do sistema. Outra limitação existente é que as atividades de reparo

são dirigidas em função dos sintomas óbvios apresentados e não a causa raiz da falha (MOBLEY *et al.*, 2008).

Entre as principais consequências do uso dessa política de manutenção cita-se: degradação das instalações e sistemas, diminuição da vida útil dos equipamentos, alto custo de produção e manutenção devido a paradas não planejadas, necessidade de horas-extras, inserção de danos em processos ou equipamentos secundários, impacto na qualidade do produto, danos ao meio ambiente e risco a segurança das pessoas envolvidas no processo (FILHO, 2008; KARDEC e NASCIF, 2009; PAPIC *et al.*, 2009; SULLIVAN *et al.*, 2004).

A utilização da manutenção corretiva é aceitável em casos onde a falha do equipamento não envolve riscos de segurança ou ao meio ambiente, onde seu custo é inferior a outros métodos de manutenção ou em casos de peças ou equipamentos sobressalentes (BRANCO, 2008; KARDEC e NASCIF, 2009, PAPIC *et al.*, 2009).

#### 2.4.2 Manutenção Preventiva

A NBR-5462 (1994) define como manutenção preventiva a atividade efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

Filho (2008) afirma que manutenção preventiva são todas as ações de manutenção e reparo executadas quando o sistema apresenta condições operacionais, ainda que com algum defeito. Segundo Mobley (2008) essas ações podem ser realizadas em intervalos de tempo predeterminados, em função da vida útil e do ciclo de operação, ou em função da condição do sistema.

O objetivo da manutenção preventiva é o de identificar falhas potenciais e defeitos, antes de sua ocorrência ou desenvolvimento, evitando a deterioração dos sistemas abaixo dos níveis de segurança e confiabilidade desejados, mantendo um bom estado de funcionamento, sendo realizada através de tarefas periódicas que incluem: inspeções e verificação das condições, serviços de operação, atividades de calibração e ajustes, alinhamentos, testes, reparos e substituições de componentes (DHILLON, 2006; SMITH e MOBLEY, 2007; XENOS, 2004).

Kardec e Nasfic (2009) observam que a manutenção preventiva deve ser adotada quando:

- Há impossibilidade de aplicação da preditiva, seja por viabilidade financeira ou viabilidade de execução das técnicas;
- Aspectos mandatórios de segurança pessoal ou da instalação;
- Eventuais paradas de oportunidades de equipamentos críticos;
- Sistemas complexos ou de operação contínua.

Os possíveis questionamentos apontados no uso de técnicas preventivas são: introdução de falhas e defeitos introduzidos nos equipamentos, aspecto financeiro, substituição precoce de componentes e ações desnecessárias de manutenção (KARDEC e NASFIC, 2009; SULLIVAN *et al.*, 2004).

Dhillon (2006) e Mobley *et al.* (2008) enfocam a manutenção preventiva como um programa de manutenção, composto de técnicas preditivas, tarefas de manutenção baseadas no tempo e manutenção corretiva para fornecer um suporte abrangente para toda a produção de plantas ou sistemas de manufatura.

#### 2.4.3 Manutenção Preditiva

Papic *et al.* (2009) observam que grande parte dos componentes ou sistemas apresentam uma espécie de sintoma antes da ocorrência de uma falha e que a leitura desses sintomas podem determinar o estado de operação da máquina ou mesmo a necessidade de manutenção. Marçal (2000) acrescenta que em decorrência da monitoração e análise desses sintomas, prediz-se o estado de funcionamento futuro, podendo-se programar uma ação presente.

A manutenção preditiva consiste em toda a ação de acompanhamento ou monitoramento das condições de um sistema, seus parâmetros operacionais e sua eventual degradação, sendo realizada através de medições ou inspeções que não interfiram na operação do sistema (FILHO, 2008; MARÇAL, 2000).

Raposo (2004) apresenta a manutenção preditiva sobre dois enfoques distintos. No primeiro ela é descrita como uma modalidade dentro de uma política de manutenção preventiva, onde a degradação do sistema é desconhecida e a supervisão dos parâmetros é realizada de forma contínua, caracterizando uma preventiva de acompanhamento. No segundo enfoque as técnicas preditivas são

vistas como uma evolução da manutenção preventiva sistemática, sendo englobadas como uma forma manutenção.

A diferença fundamental entre a manutenção preventiva e manutenção baseada nas condições, é que a preventiva é realizada logo que um intervalo predeterminado tenha decorrido, enquanto a baseada em condições requer verificação em intervalos predeterminados. A ação de manutenção é realizada apenas se a inspeção mostrar necessidade (BLOCH e GEITNER, 2005).

Um plano de manutenção preditiva traz como vantagens o máximo aproveitamento da vida útil dos componentes, o mínimo de intervenção nos sistemas, redução de reparos de emergências e não planejados e por fim a programação antecipada de ações da manutenção. Contudo as desvantagens desse método de manutenção são as necessidades de um acompanhamento e inspeções periódicas, por meio de instrumentos específicos, acarretando um aumento dos custos e indispensabilidade de especialização técnica da equipe de manutenção (FILHO, 2008; RAPOSO, 2004).

Marçal (2000) define como critério de seleção para aplicação de técnicas preditivas a relevância do sistema ou equipamento no processo produtivo, através de parâmetros como: criticidade de uma falha do sistema, tempo de operação, sistemas ou componentes sobressalentes, característica das falhas, possibilidade de monitoramento e custos de inspeção.

A escolha do método de manutenção adequado dependerá de razões técnicas e econômicas para cada equipamento ou sistema, podendo-se optar por um método isolado ou uma mescla dos três. Um programa de manutenção eficaz será alcançado através de uma combinação apropriada, a partir de vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de manutenção existentes (MARÇAL, 2000; PAPIC *et al.*, 2009).

A literatura apresenta outras técnicas e métodos de manutenção, que podem ser classificados como tipos de manutenção ou inclusos nos métodos já descritos. Contudo os objetivos e todos os métodos resumem-se na correção, eliminação e prevenção de falhas, sendo ou não realizadas de forma planejada. Uma definição mais específica dos métodos de manutenção é apresentada na figura 3.



### 3 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM), é uma abordagem criada no final da década de 60, inicialmente orientada para a indústria aeronáutica, com o objetivo de direcionar os esforços da manutenção, para componentes e sistemas onde a confiabilidade é fundamental. Seu principal objetivo é garantir o desempenho, a segurança e preservação do ambiente a um melhor custo-benefício (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009; WANG e HWANG, 2004).

#### 3.1 FUNDAMENTOS DA MCC

Garza (2002) afirma que além da introdução de novos conceitos, a MCC apresenta um novo foco para a manutenção em relação ao modelo tradicional, embasando as suas ações em novos objetivos. O quadro 1 apresenta as principais expectativas da manutenção na MCC e no modelo tradicional:

<b>Características</b>	<b>Manutenção Tradicional</b>	<b>MCC</b>
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o Equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e Sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Falhas	Consequências das Falhas
Normalização	Não	Sim
Priorização	Inexistente	Por Função

**Quadro 1** – Comparação da Manutenção Tradicional com a MCC

**Fonte:** Siqueira, Iony P. (2009, p. 17)

Baseando-se nessas expectativas a MCC determina a estratégia eficaz de manutenção visando evitar ou reduzir as consequências e efeitos significantes de uma falha, priorizando as necessidades do processo de produção e não do componente ou equipamento de maneira isolada.

### 3.1.1 Objetivos do MCC

Dhillon (2006) e Xenos (2004) definem confiabilidade como a probabilidade de um sistema ou item executar a função que lhe é atribuída de forma satisfatória, durante o período indicado, operando de acordo com as condições especificadas. Kardec e Nasfic (2009) afirmam que a missão da manutenção é garantir a confiabilidade e disponibilidade de um sistema ou instalação.

O objetivo da implantação do MCC é otimizar o programa de manutenção garantindo as expectativas ligadas a ele. Para Smith e Hinchcliffe (2004) o principal motivo por trás do desenvolvimento da MCC foi à necessidade de desenvolver uma estratégia de manutenção planejada para abordar adequadamente a disponibilidade do sistema e sua segurança, sem elevação dos custos.

De acordo com Moubray (1997) quando implantado de forma correta, a MCC reduzirá de 40% a 70% a rotina de tarefas de manutenção, com uma série de vantagens e benefícios na segurança, logística, operação e administração das organizações. Para Backlund (2003) a MCC acrescenta também benefícios intangíveis, que geralmente são ignorados por apresentarem um impacto financeiro insignificante (BACKLUND, 2003).

Os resultados esperados com a implantação da MCC podem ser sintetizados em: redução das atividades de manutenção, otimização do planejamento da manutenção, aumento da produtividade, aumento da segurança humana e ambiental, redução dos custos com manutenção, materiais e operação e redução dos riscos (MOUBRAY, 1997).

Leverette (2006) afirma que o resultado de um programa MCC está relacionado com os objetivos da sua implantação, os recursos (tempo, mão-de-obra física e técnica) aplicados, e do compromisso da organização durante sua execução.

Backlund (2003) justifica que para alcançar um resultado máximo do MCC, deve haver um apoio mútuo entre os responsáveis pelo projeto, operação e manutenção do sistema e que finalizada implantação do programa, deve-se atualizá-lo periodicamente para inclusão de novas informações e possíveis mudanças.

### 3.1.2 Histórico da MCC

A indústria aeronáutica foi à precursora em pesquisas de confiabilidade e efeitos das falhas em manutenção com objetivo de atender as exigências da FAA (*Federal Aviation Agency*) que estava preocupada com o índice elevado de falhas nos motores das aeronaves da época. No final dos anos 60, a ATA (*Air Transport Association of America*) criou a MSG (*Maintenance Steering Group*), uma força-tarefa para revisão da aplicação dos métodos e técnicas de manutenção existentes para manutenção das aeronaves (BACKLUND, 2003; SIQUEIRA, 2009).

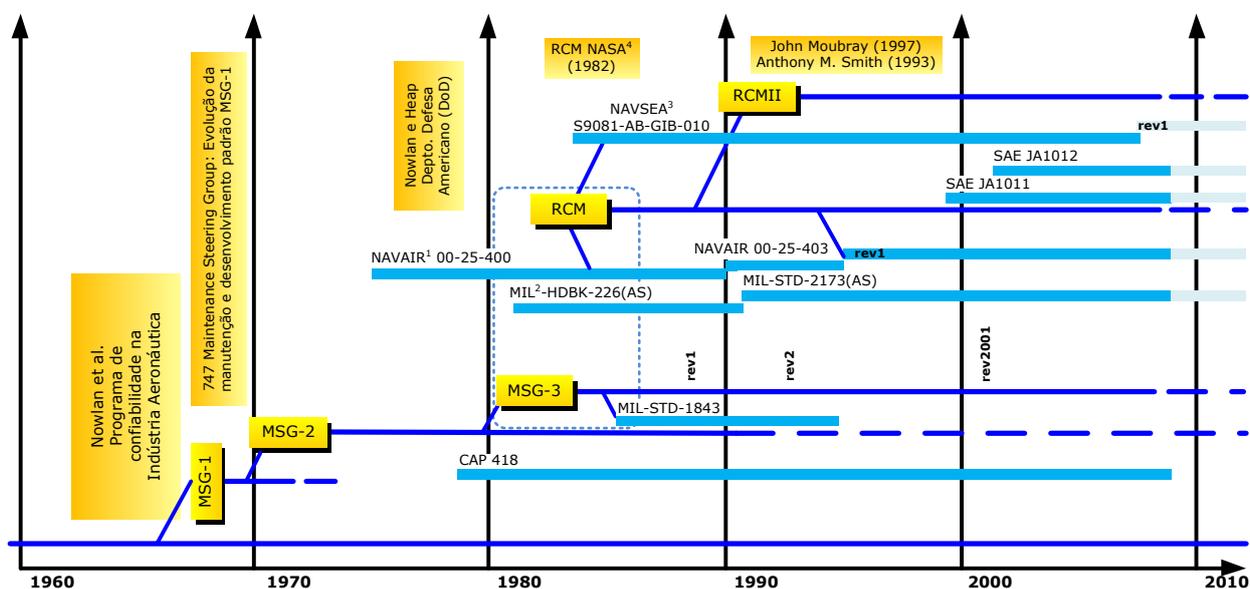
No início dos anos 70 Nowlan e Heap, subordinados à ATA, publicaram os padrões MSG-1 e MSG-2 apresentando uma nova forma na abordagem da manutenção para aeronaves, focada no impacto da falta de confiabilidade na operação e segurança, metodologia que ficou conhecida com *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) (GARZA, 2002).

O MSG-3, de 1980, incluía os padrões anteriores, e uma visão conjunta de todo o processo da indústria de aeronaves, sendo adotado como metodologia obrigatória de manutenção para novas aeronaves pelo Departamento de Defesa Americano – DoD, sendo esta utilizada atualmente, após sua última revisão em 2002 (SIQUEIRA, 2009).

As necessidades industriais da década de 80 levaram a aplicação do RCM em outros setores da indústria, especialmente na de mineração e manufatura (BACKLUND, 2003). Essa disseminação do RCM motivou o surgimento de versões ligeiramente diferentes da MSG-3, como RCMII proposto por Moubray (1997), o *Abbreviated Classical RCM* e o *Experience-Centered Maintenance (ECM)* de Smith e Hinchcliffe (2004).

Siqueira (2009) observa que normalização dessas versões é realizada pelas normas IEC 60300-3-11, com recomendações para aplicação de um MCC baseado no padrão MSG-3 da ATA e pela norma SAE JA1012 que define os requisitos mínimos que um processo seja classificado como MCC.

A evolução dos padrões de MCC é apresentada na figura 4.



<sup>1</sup>NAVAIR – Diretrizes do RCM para Aviação Naval (EUA)

<sup>2</sup>MIL – Diretrizes do RCM para aplicação militar em Aeronaves, Sistemas de Armas e equipamentos de apoio (EUA)

<sup>3</sup>NAVSEA – Diretrizes do RCM para Comando Naval de Sistemas do Mar (EUA)

<sup>4</sup>NASA RCM – Diretrizes do RCM da NASA para aplicação em Instalações e Equipamentos Críticos

**Figura 4:** Evolução da MCC

Fonte: adaptado pelo autor de PELTOKORPI, Mika (2009, p.11)

### 3.2 PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO

A literatura<sup>1</sup> apresenta diferentes versões para aplicação da MCC. Estas versões podem variar no número de etapas, ordem de implantação e ferramentas utilizadas, movidas pela necessidade do processo ou pela experiência do autor/analista, contudo em sua essência possuem uma abordagem e objetivos similares.

A metodologia MCC procura responder sete questões apresentadas de forma sequencial sobre o sistema ou processo em análise (BACKLUND, 2003; MOUBRAY, 1997):

<sup>1</sup> Nasa Reliability-Centered Maintenance Guide (2008, p. 3-1);  
S9081-AB-GIB-010 – RCM Handbook NAVSEA (2007, p. 1-3);  
NAVAIR 00-25-403 – Guidelines for the Naval Aviation RCM Process (1996, p. 3-6).

1. Quais funções devem ser preservadas?
2. Quais as falhas funcionais?
3. Quais os modos de falha?
4. Quais os efeitos da falha?
5. Quais as consequências da falha?
6. Quais as tarefas aplicáveis e efetivas?
7. Quais as alternativas restantes?

Siqueira (1997) propõe uma questão adicional com objetivo de otimizar o cálculo de frequência das atividades:

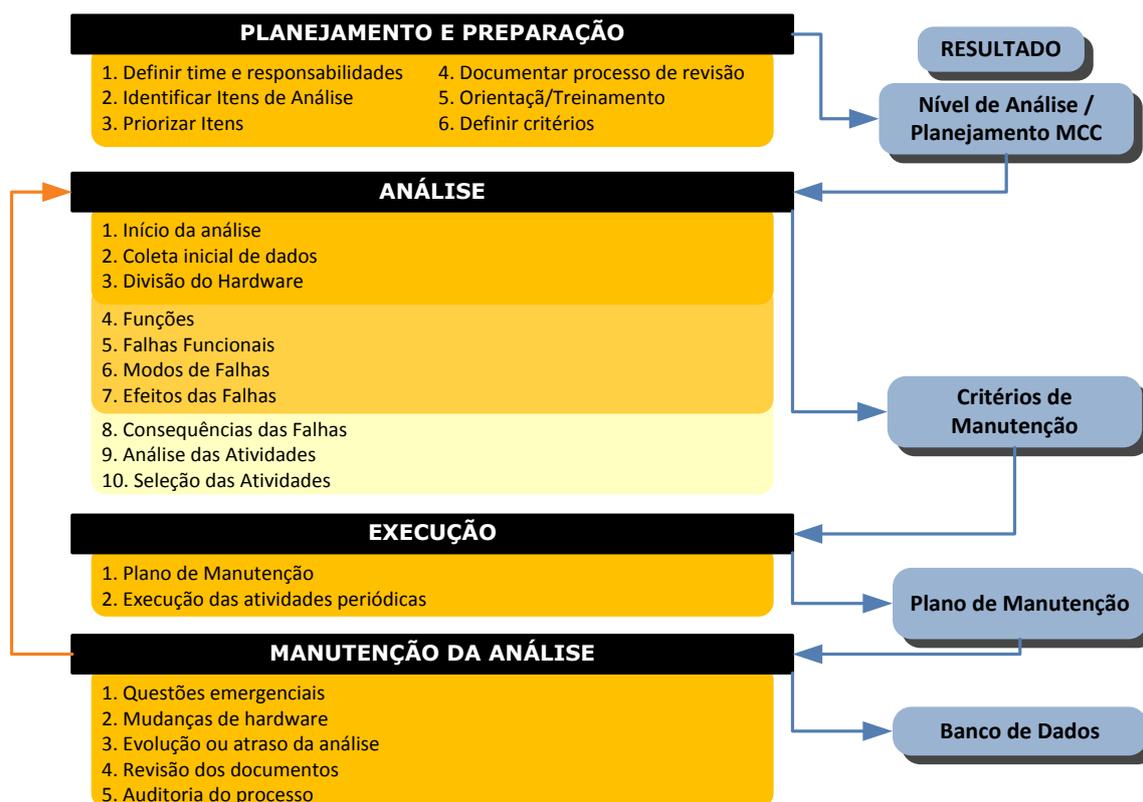
8. Qual a frequência ideal para as tarefas?

Essas questões são respondidas através do trabalho em uma sequência estruturada de etapas, onde cada etapa possui ferramentas de modelagem e análise de sistemas que documentam os critérios e dados utilizados na resolução de cada questão (BACKLUND, 2003; MOUBRAY, 1997).

O processo de implantação da MCC na manutenção de um equipamento ou sistema pode ser resumido em sete etapas (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009; SMITH e HINCHCLIFFE, 2004):

- **Etapa 1:** Identificação das Funções do Sistema;
- **Etapa 2:** Análise dos Modos de Falha e Efeitos;
- **Etapa 3:** Seleção das Funções Significantes;
- **Etapa 4:** Seleção das Atividades Aplicáveis;
- **Etapa 5:** Avaliação da Efetividade das Atividades;
- **Etapa 6:** Seleção das Atividades Aplicáveis e Efetivas;
- **Etapa 7:** Definição da Periodicidade das Atividades.

A figura 5 ilustra os processos de análise e possíveis relacionamentos que podem estar presentes em cada etapa da implantação.



**Figura 5:** Diagrama de Implantação da MCC  
**Fonte:** Leverette, J. C. (2006, p. 24)

### 3.3 FUNÇÕES DO SISTEMA

O objetivo desta etapa é determinar todas as funções realizadas pelo sistema e subsistemas, observando o contexto operacional e o padrão de desempenho para cada função. As ações presentes nesta etapa são (MOUBRAY, 1997): (i) definição do nível de análise; (ii) seleção dos sistemas; (iii) coleta de informações e identificação dos sistemas; e (iv) identificar funções do sistema.

#### 3.3.1 Nível de análise

Smith e Hinchcliffe (2004) observam que nesta etapa deve ser estabelecido a que profundidade do sistema (sistema, subsistemas, componentes, etc.) será realizada a análise e quais parâmetros serão utilizados para a sua seleção.

Uma análise em nível do componente restringiria a visão do efeito das falhas sobre o sistema, levando a uma abordagem da manutenção tradicional, no outro

extremo, abordar toda a planta em uma só análise demandaria muito tempo, devido aos vários modos de falhas e consequências envolvidos e dependentes, sufocando o processo.

### 3.3.2 Seleção do sistema e coleta de informações

Para seleção dos sistemas a norma NAVAIR 00-25-403 (2005), sugere considerar como sistemas prioritários aqueles que possuem impacto sobre segurança, ambiente, operação e custo. Smith e Hinchcliffe (2004) acrescentam como critérios o volume e custo das tarefas da manutenção preventivas, manutenções corretivas com alto custo ou frequência e sistemas com grande impacto nas paradas de produção.

Smith e Hinchcliffe (2004) apresentam como ferramenta de seleção dos sistemas a regra “80/20”<sup>2</sup>, que afirma que 80% do efeito de um critério observado reside em 20% da fonte disponível. A utilização da regra é aliada a uma análise de dados numéricos dos critérios estabelecidos como críticos apresentando o resultado em um Diagrama de Pareto, onde será possível realizar e identificar quais os 20% que estão impactando no processo.

#### 3.3.2.1 Coleta de informações

Após a seleção do sistema, deve-se realizar uma coleta de informações sobre o sistema selecionado, que servirá de base para as análises posteriores e poderá ser complementado conforme a necessidade do processo de implantação.

Podem ser utilizados nesta etapa: manuais e demais instruções de operação, padrões de desempenho, especificações de projeto, manuais de fornecedores, dados de falhas, requisitos de manutenção, diagramas de funcionamento e esquemas técnicos da instalação (elétrico, mecânico,

---

<sup>2</sup> Para uma maior compreensão dessa regra consultar:  
KOCH, Richard. *The 80/20 Principle: The Secret of Achieving More with Less*, 1998.

instrumentação, esquemático, blocos, etc) incluindo suas interfaces com outros sistemas (NAVSEA, 2007; SMITH e HINCHCLIFFE, 2004).

### 3.3.3 Identificação do sistema

A identificação dos sistemas é parte fundamental da MCC, visto que as funções e falhas do sistema serão baseadas no resultado desta etapa. Smith (1993) e Zaions (2003) afirmam que os objetivos dessa etapa são: definir limites do sistema, descrevê-los, identificar entradas e saídas, definir o contexto de operação do sistema e documentar processo de identificação.

#### 3.3.3.1 Documentação

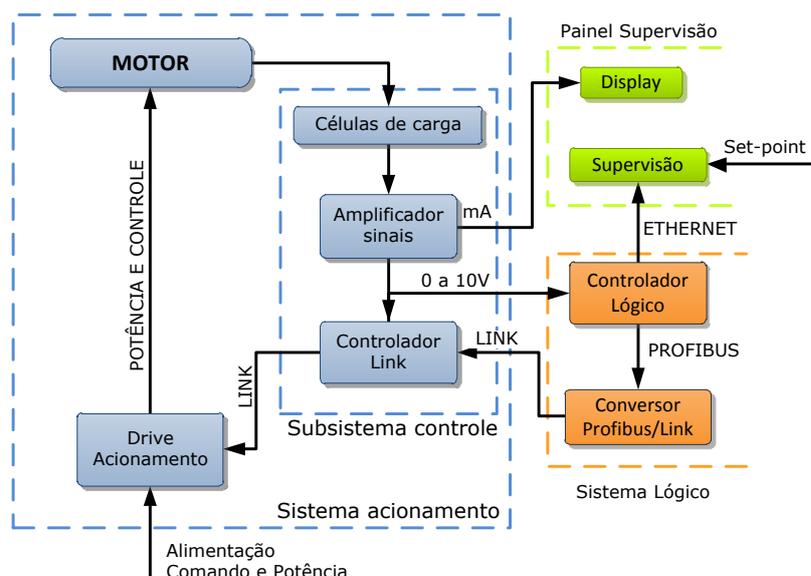
O processo de identificação do sistema pode ser documentado por diversas ferramentas, selecionadas pelo analista ou em função da necessidade do processo. As mais utilizadas na metodologia MCC são (SIQUEIRA, 2009; ZAIONS, 2003):

- **Formulário de documentação:** documento padronizado com dados contendo informações do sistema em análise, do analista e da empresa. A maior parte do documento é um campo livre onde serão inseridas as informações da análise (tabelas, textos, gráficos, esquemas ou diagramas de engenharia) identificadas por um título no documento.

- **Diagrama esquemático:** Diagrama mostrando ligações físicas entre os componentes e demais informações de caráter técnico, como esquemas elétricos, diagramas funcionais, esquemas de processo, etc.

- **Diagrama de blocos:** fornece uma divisão do sistema em blocos ou subsistemas, cada um desempenhando um conjunto de funções do sistema principal, ilustrando a operação, interfaces e interdependências do mesmo. A figura 06 ilustra uma malha de controle de velocidade representada por diagrama de blocos.

- **Diagrama organizacional:** divide o sistema de forma hierárquica, desmembrando em níveis progressivamente inferiores, representando-o através de um diagrama de blocos.



**Figura 6:** Diagrama de Blocos para uma Malha de Controle de Velocidade

**Fonte:** Autor, 2011.

### 3.3.3.2 Limites e interfaces do sistema

Com as ferramentas citadas anteriormente, pode-se estabelecer e representar os limites físicos e funcionais do sistema e seus subsistemas, os quais, além de delimitá-los, apresentam as interfaces de comunicação entre todos os sistemas do processo.

Define-se como limite:

Fronteiras ou limites são os pontos de cada sistema onde ocorre a comunicação com o ambiente físico ou com os demais processos e sistemas da instalação, sendo importante caracterizá-lo no mínimo sob: a direção de fluxo, localização dos componentes e subsistemas, descrição dos itens adjacentes e destino (SIQUEIRA, 2009, p. 36).

A identificação dos limites deve estabelecer quais componentes fazem parte do sistema e, portanto deverão ser analisados, além disso, esta identificação será determinante para estabelecer o que entra e sai do sistema (entradas e saídas), garantindo que nenhuma função importante será negligenciada (SMITH, 1993).

Bloom (2006) acrescenta que para estabelecer os limites deve-se incluir a identificação significativa de todos os insumos (energia mecânica, elétrica,

pneumática e sinais de controle) para um sistema ou subsistema executar corretamente sua função.

Definido os limites do sistema, os sinais externos necessários no funcionamento do componente são classificados como interfaces de entradas do sistema. Caso o sistema analisado forneça insumos ou sinais fora de seus limites, os mesmos serão classificados como interfaces de saída.

Durante a análise assume-se que as entradas estão sempre presentes e disponíveis quando necessárias, sendo descritas e identificadas no sistema que as recebe, incluindo o tipo de material que flui nessa interface. Para Smith e Hinchcliffe (2004) as entradas são essenciais para o bom funcionamento do sistema, porém o produto real do sistema é incorporado na sua interface de saída, as quais representam sua produção e constituem-se no que Zaions (2003) classifica como foco de preservação da MCC.

#### 3.3.3.3 Contexto operacional

O contexto operacional está associado às condições de operação do sistema, definidas pelo ambiente, processo e objetivos da empresa, considerando a relevância do sistema nos seguintes aspectos: impacto nos negócios, processo operacional, padrões de qualidade, padrões ambientais e de segurança, redundância e estoques internos, turnos de trabalho, tempo de reparo e demanda de mercado (SOUZA, 2004).

#### 3.3.4 Funções do Sistema

Principal produto desta primeira etapa da MCC, as funções do sistema (identificadas pelas suas interfaces de saída) definem as atividades de manutenção necessárias para cada sistema. Moubrey (1997) salienta que esta identificação só será completa aliada a um nível de desempenho desejado para cada função.

Para Mobley (2008), definir a função é descrever as ações ou exigências que o sistema ou subsistema deve realizar, em termos de capacidade de desempenho e dentro dos limites especificados, identificando-as para todos os modos de operação do equipamento.

A identificação das funções de um sistema deve ser realizada de maneira cuidadosa, pois geralmente um equipamento apresenta mais de uma, às vezes várias funções, incluindo funções passivas, não tão óbvias quanto às principais, mas que podem ter um impacto significativo devido a sua ausência (NAVSEA, 2007; ZAIONS, 2003).

Identificadas às funções do sistema e seus subsistemas, Moubray (1997) sugere dividi-las em duas categorias principais: (i) funções primárias ou principais; e (ii) funções secundárias ou auxiliares. Siqueira (2009) ainda destaca a importância de priorizar as funções mediante o seu impacto em: segurança, meio ambiente, fatores econômicos e operação da instalação.

### 3.4 ANÁLISE DAS FALHAS

A prevenção ou eliminação das falhas constituem-se como um dos objetivos básicos da manutenção. Para Smith e Hinchcliffe (2004) as falhas dos componentes possuem potencial para derrubar o o primeiro objetivo da MCC “preservar a função do sistema”.

Definidas as funções do sistema, esta segunda etapa de implantação busca determinar como o sistema pode parar de realizar esta função, determinando ações para prevenir, reduzir ou detectar o início da perda da função.

Smith e Hinchcliffe (2004) destacam dois pontos chaves nessa etapa do processo:

- ✓ o foco da análise está na perda da função e não na perda do equipamento,
- ✓ falhas são mais do que apenas uma declaração única e simples de perda de uma função, pois a maioria das funções apresentam duas ou mais condições perda, onde nem todas são igualmente importantes.

#### 3.4.1 Classificação das Falhas

Moubray (1997) define falha como: a interrupção ou alteração na capacidade de um item desempenhar sua função requerida ou esperada, classificando-a sobre aspectos como: origem, extensão, velocidade, manifestação, criticidade e idade.

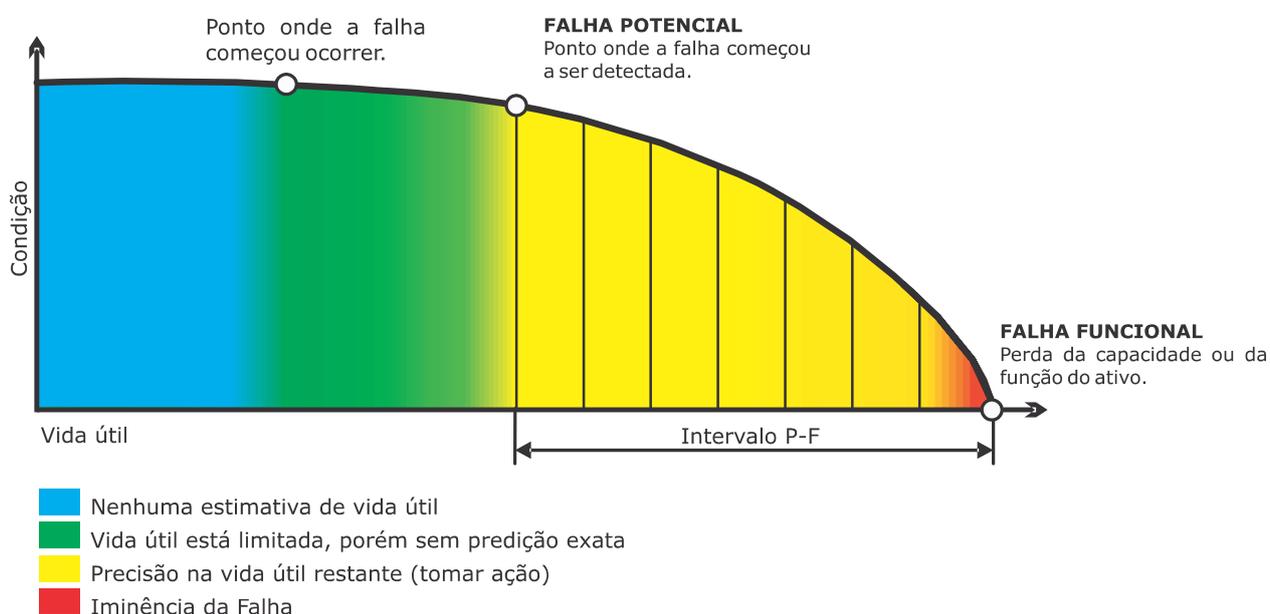
Na MCC as falhas são classificadas mediante o efeito que provocam na função do sistema, sendo classificadas em funcionais ou potenciais. Zaions (2003) define como falha funcional a incapacidade de qualquer item físico realizar uma função com um padrão de desempenho desejado pelo usuário.

Siqueira (2009) afirma que as falhas funcionais podem ser diferenciadas em:

- **Falhas evidentes:** quando detectadas durante trabalho normal da equipe;
- **Falhas ocultas:** uma falha não detectada pela equipe durante trabalho normal;
- **Falhas múltiplas:** quando uma falha oculta combinada a uma segunda falha torna-se evidente.

Falha potencial apresenta-se com uma condição identificável e mensurável da iminência de uma falha funcional ou seu processo de ocorrência (MOUBRAY, 1997). Esse conceito é possível porque muitas falhas não ocorrem de forma repentina, mas evoluem ao longo de um período do tempo (XENOS, 2004).

O início de uma falha potencial é estabelecido no momento em que o sistema começa a apresentar uma alteração do desempenho de sua função, podendo evoluir para uma falha funcional. A figura 07 apresenta essa relação.



**Figura 7:** Intervalo P-F

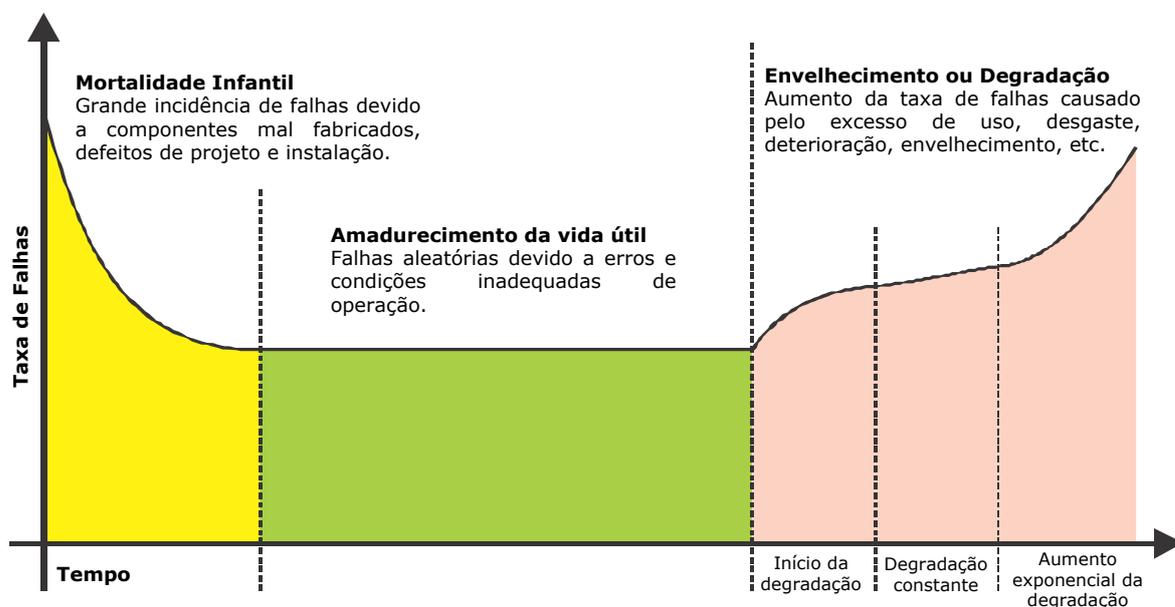
**Fonte:** Adaptado pelo autor de NASA (2008, p. 4-2)

O intervalo compreendido entre o início da falha potencial e a ocorrência da falha funcional é determinado “intervalo P-F”. As ações de manutenção sob condição devem ocorrer dentro desse período, contudo seu intervalo deve ser menor que o intervalo P-F, detectando a falha potencial antes do seu desenvolvimento em falha funcional (KARDEC e NASFIC, 2009).

### 3.4.2 Mecanismos de Falhas

O estudo dos mecanismos de falha é resultado da engenharia de confiabilidade da segunda geração, onde as ações da manutenção eram voltadas para um padrão de falha denominado “curva da banheira” apresentada na figura 08. Assim, a taxa de falhas decresce, estabilizando-se à medida que passa o tempo, e aumentando paulatinamente ao final de sua vida útil (GUTIÉRREZ, 2005).

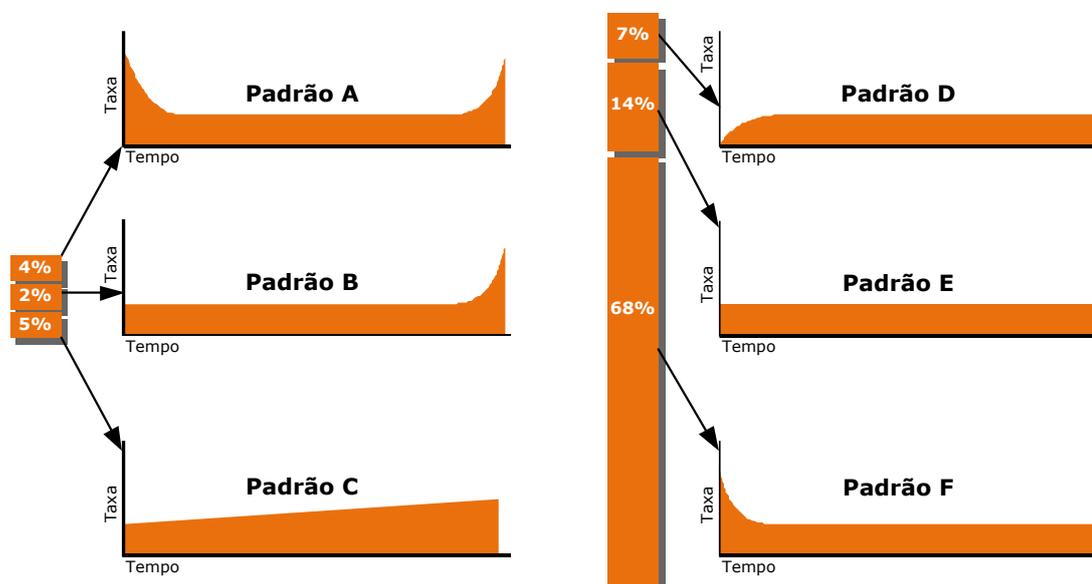
Conforme observam Smith e Hinchcliffe (2004) esse padrão de falha focou as ações da manutenção para revisões periódicas de todo o sistema, apresentando resultados em equipamentos simples e com poucos modos de falhas dominantes, contudo não apresentava a mesma eficiência em sistemas complexos e automatizados.



**Figura 8:** Curva da Banheira

Fonte: Fonte: GUTIÉRREZ, Luis A. Mora. (2005, pg. 80)

O estudo de Nowlan e Heap, em 1978, e dados similares da indústria Sueca e da Marinha Americana, permitiram identificar seis padrões da taxa de falhas dos equipamentos ao longo de sua vida útil, apresentados na figura 09 (NASA, 2004):



**Figura 9: Padrões de Falha**  
 Fonte: Adaptado pelo autor de NASA (2008, p. 4-7)

- **Padrão A:** típica curva da banheira, sendo caracterizada por uma mortalidade infantil, seguido de uma taxa de falhas constante com um aumento gradual ao término da vida útil (peças estruturais, motores elétricos e peças simples);
- **Padrão B:** taxa de falha constante com um aumento significativo ao final da vida útil do equipamento (típico de motores especiais e máquinas a pistão);
- **Padrão C:** aumento gradual da taxa de falhas durante a vida útil do equipamento, sem um período definido de desgaste (turbinas, engrenagens e rolamentos);
- **Padrão D:** equipamento apresenta taxa de falhas reduzida no início de sua vida útil ou após revisão, seguido de um aumento e estabilização da taxa de falha;
- **Padrão E:** taxa de falha constante para qualquer idade (alguns eletrônicos e lâmpadas);
- **Padrão F:** mortalidade infantil, seguida de uma estabilização ou pequeno aumento da taxa de falha (eletrônicos e *softwares*).

Siqueira (2009) explica os padrões de falha através de quatro mecanismos de falhas comuns a todos os componentes, independente da tecnologia de sua fabricação: (i) desgaste progressivo; (ii) falha intempestiva; (iii) desgaste por fadiga; e (iv) mortalidade infantil.

### 3.4.3 Modos de Falha

As Normas EN 60812(2006)e TM 5-968-4 (2006) definem, respectivamente, modo de falha como “a maneira como ocorre a falha em um item” e “a maneira que uma falha é observada em uma função de subsistema ou componente”. Enquanto a falha é associada à função do sistema, o modo de falha é associado ao evento que provoca a transição para o estado de falha (SIQUEIRA, 2009).

Moubray (1997) afirma que a identificação de todos os modos de falha do sistema, possibilita prever o que acontece quando ele ocorre, avaliando o seu impacto e decidir o que poder ser feito para antecipar, prevenir, detectar, corrigir ou até mesmo eliminá-lo.

#### 3.4.3.1 Causas de falhas

Siqueira (2009) destaca a importância de estabelecer a diferença entre a “causa da falha” e “modo de falha”, observando que o modo descreve o que está errado na função do sistema, enquanto a causa descreve o motivo da função estar errada. A causa da falha representa os fenômenos que induzem ao surgimento dos modos de falhas.

Geralmente um modo de falha pode possuir causas diferentes, característicos de sua tecnologia de fabricação e do seu modo de operação, capazes de gerar modos de falhas próprios e específicos. A causa de uma falha pode estar associada a (ZAIIONS; 2003): (i) falhas de projeto; (ii) defeitos de material; (iii) processo de fabricação dos componentes; (iv) falhas de instalação; (v) condições operacionais não previstas; e (vi) falhas de manutenção ou operacionais.

Para Bloom (2006) todas as causas devem ser identificadas, incluindo as de origem humana, e que no processo de identificação participem indivíduos com uma total compreensão do equipamento, especialmente do ponto de vista da manutenção

e projetos, definindo ações para evitar os modos de falhas ou eliminá-los através de suas causas.

Devido aos distintos fenômenos que podem induzir a uma falha, os modos de falha podem ser classificados mediante seu impacto no nível de desempenho da função executada (MOURAY, 1997): (i) capacidade inferior ao desempenho desejado; (ii) desempenho desejado superior a capacidade inicial; e (iii) não cumpriu o desempenho desde o início. Siqueira (2009) classifica os modos de falha em função da especialidade técnica que os origina, sendo: (i) mecânicos; (ii) elétricos; (iii) estruturais; e (iv) humanos.

### 3.5 DOCUMENTAÇÃO DAS FALHAS

Para Backlund (2003) e Bloom (2006) a documentação e a análise das falhas na metodologia MCC podem ser realizadas pelas ferramentas: (i) Análise dos Modos de Falha e Efeitos (*FMEA - Failure Mode and Effects Analysis*); e (ii) Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos (*FMECA - Failure Mode Effects & Criticality Analysis*).

#### 3.5.1 Análise FMEA

Almannai *et al.* (2008) definem FMEA como um método sistemático com foco na prevenção de falhas de um sistema, projeto e/ou processo, através de uma abordagem de identificação, frequência e impacto dos modos de falhas sobre os mesmos.

O procedimento FMEA é uma sequência de passos lógicos, iniciando com a análise de elementos de menor nível (subsistemas ou componentes), identificando os modos de falhas potenciais e mecanismos de falha, traçando efeito dessa falha nos vários níveis do sistema (MOBLEY, 1999).

A análise dos processos pode ser realizada de forma ascendente (*botton-up*), quando iniciada pela identificação dos modos de falha no menor nível do sistema, traçando seus efeitos em níveis superiores, até chegar ao nível mais alto. Outra forma de realizar a análise é chamada descendente (*top-down*) com uma análise das falhas funcionais e potenciais que afetam o sistema final,

identificando as causas dessas falhas nos níveis inferiores do sistema (RAUSAND e HOYLAND, 2004).

As análises do FMEA podem ser classificadas em dois níveis, os quais são similares na condução de suas etapas e análises, sendo distintas quanto ao seu foco de aplicação (IEC, 2006; SAE, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2010):

- **FMEA de Projeto ou Produto:** realizado após a concepção do projeto, identificando cada componente do sistema e os possíveis modos de falha associados, bem como seus efeitos no sistema em questão e no produto como um todo.

- **FMEA de Processo:** análise dos sistemas de manufatura que possam inferir sobre a qualidade e confiabilidade do produto, identificando os modos de falhas do processo e seus efeitos sobre o produto.

### 3.5.2 Análise FMECA

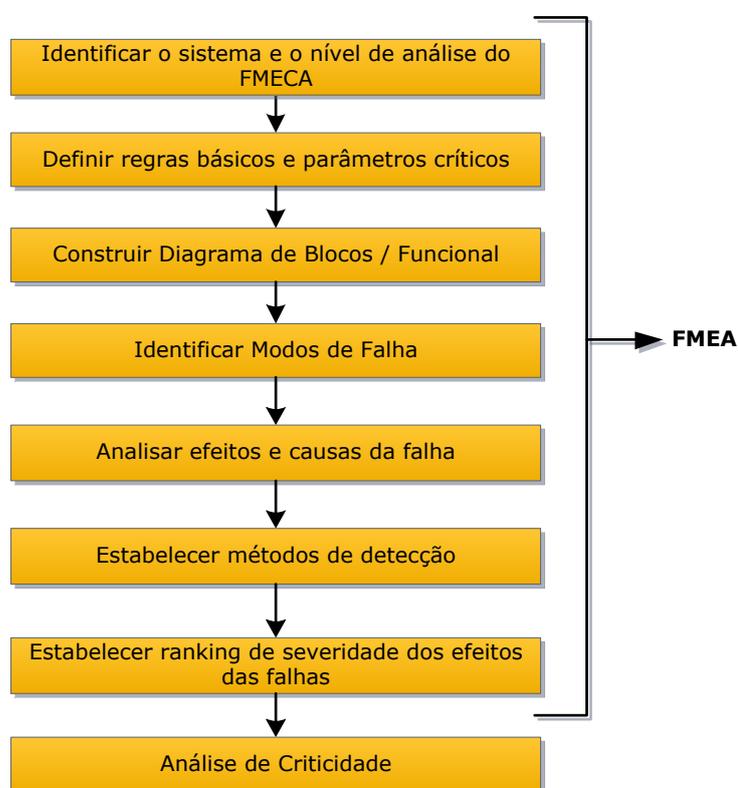
O FMECA é composto de duas análises separadas, o FMEA e uma Análise de Criticidade (CA). O FMEA analisa diferentes modos de falha e seus efeitos enquanto a CA prioriza o seu nível de importância com base na taxa e na gravidade do efeito da falha (TM 5-698-4, 2006).

Smith e Hinchcliffe (2004) observam que o resultado da análise do FMEA possibilita o conhecimento e compreensão dos pontos fracos de um sistema (modos de falha), atuando como fonte de informação na criação de um modelo de confiabilidade e no processo de decisão das ações a serem tomadas para evitar e eliminar estes modos de falhas.

Desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano na década de 70, como uma ferramenta de confiabilidade, o FMECA foi testado em uma ampla gama de aplicações industriais, resultando em versões modificadas da metodologia, conforme o segmento de aplicação, MIL-1629-A (Departamento de Defesa Americano), SAE-J1739 e SAE-ARP5580 (indústria automotiva) e IEC-60812 e STUK-YTO-TR190 (indústria eletrônica). Embora cada uma das normas apresente diferentes versões, os conceitos principais e os procedimentos são similares, contudo um procedimento detalhado deve ser realizado para cada aplicação específica (BASSETO *et al.*, 2011; KIM *et al.*, 2009).

### 3.5.2.1 Fluxo de aplicação do FMECA

As diferentes versões utilizadas do FMECA apresentam um fluxo de aplicação similar entre elas, onde para realização de uma análise FMECA, o primeiro passo é a realização de um FMEA, utilizado como base de dados para a Análise de Criticidade (CA). A figura 10 apresenta o fluxo de aplicação para um FMECA segundo a norma IEC 60518.



**Figura 10:** Fluxo de Aplicação do FMECA  
**Fonte:** HEADQUARTERS (2006, p. 3-1)

### 3.5.2.2 Planilha de análise

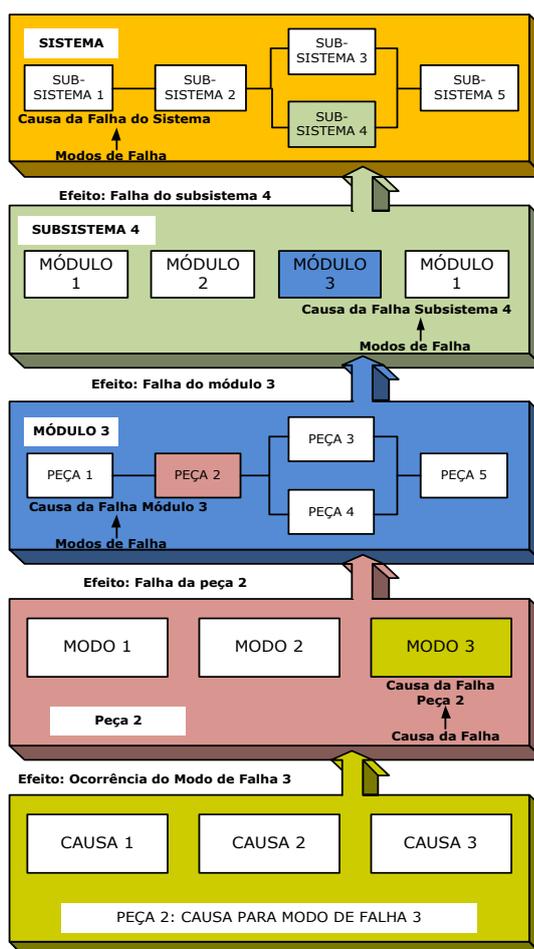
O FMECA consiste de uma coleção de informações, criação de documentos e elaboração de relatórios. Essas informações devem ser documentadas em uma planilha que irá assegurar a documentação dos modos de falha associados a cada falha funcional, suas causas e efeitos, auxiliando também a análise das ações de manutenção do MCC (KIM *et al.*, 2009; ZAIONS, 2003).

### 3.6 EFEITOS DAS FALHAS

Moubray (1997) define como efeito da falha, o acontecimento gerado quando um modo de falha se apresenta, Smith (1993) afirma que o efeito descreve a forma como o modo de falha afeta o sistema.

A identificação dos efeitos das falhas tem como objetivo guiar a análise das consequências das falhas para processo no qual o sistema analisado está inserido. Assim, assegura a relação do modo de falha analisado com a falha funcional do sistema em questão e elimina os modos de falhas que não impactam ou prejudiquem o sistema de forma significativa (SMITH e HINCHCLIFFE, 2004).

Wessels e Sautter (2009) observam o efeito do modo de falha a nível componente, pode impactar em uma função em nível de subsistema e, este, impactar na função principal do sistema, esta relação é ilustrada na figura 11.



**Figura 11:** Consequências de um modo de falha em vários níveis

Fonte: IEC (2006, p. 12)

Basseto *et al.* (2011) complementa que o efeito pode ser classificado como um modo de falha, um efeito ou uma causa dependendo do nível em que está sendo realizada a análise.

Os efeitos da falha podem estar presentes em três níveis (NAVSEA, 2007):

- **Nível local:** efeitos presente somente no limite da análise;
- **Nível subsistema:** efeitos ultrapassar para um nível superior ao limite analisado;
- **Nível sistema:** efeito ultrapassa os limites interferindo na função principal do processo.

#### 3.6.1.1 Classificação dos efeitos

Segundo Carzas (2011) para classificar os efeitos de uma falha, utiliza-se um nível de gravidade, que tem como objetivo fornecer uma avaliação qualitativa do efeito do modo de falha do componente sobre todo o sistema.

O nível de gravidade deve ser estabelecido ao final da análise dos modos de falha, ainda no FMEA, com objetivo de identificar os modos de falha que não produzem efeito no sistema ou que apresentam efeitos insignificantes (IEC, 2006; HEADQUARTERS, 2006).

Mcdermott *et al.* (2009) descrevem o nível de gravidade como uma estimativa do impacto dos efeitos sobre o sistema, na ocorrência de um modo de falha. Contudo, convém observar que cada falha pode apresentar diferentes efeitos, e cada efeito pode ter impactos distintos dependendo da forma como é analisado.

#### 3.6.1.2 Severidade

De acordo com Turan *et al.* (2011) e Horenbeek *et al.* (2010) a severidade deve ser estabelecida observando todas as áreas do processo (segurança, meio ambiente, qualidade, produção, etc.).

A literatura apresenta diferentes escalas de severidade, que variam conforme a versão do FMECA utilizada, do nível da análise realizada e dos recursos disponíveis para a análise. Siqueira (2009) utiliza cinco categorias para classificação

dos níveis de severidade, associando os níveis a aspectos de segurança, ambientais e operacionais, apresentados na tabela 1.

**Tabela 1 – Níveis de Severidade**

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

**Fonte:** Siqueira (2009, p. 101)

A classificação da severidade ocorre nas categorias (MIL, 1980; MOUBRAY, 1997):

- **Catastrófica:** falhas com potencial para causar morte, ou grandes danos ao ambiente e ao sistema, ocasionando perda da função principal;
- **Crítica:** falhas com potencial para causar ferimentos graves, danos severos ao ambiente e que prejudica completamente o sistema;
- **Marginal:** falha que resulta em ferimentos leves, e danos de pequeno porte ao ambiente ou sistema, ou danos que não geram falhas funcionais;
- **Mínimas:** falhas que geram danos a segurança, ambiente e sistema, porém abaixo dos níveis máximos estabelecidos legalmente;
- **Insignificantes:** falhas cujo efeito é insuficiente para gerar um acidente, um dano ambiental ou ao sistema.

### 3.6.1.3 Frequência

O nível de frequência ou probabilidade de ocorrência de cada modo de falha deve ser determinado, a fim de avaliar adequadamente o efeito ou criticidade do modo de falha (IEC, 2006). Para determinar a frequência das falhas em um sistema são necessários dados sobre as taxas de falhas dos componentes do sistema e as condições operacionais nas quais ele executa sua função.

Na ausência de dados sobre a taxa de falhas dos componentes, pode-se estimar a frequência utilizando a experiência, com histórico de equipamentos

similares no processo, ou dos especialistas envolvidos na análise. Assim, podem-se ajustar os critérios (taxa de falha, número de falhas por um período de tempo e base de tempo) conforme a necessidade de uma aplicação específica (NASA, 2006; HEADQUARTERS, 2006).

A tabela 2 apresenta um exemplo do nível de frequência para um modo de falha.

**Tabela 2 – Níveis de Frequência**

Nível	Frequência da Falha	Taxa de Falhas	Descrição
6	Muito alta	$\geq 1/10$	Taxa de falha muito alta
		1/20	Falha ocorre continuamente
5	Alta	1/50	Taxa de falha elevada
		1/100	Falha ocorre com frequência
4	Moderada	1/200	Taxa de falha moderada
		1/500	Falha ocorre ocasionalmente
3	Ocasional	1/1000	Taxa de falha ocasional
		1/2000	Falha razoavelmente esperada
2	Baixa	1/5000	Baixa taxa de falha
			Falha ocorrerá excepcionalmente
1	Remota	1/10000	Remota probabilidade de ocorrer Sugerido esperar que não ocorra

**Fonte:** Adaptado pelo autor de Headquarters (2006, p. 4-17)

#### 3.6.1.4 Análise de criticidade

Define-se como criticidade:

Impacto ou a importância de um modo de falha que exige seu controle e redução, cujo propósito é quantificar a amplitude relativa do efeito de cada falha como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão, de modo que com uma combinação de criticidade e severidade, priorize as ações para redução ou eliminação do efeito de algumas falhas definidas. (IEC 60518, 2006, p. 20).

Para Wessels e Sautter (2009) a análise de criticidade fornece uma avaliação final dos efeitos de um modo de falha, podendo ser conduzida em uma abordagem qualitativa ou quantitativa.

A abordagem quantitativa consiste na obtenção de um número crítico a partir das taxas de falhas, taxa dos modos de falhas, taxas de efeitos das falhas com valores conhecidos e confiáveis, as normas MIL-STD-1629A e IEC 60812 apresentam métodos e fórmulas para utilização dessa abordagem.

O método qualitativo é utilizado quando não há dados disponíveis sobre as falhas, sendo necessário classificar a criticidade de forma subjetiva pelos membros da equipe, sendo comum a adoção desta abordagem em projetos ou instalações em comissionamento, contudo conforme o sistema amadurece é recomendado a coleta de dados e a utilização de métodos quantitativos (IEC, 2006).

#### 3.6.1.4.1 Avaliação do risco

Um dos métodos para avaliação da criticidade é a utilização do número de risco (RPN), do inglês *Risk Priority Number*. Jian-ming *et al.* (2011) observam que o RPN é uma metodologia de análise dos riscos associados as falhas potenciais, com foco na priorização das ações de manutenção.

A norma IEC 60300 (2006) define risco como a combinação da frequência ou probabilidade de ocorrência, com o efeito gerado por um evento perigoso. Hokstad e Trygve (2006) conceituam risco como a possibilidade de ocorrência de todos os eventos e condições indesejadas.

A avaliação do RPN pode ser realizada através da equação 1, ou quando utilizado o nível de detecção pela equação 2 (IEC, 2006; HUADONG & ZHIGANG, 2011):

$$RPN = S \times F \quad \text{Equação 1}$$

$$RPN = S \times F \times D \quad \text{Equação 2}$$

Onde (S) expressa a severidade do modo de falha, (F) a sua frequência e (D) o nível de detecção.

### 3.6.1.4.2 Nível de detecção

Este nível mensura a dificuldade na detecção, através de uma avaliação dos métodos de detecção disponíveis e sua aplicabilidade para cada falha ou modo de falha analisado, onde uma falha que não possibilita detecção recebe um valor elevado na escala, devido a probabilidade de detecção ser baixa. Já um modo de falha que possua uma técnica de detecção confiável, dentro da curva P-F, apresentará uma alta possibilidade de detecção, sendo representada pelo menor valor da escala (HUADONG & ZHIGANG, 2011; MCDERMOTT *et al.*, 2009).

Um exemplo de classificação de detecção é apresentado na tabela 3.

**Tabela 3 – Níveis de Detecção**

Nível	Detecção	Descrição
1	Alta	Falha detectável por procedimentos operacionais simples
2	Moderada	Necessidade de inspeção funcional para detecção
3	Remota	Necessidade de ensaio funcional para detecção
4	Baixo	Falha detectável apenas por perda da função
5	Quase impossível	Falha totalmente oculta

**Fonte:** Siqueira (2009, p. 99)

### 3.6.1.5 Aceitabilidade do risco

Finalizada a análise de criticidade, seja ela quantitativa ou qualitativa, os modos de falha devem ser selecionados, através de um *ranking* com uma apresentação decrescente dos modos de falha em função do RPN. Pode-se utilizar como ferramenta de seleção a matriz de criticidade ou a disposição dos valores na forma de tabelas (HEADQUARTERS, 2006; IEC, 2006)

Mcdermott *et al.* (2009) observam a utilização da regra “80/20” associada a um Diagrama de Pareto, como outra ferramenta para auxiliar durante seleção dos modos de falha.

Segundo Carazas (2011) os níveis de aceitação do risco dependem da política organizacional da empresa, questões econômicas e operacionais, questões de segurança e ambientais ou pela necessidade de cumprir valores estabelecidos pela entidade responsável pela análise.

### 3.6.1.5.1 Matriz de criticidade

A matriz de criticidade é um meio visual para identificar e comparar os modos de falha para todos os componentes dentro de um determinado sistema ou subsistema, avaliando-os através da relação da probabilidade de ocorrência com a severidade (HEADQUARTERS, 2006; IEC, 2006).

Um exemplo de matriz de criticidade é apresentado na figura 12, onde um par de valores de severidade e frequência produzirão um nível de criticidade. Níveis de criticidade elevados são atribuídos para os modos de falha perto do canto direito superior, requerendo alta prioridade de ação corretiva (KIM *et al.*, 2009).

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	5(A)			ALTO RISCO	
	4(B)	MODO DE FALHA 1			
	3(C)				
	2(D)		MODO DE FALHA 2		
	1(E)	BAIXO RISCO			
		I	II	III	IV
		GRAVIDADE			

**Figura 12:** Matriz de Criticidade

**Fonte:** Kim *et al.* (2009)

## 3.7 ANÁLISE E DECISÃO

O objetivo desta etapa é selecionar as atividades de manutenção preventivas com base em sua aplicabilidade e eficácia, através da sua capacidade de reduzir, eliminar, prevenir ou detectar uma falha conciliada a uma análise de viabilidade econômica e técnica da mesma.

### 3.7.1 Consequências das Falhas

Backlund (2003) define como consequência de uma falha, o impacto ocasionado no processo devido a sua ocorrência. Zaions (2003) complementa essa afirmação, observando que cada modo de falha impacta de forma distinta no processo, podendo afetar a produção, qualidade, segurança, ambiente, custo, tornando evidente a análise das consequências dos modos de falha em função da sua natureza e a gravidade.

A análise das consequências das falhas deve ser realizada no MCC em decorrência da avaliação do seu impacto sobre os fatores (NAVSEA, 2007; SMITH, 1993): (i) segurança; (ii) meio ambiente; (iii) operação e (iv) econômico.

### 3.7.2 Funções Significantes

A priorização das funções significantes para decisão das tarefas de manutenção pode ser realizada através de um fluxo de decisão, nos quais a função é avaliada através da natureza do seu impacto no processo, utilizando como critérios: (i) segurança operacional e meio ambiente; (ii) operação do sistema; e (iii) aspectos econômicos (NAVSEA, 2007).

Outros fatores relevantes em uma função seriam se sua falha funcional é evidente durante processo de operação do equipamento (IEC, 2006), ou se já existe uma atividade de manutenção preventiva para a mesma (SMITH, 1993). Uma sugestão de fluxo de seleção de funções é apresentada na figura 13.



**Figura 13:** Fluxo de Decisão das Funções Significativas  
**Fonte:** Adaptado pelo autor de Siqueira (2009, p. 112)

Durante o processo de seleção deve-se questionar o impacto da função de cada componente, garantindo a revisão dos critérios de manutenção, a identificação de novos modos e a eliminação das atividades que são desnecessárias para o sistema (NAVAIR, 2005).

### 3.7.2.1 Evidência da falha

A primeira questão a ser respondida é se a falha é ou não evidente para o usuário durante suas atividades normais e funcionamento, não sendo necessário nenhum teste ou inspeção para sua detecção. Qualquer anormalidade observada através de um sistema de supervisão ou controle pode ser classificada como evidente para a operação (BLOOM, 2006).

Garza (2002) observa que falhas ocultas podem estar associadas a dispositivos de proteção ou “*stand-by*”, que não apresentam consequência direta sobre o sistema, contudo quando estas falhas são combinadas a outros modos de falhas (falhas múltiplas) as consequências podem ser graves.

### 3.7.2.2 Impactos ambientais e de segurança

Para Papic *et al.* (2009) o impacto na segurança é causado quando um modo de falha apresenta, durante operação do sistema, riscos potenciais para causar lesões ou ameaçar a vida dos usuários do sistema em análise. Garza (2002) observa que o impacto ambiental é consequência de um modo de falha que resulta na violação ou infração de leis e padrões da área.

### 3.7.2.3 Impactos operacionais e econômicos

Kardec e Nascif (2009) classificam como impactos operacionais e econômicos àqueles relacionados às falhas que afetam a capacidade de produção do sistema, a qualidade do produto, diminuem a eficiência do processo, geram insatisfação do cliente e influenciam nos custos de produção e manutenção.

### 3.7.3 Lógica de Decisão

Escolhidas as funções significantes, a metodologias MCC utiliza uma lógica estruturada conduzida através de um fluxo de decisão, baseado em uma série de perguntas sobre a falha funcional e os modos de falha associados à ela. Isto auxiliará para determinar a necessidade e a periodicidade das medidas preventivas e outras tarefas de manutenção (NAVSEA, 2007; NASA, 2004).

Tradicionalmente o processo de decisão do MCC ocorre em três níveis, conforme ilustra figura 14 (LEVERETTE, 2006):

- Avaliação da falha de acordo com a visibilidade dos seus efeitos durante processo de operação do sistema;
- Avaliação das consequências das falhas sobre: (i) segurança; (ii) meio ambiente; (iii) operação; e (iv) custos;
- Avaliação da causa da falha para seleção de tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas;



**Figura 14:** Níveis de avaliação das consequências

Fonte: Leverette, J. C. (2006, p. 24)

As consequências de cada falha devem ser avaliadas conforme os impactos e critérios estabelecidos no subitem 3.7.2, observando sempre a visibilidade da falha e no caso de falhas ocultas a avaliação será realizada com base em suas possíveis associações com outros modos de falhas.

Terminado o processo de análise das consequências das falhas, seu resultado deve ser documentado em um formulário como apresentado na figura 15, auxiliando na sequência de implementação, formando um histórico do sistema e para futuras auditorias (NAVAIR, 2005).

PLAN-A	Processo:	Nº.:	Coord:	Data:					
PLANILHA	Linha:								
DECISÃO	Equipamento:	Rev.:		Folha:					
MCC	Conjunto:								
Descrição do item:									
FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CONSEQÜÊNCIAS DA FALHA						
			Descrição	H	S	E	O	N	

**Figura 15:** Formulário para registro das consequências das falhas

Fonte: Autor (2011)

A parte superior da tabela é composta da identificação do sistema analisado, sendo padrão a todos os formulários utilizados na metodologia. O corpo da tabela é utilizado na documentação do registro das consequências, com os campos para:

- Referência da informação – contêm a descrição das funções do sistema, falhas funcionais para cada função e os modos de falha de cada falha funcional;
- Descrição da consequência – descrição detalhada do efeito do modo da falha e sua consequência no sistema e processo;
- Avaliação da consequência – informa, através de SIM ou NÃO, se a consequência da falha é oculta (H), qual a natureza do seu impacto, segundo critérios de segurança (S), meio ambiente (E), operacionais (O) e econômicos (N).

#### 3.7.4 Aplicabilidade da manutenção

Esta etapa da metodologia é similar nas diferentes versões da metodologia MCC, onde são estabelecidos os requisitos de natureza técnica e prática para determinar as ações e métodos de manutenção a serem utilizados.

Smith (1993) define que o foco de um programa de manutenção preventiva consiste em: (i) prevenir ou reduzir a ocorrência de falhas; (ii) detectar o início de uma falha; (iii) descobrir falhas ocultas; e (iv) identificar quando não será possível ações preventivas, devido a limitações e especificações técnicas do sistema.

Smith e Hinchcliffe (2004) apresentam quatro categorias nas quais pode se especificar qualquer ação da manutenção planejada:

- **Atividades direcionadas por tempo:** a ação executada e sua periodicidade são pré-definidas e ocorrerão sem qualquer intervenção técnica ou alteração no intervalo de tempo, geralmente sendo intrusivas e resultando na prevenção ou retardo da falha.
- **Atividades direcionadas por condição:** utilizadas em modos de falhas que permitem a monitoração do início da falha, prevendo quando ocorrerá a perda da função. São realizadas de forma incipientes através de técnicas preditivas.
- **Atividades de busca de falhas:** aplicados em sistemas de emergência, equipamentos reservas e *backups*, e outros sistemas com chances potenciais para apresentar falhas ocultas, evidenciando sua existência e prevenindo sua evolução para falhas múltiplas.
- **Atividades pós-falhas:** atividades de manutenção postergadas após a ocorrência da falha em função de necessidades técnicas ou exigências econômicas.

Siqueira (2009) acrescenta uma categoria de atividades direcionadas para operação, as quais são de caráter operacional e de simples execução, como preservação do sistema e ambiente, lubrificação, limpeza, suprimento de matéria prima, entre outros.

#### 3.7.4.1 Denominação das atividades

As tarefas de manutenção podem ser denominadas e classificadas de forma subjetivas, seja em função do responsável pela análise, da necessidade do processo ou da versão de MCC utilizada. Moubrey (1997) classifica e padroniza as seguintes atividades de manutenção: (i) inspeção preditiva; (ii) restauração preventiva; (iii) substituição preventiva; (iv) detecção da falha; e (v) reparo funcional.

##### 3.7.4.1.1 *Inspeção preditiva*

Smith (1993) classifica como inspeção preditiva toda tarefa de inspeção programada, realizada de forma não intrusiva, que detecta uma condição de falha através da correlação de um parâmetro mensurável com o início desta condição. Neste momento é especificado um valor crítico para realizar uma ação de manutenção antes de sua evolução para falha funcional.

É importante observar que as técnicas preditivas não podem ser aplicadas para todas as situações, devendo ser selecionadas de acordo com a natureza do processo, o tipo de variável a ser medida e também do ponto de vista econômico. A adoção de uma técnica preditiva deve ser avaliada quanto a sua aplicabilidade com os seguintes critérios (STARR, 2000): (i) identificação da evolução da falha é possível através do monitoramento de um parâmetro; (ii) sensibilidade da técnica ao estabelecer um valor limite para realização da tarefa; (iii) a técnica de medição não é intrusiva; (iv) intervalo de tempo P-F é suficiente e confiável para realização da ação da manutenção; (v) custo e eficácia da técnica.

A medição do parâmetro correlacionado à falha pode ser realizado de maneira direta, relacionando sua evolução ao longo do tempo (temperatura e espessura), ou de forma indireta, através dos efeitos colaterais produzidos pela evolução da falha (análise de óleo, vibração, termografia, etc.) (SMITH, 1993).

#### 3.7.4.1.2 *Reparação preventiva*

A norma NAVSEA (2007) define restauração como “as ações com intervalos periódicos para restituir a capacidade funcional de um item, podendo assumir várias formas, desde uma reforma completa a tarefas simples de limpeza e lubrificação”.

Os critérios para aplicação das ações de substituição (MOBLEY, 1999):

- A degradação do item é em função do tempo ou da última tarefa de reparação;
- O item apresenta uma idade definida (de preferência um visível) no qual há um aumento da probabilidade condicional do modo de falha em consideração;
- A ação de restauração previne a ocorrência do modo de falha a um nível aceitável para o usuário do sistema.

Moubray (1997) destaca que ações de reparo dirigem-se a modos de falha previsíveis, nos quais se utilizam técnicas de: alinhamento, balanceamento, filtragem, lubrificação, limpeza, desmagnetização, etc.

#### 3.7.4.1.3 *Substituição preventiva*

Consiste de uma atividade de descarte ou substituição programada de um item em função de um limite específico da sua vida útil com objetivo de prevenir uma falha funcional (MOBLEY, 2008).

As ações de substituição preventiva são executadas de forma independente do estado real do item. Há um lugar apropriado para este tipo de tarefa em um programa de manutenção preventiva, onde existe uma evidência concreta de que um item atingiu o limiar do desgaste após determinado momento de sua vida útil e a sua substituição garantirá a condição original de sua função (NAVSEA, 2007).

Outros critérios que devem ser observados:

- Exigências de segurança;
- Materiais utilizados apresentam vida útil fixa;
- Falta de recursos técnicos para a reparação e;
- Menor custo em relação à reparação.

#### 3.7.4.1.4 Detecção de falha

Atividades que buscam identificar falhas funcionais que tenham ocorrido, porém estejam ocultas para a equipe de operação, evitando sua evolução para falhas múltiplas (MOBLEY, 2008; SMITH, 1993).

Siqueira (2009) define os seguintes critérios para aplicação destas tarefas:

- A ação de inspeção deve revelar falhas latentes;
- As falhas não são visíveis durante operação normal do sistema;
- A falha se torna visível quando combinada a outros modos de falhas;

Kobbacy e Murthy (2008) ainda acrescentam como critério a inaplicabilidade de qualquer outra tarefa de manutenção.

Quando há impossibilidade de aplicação das ações preventivas de forma eficaz, sejam por detalhes tecnológicos, questões econômicas, fatores técnicos ou dificuldades do projeto, o MCC recomenda a identificação de “atividades *default*” como solução da análise, sugerindo uma mudança de projeto, para modos de falha com impactos ambientais e de segurança, ou um reparo funcional, para modos de falha menos significantes (SMITH, 1993).

#### 3.7.4.1.5 Reparo funcional

Corresponde à decisão de permitir a operação do sistema, sem nenhuma tarefa de manutenção, até a ocorrência da falha, devido à inaplicabilidade de outros métodos de manutenção ou decisão econômica (KOBACZY e MURTHY, 2008).

Mobley (2008) define como critérios adoção do reparo funcional:

- Falhas ocultas, sem técnicas de inspeção para identificá-las, e em que sua associação a outros modos de falha não afetará a segurança ou meio ambiente;
- Equipamentos considerados não críticos;
- Critérios econômicos.

#### 3.7.4.1.6 *Mudança de projeto*

A norma NAVAIR (2007) especifica como mudança de projeto qualquer ação, de natureza operacional ou física, que altere as características da função principal de um item, recomendando sua adoção no caso da impossibilidade da aplicação dos outros métodos preventivos e em sistemas considerados críticos do ponto de vista ambiental, de segurança ou operacional.

#### 3.7.5 Efetividade da manutenção

Kobbacy e Murthy (2008) definem como efetividade de uma tarefa de manutenção, a avaliação da eficácia do seu resultado e a viabilidade de sua aplicação, considerando os recursos econômicos disponíveis e necessários, com base nos seguintes critérios:

- Aplicabilidade técnica e viabilidade da tarefa;
- O uso e custos dos recursos físicos necessários;
- Indisponibilidade da operação durante aplicação da tarefa;
- Eficácia do resultado;
- Intervalo de execução.

A efetividade das falhas está relacionado com a consequência das mesmas. Uma consequência com impacto ambiental e em segurança, só terá uma solução efetiva com a redução da probabilidade da falha ligada à ela. Por outro lado, para uma falha com impacto econômico ou ambiental, o critério de efetividade será o fator econômico (Siqueira, 2009).

#### 3.7.6 Seleção das atividades

Para Bloom (2006) a decisão por uma atividade de manutenção deve ser baseada em sua aplicabilidade e efetividade, de forma que se apliquem na eliminação ou redução da falha do objeto em análise, com segurança e com critérios econômicos e operacionais adequados.

Moubray (1997), com base nos critérios de aplicabilidade e efetividade do apêndice D, sugere a seguinte ordem de prioridade na seleção entre as atividades

de manutenção: (i) inspeção preditiva; (ii) restauração preventiva; (iii) substituição preventiva; (iv) detecção da falha; e (v) atividades *default*.

Zaion (2003) observa a utilização de um diagrama de decisão, com base na avaliação da evidência e consequência da falha e na análise lógica das atividades. A figura 17 apresenta um fluxo de decisão para seleção das atividades de manutenção.

O fluxo de decisão é baseado em uma série de perguntas, que conforme a resposta fornecida pelo analista, conduzirão a seleção de uma atividade de manutenção.

As informações do processo de decisão deverão ser armazenadas em um formulário contendo: as respostas do diagrama de decisão, descrição detalhada das atividades selecionadas, com informações técnicas, periodicidade e responsável pela execução. A figura 16 apresenta um formulário de análise decisional.

RCM II Planilha de Decisão	Sistema								Sistema Nº	Facilitador	Data	Folha	
	Sub-Sistema								Sub-Sistema Nº	Auditor	Data	De	
Referência Informação	Avaliação de Consequência				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Ação Default			Tarefas Proposta	Frequencia Inicial	Resp.
	F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3			

**Figura 16:** Formulário de Análise Decisional  
**Fonte:** Autor (2011)

A parte superior da tabela é composta da descrição do sistema analisado e informações da análise, sendo padronizadas para todos os documentos do MCC, o corpo do formulário é composto dos campos:

- Referência da informação – contêm as funções do sistema (F), falhas funcionais para cada função (FF) e os modos de falha de cada falha funcional, numerados de forma sequencial e padronizados em todos os formulários da análise MCC.

- Avaliação da consequência – informa, através de SIM ou NÃO, se a consequência da falha é oculta (H), qual a natureza do seu impacto, segundo critérios de segurança (S), meio ambiente (E), operacionais (O) e econômicos (E);
- Categoria da falha – classifica a falha em uma das possíveis categorias: ESA (evidente segurança/ambiental), EOE (evidente operacional/econômica), OSA (oculta segurança/ambiental) e OOE (oculta operacional/econômica);
- Tarefa programada selecionada – informam se uma atividade preventiva foi selecionada com base nas respostas do diagrama de decisão;
- Tarefas *default* (H5, S4) – Informam o registro das atividades *default*;
- Tarefa proposta – descreve as ações de manutenção necessárias resultantes do processo de análise;
- Frequência inicial – informa a frequência da tarefa proposta;
- Responsável – informa o responsável pela execução da tarefa.

O diagrama de decisão é composto perguntas que identificam a visibilidade (H), consequência (S, E, O, N) e a aplicabilidade de tarefa de manutenção (H1/H4; S1/S4; O1/O3 e N1/N3).

A primeira questão a ser respondida é se a falha é ou não evidente para a operação (H). As falhas evidentes devem ser classificadas em função do impacto de sua consequência na segurança (S), meio ambiente (E), operacional (O) ou econômico (N).

Após a classificação do impacto da falha, deve-se selecionar uma atividade de manutenção programada para eliminação da falha ou redução da probabilidade de sua ocorrência, seguindo a prioridade de inspeção preditiva, reparo preventivo e substituição preventiva. Se nenhuma dessas atividades for aplicável, para falhas com impactos econômicos e ambientais deve-se priorizar uma ação de reparo funcional e uma avaliação econômica de uma mudança de projeto.

Em falhas com impacto ambiental ou relacionado à segurança, no caso da inaplicabilidade das atividades (S1, S2 e S3), avalia-se a viabilidade de uma combinação de todas (S4) e em último caso uma mudança de projeto.

Para uma falha oculta identifica-se uma atividade para redução ou eliminação do risco a ela associado, através de uma inspeção preditiva (H1), restauração preventiva (H2), substituição preventiva ou detecção de falha (H4).



Se nenhuma atividade acima for aplicável, deve-se avaliar o impacto na segurança e ambiental da falha (H5). Em caso de riscos de segurança ou ambientais, uma mudança de projeto é obrigatória, porém se os riscos forem insignificantes é recomendada uma ação de reparo funcional e uma avaliação econômica de uma mudança de projeto para tornar a falha evidente.

### 3.7.7 Periodicidade das atividades

Segundo Kobbacy e Murthy (2008) os métodos formais para a identificação e otimização da periodicidade de manutenção não são parte da análise MCC, sugerindo a uma adequação aos modelos já existentes.

A periodicidade na qual se realiza uma tarefa de manutenção preventiva é a parte mais difícil na análise MCC. Uma análise concreta deve ser fundamentada no pleno entendimento da mudança dos processos físicos e materiais ao longo do tempo, e como estas mudanças afetam os modos de falha, onde basicamente a análise irá trabalhar de forma estatística com as taxas de falhas dos componentes e sua variação ao longo do tempo (SMITH, 1993).

As normas IEC (2006), NAVAIR (2005) e NAVSEA (2007) recomendam a utilização de métodos estatísticos na definição da periodicidade, porém não definem um modelo específico, sugerindo que o método aplicado seja documentado e aceito pelos usuários e proprietários do sistema.

Backlund (2003) afirma que a periodicidade das atividades deve ser uma combinação de dados da empresa, experiência dos especialistas e métodos estatísticos. Uma abordagem mais detalhada sobre aplicação de métodos estatísticos e cálculo da periodicidade das atividades de manutenção é apresentada em Smith (1993), Nakagawa (2005), Kobbacy e Murthy (2008), detalhes de execução prática dessas atividades baseadas em intervalos são apresentados por Nowlan e Heap (1978).

### 3.8 PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO E REVISÃO

Durante todo processo de análise MCC e após sua conclusão, recomenda-se a formação de uma equipe responsável pela auditoria e por informar possíveis atualizações e correções para otimização da metodologia.

Smith e Hinchcliffe (2004) apontam os seguintes fatores para adoção de um programa de melhoria contínua do MCC:

- O processo MCC não é perfeito, e pode exigir ajustes periódicos com os resultados de referência;
- O sistema ou planta podem sofrer alterações, como mudanças de projetos, inclusão de equipamentos, mudanças técnicas ou operacionais, que interferem no resultado da análise;
- O conhecimento adquirido durante o processo de análise e implantação pode ser útil na revalidação dos resultados.

Kobbacy e Murthy (2008) afirmam que a atualização do MCC deve ser realizada em três perspectivas: (i) atualizações de curto prazo, com a revisão dos resultados de análises anteriores e da documentação do MCC; (ii) atualizações de médio prazo com a validação e análise das atividades de manutenção atuais e as selecionadas na análise; (iii) atualizações de longo prazo, com a revisão de toda análise, observando além do sistema analisado, toda a planta e suas relações exteriores.

Smith (1993) aponta as seguintes etapas para um programa de melhoria contínua do processo MCC: (i) ajuste dos resultados da análise, (ii) modificações da planta ou sistema; (iii) novas informações; e (iv) medição dos resultados da implantação.

## 4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta a implantação de um modelo proposto da MCC, baseado nas características desta ferramenta, para redução das falhas e tarefas de manutenção no Subsistema de Controle de Tensão, do Sistema Desbobinador de Alumínio de um processo industrial de Laminação. Primeiro, é realizada uma breve descrição do modelo de implantação proposto, seguida da descrição do sistema e de todo o processo de aplicação.

### 4.1 MODELO PROPOSTO DE IMPLANTAÇÃO

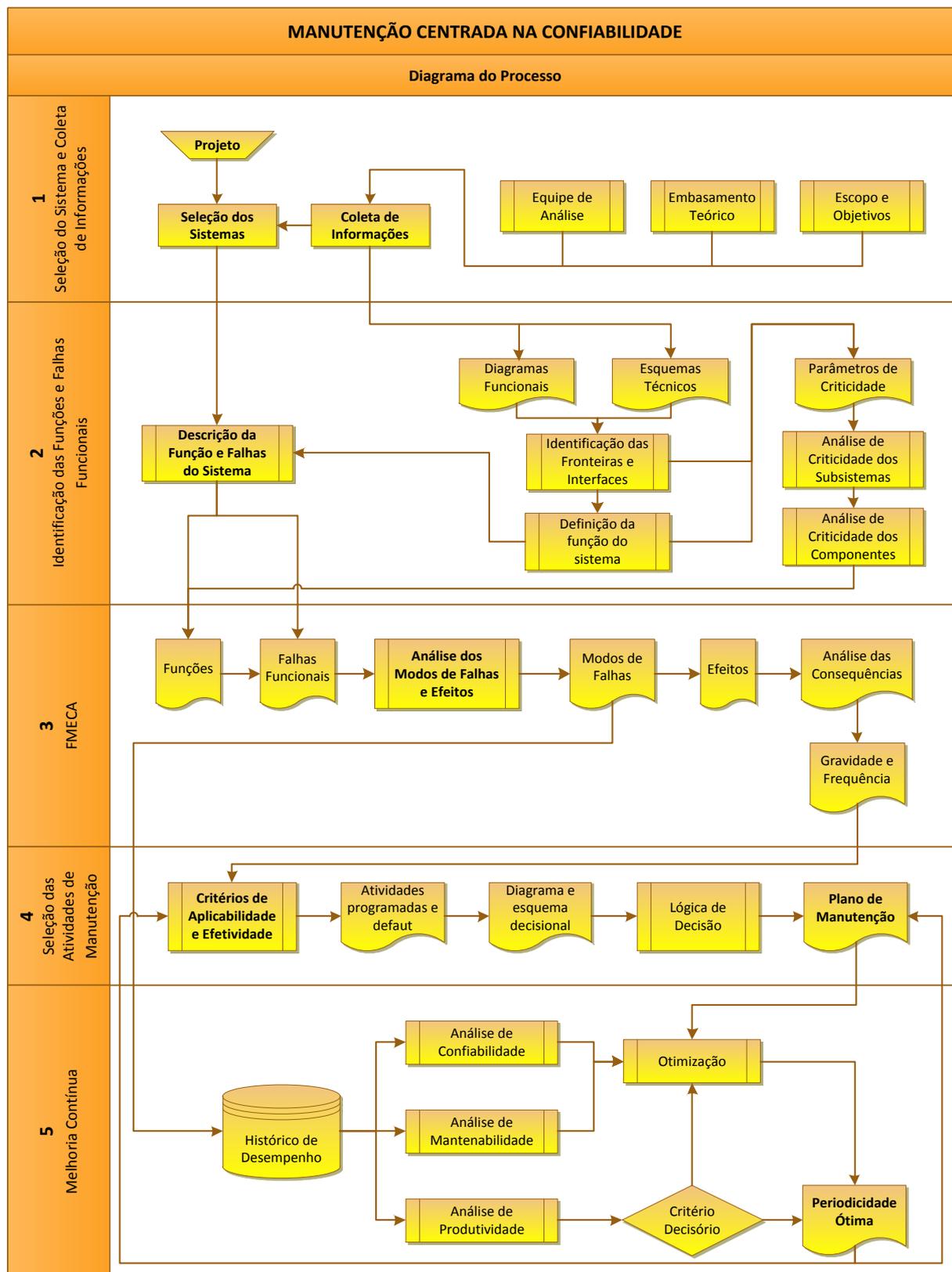
Os objetivos de um programa MCC, conforme apresentados no item 3.1.1, podem se resumir a:

- ✓ conservar as funções do sistema;
- ✓ identificação das falhas funcionais e modos de falha;
- ✓ priorização das funções críticas;
- ✓ seleção das tarefas aplicáveis e efetivas; e
- ✓ aumento da confiabilidade do sistema.

A implantação do MCC em uma planta deve ser realizado de acordo com o contexto operacional e organizacional na qual ela se encontra, observando seus produtos, processos e procedimentos, identificando seu modelo de gestão, práticas de produção e manutenção, visando uma compreensão total do(s) fluxo(s) de produção do sistema em análise

Considerando as questões acima e as etapas para implantação observadas no item 3.2 é proposto um programa de implantação do MCC com base no seguinte fluxo, apresentado na figura 18:

- Seleção do sistema e coleta de informações;
- Identificação das Funções e Falhas do Sistema;
- Análise FMECA;
- Seleção das atividades de manutenção;
- Plano de Manutenção;
- Melhoria contínua.



**Figura 18:** Modelo de implantação da MCC  
**Fonte:** Adaptado pelo autor de Siqueira (2009, p. 21)

## 4.2 APLICAÇÃO DO MCC NO CONTROLE DE TENSÃO

O modelo de implantação proposto foi aplicado no Subsistema de Controle de Tensão do Desbobinador de Alumínio, de uma indústria de embalagens cartonadas. O Desbobinador de Alumínio faz parte do Processo de Laminação da indústria, responsável pela formação da embalagem cartonada, sendo considerada a linha mais crítica da fábrica.

O objetivo da aplicação do MCC foi a redução no número de pequenas paradas ocasionadas no Controle de Tensão. O Sistema Desbobinador de Alumínio como um todo era responsável por 17% de todas as paradas de máquina no processo de Laminação, sendo que desse percentual, 41% das falhas eram relacionadas ao Controle de Tensão.

### 4.2.1 Seleção do Sistema e Coleta de Informações

O primeiro passo foi a definição da equipe técnica responsável pela análise, execução e administração da metodologia, sendo formada por profissionais da área de manutenção (eletrônica, mecânica e automação), operação, com conhecimento abrangente do processo em questão, além disso, a equipe de análise contou com apoio do departamento de segurança da empresa.

O objetivo da análise foi à redução das falhas associadas ao subsistema de controle de tensão, reduzindo a ocorrência do modo de falha “perda de tensão”. Outro foco da análise foi na revisão e redução das tarefas de manutenção que não agregavam valor ao subsistema analisado.

No escopo foi decidida a análise ao nível de componente do subsistema de Controle de Tensão, priorizando os componentes com interação direta com o controle de tensão e definindo como parâmetros críticos o impacto na segurança operacional, impactos operacionais e econômicos.

#### 4.2.1.1 Estudo e embasamento teórico

O Desbobinador de Alumínio desbobina a folha de alumínio com tensão aproximada de 150 N (Newtons), podendo ser ajustada, para a formação da camada laminada da embalagem cartonada. O sistema ainda conta com uma troca automática de bobina.

Roisum (2006) define como tensionamento a força aplicada em uma linha (folha de alumínio) no sentido de direção da máquina, sendo alterado por qualquer objeto em contato com a folha.

O controle do tensionamento no sistema é fundamental para qualidade do processo, pois em caso de um tensionamento excessivo corre-se o risco da quebra da folha de alumínio, e um valor baixo de tensionamento produziria dobras, rugas, falhas em outros sistemas.

O subsistema de controle de tensão mantém o *set-point* do tensionamento através da posição do cilindro bailarino que fornece uma referência para a correção da velocidade do motor do desbobinador. A velocidade de referência do motor é determinada em função da velocidade da linha e corrigida de acordo com o diâmetro da bobina de alumínio e a posição do cilindro bailarino.

#### 4.2.2 Identificação das Funções e Falhas do Sistema

Esta etapa foi iniciada com a identificação dos limites e fronteiras do Subsistema de Controle de Tensão e dos sinais de entrada e saída.

O primeiro passo realizado na identificação das funções foi à elaboração de uma planilha de descrição do sistema (figura 19) que contém informações das funções e parâmetros dos componentes do subsistema, redundâncias, dispositivos de proteção e detalhes de instrumentação.

Foram elaborados os diagramas funcionais do Controle de Tensão, observando o funcionamento e identificando as funções de cada componente e possíveis falhas funcionais, sendo todo este processo documentado nos formulários de análise MCC.

#### 4.2.2.1 Fronteiras e interfaces

O subsistema analisado possui fronteira com todos os subsistemas do Desbobinador de Alumínio, pois uma falha no controle de tensão tem impacto direto na função principal do sistema.

Além disso, o subsistema possui entradas e saídas de outros sistemas do processo de laminação, como a referência de velocidade da planta (entrada), e sinais de alarme, preparo da emenda, e *set-point* de velocidade (saídas).

Todo o processo de identificação das fronteiras e interfaces foi documentado nos diagramas funcionais e formulários MCC.

#### 4.2.2.2 Diagramas funcionais

Os diagramas foram elaborados baseados na observação do subsistema em funcionamento, análise dos diagramas de instrumentação, eletrônica e mecânica. Ainda foram consultados a documentação do projeto da planta e análise da lógica de programação do sistema de controle.

Foram elaborados os seguintes diagramas:

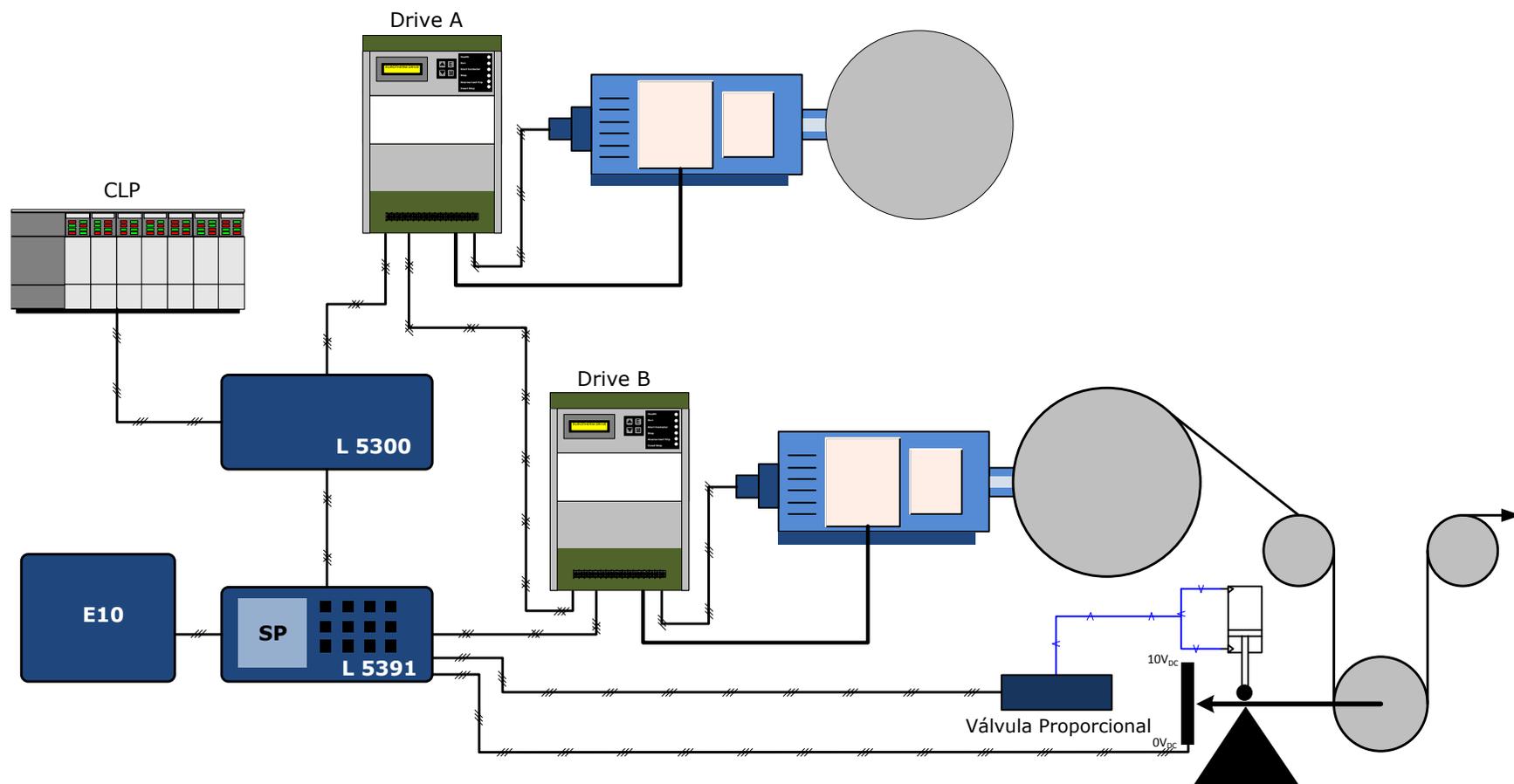
- ✓ diagrama funcional do controle de tensão;
- ✓ diagrama funcional do bailarino;
- ✓ diagrama dos sinais de controle,
- ✓ diagrama funcional do sistema eletroeletrônico; e
- ✓ representação do sistema mecânico de transmissão.

A figura 20 apresenta o diagrama funcional do controle de tensão, os demais diagramas encontram-se no apêndice (A) do trabalho.

<b>Planilha de Descrição do Sistema</b>	<b>Processo:</b> Fabricação embalagem cartonada	<b>Nº.:</b>	<b>Coord: ##</b>	<b>Data:</b>
	<b>Linha:</b> Laminação embalagem cartonada	01/04		11/02/2009
	<b>Equipamento:</b> Desbobinador de Alumínio	<b>Rev.:</b>	<b>Equipe:</b> ANÁLISE TENSIONAMENTO	<b>Folha:</b>
	<b>Conjunto:</b> Controlador de tensão	0		01/01
<b>Função:</b> Desbobinar rolo de alumínio com um valor de tensionamento de aproximadamente 150N (newtons), e realizar a troca automática da bobina em espera, sem ocasionar uma quebra de alumínio independente do valor de velocidade da linha (650m/min). O controle de tensão é realizado através da posição do cilindro bailarino que fornece uma referência para correção de velocidade do rolo no desbobinador através do motor CC. A velocidade de referência do motor é determinada em função da velocidade da linha e corrigida de acordo com o diâmetro da bobina de alumínio e a posição do cilindro bailarino.				
<b>Redundâncias:</b> Não há.				
<b>Dispositivos de Proteção:</b> Sobrecarga do motor, sobrecorrente, parâmetros de proteção do acionamento e proteção dos dispositivos eletrônicos.				
<b>Instrumentação e Controle:</b> Indicador de velocidade e tensionamento do desbobinador / Parâmetros do acionamento / Interface de rede / Malha de controle de tensão				

**Figura 19:** Planilha de Descrição do Sistema

**Fonte:** Autor (2011)



**Figura 20: Diagrama Funcional do Controle de Tensão**  
**Fonte: Autor (2011)**

#### 4.2.3 Seleção dos subsistemas

Definidos o escopo, foi realizada uma análise de criticidade, utilizando a metodologia “Análise ABC” apresentada no apêndice C, visando justificar a aplicação do MCC no Controle de Tensão, comprovando a criticidade do sistema no qual ele está inserido dentro do processo de produção.

Como o foco da implantação está na redução das falhas relacionadas à variação de tensão, não foi necessária uma análise nos demais subsistemas do Desbobinador de Alumínio, ficando a análise restrita ao Subsistema de Controle de Tensão.

#### 4.2.4 Seleção dos Componentes Críticos

O objetivo desta etapa foi classificar os componentes do Controle de Tensão, identificando os pontos críticos, que ao apresentarem uma falha terão um impacto maior sobre a função do sistema ou estão relacionados com o modo de falha em análise.

Outra ação da etapa de seleção foi definir os parâmetros críticos e seus limites, ao nível de subsistemas e componentes, que farão parte do cálculo de criticidade utilizado na análise MCC. A tabela 4 apresenta os valores limites e parâmetros escolhidos.

**Tabela 4 – Parâmetros de Criticidade**

Efeito	5	3	1
	Alto	Médio	Baixo
<b>Segurança</b>	Lesão com afastamento	Lesão sem afastamento	Sem risco
<b>(Tempo sem produzir)</b>	Maior que 2h	Entre 2h e 1h	Menor que 1h
<b>Qualidade</b>	Há impacto externo	Há impacto interno	Sem impacto
<b>Meio-ambiente</b>	Contaminação externa	Contaminação interna	Sem contaminação
<b>MTTR</b>	Maior que 2h	Entre 2h e 1h	Menor que 1h
<b>MTBF</b>	Mais que 6 quebras ano	Entre 2 e 6 quebras ano	Até 2 quebras anos
<b>Custo reparo</b>	Maior que R\$5.000,00	Entre R\$1.000,00 e R\$5.000,00	Menor que R\$1.000,00

**Fonte:** Autor (2011)

Antes da seleção dos sistemas críticos, foram identificados os componentes que compõem o subsistema, resultando na criação de uma lista de componentes atualizada do subsistema.

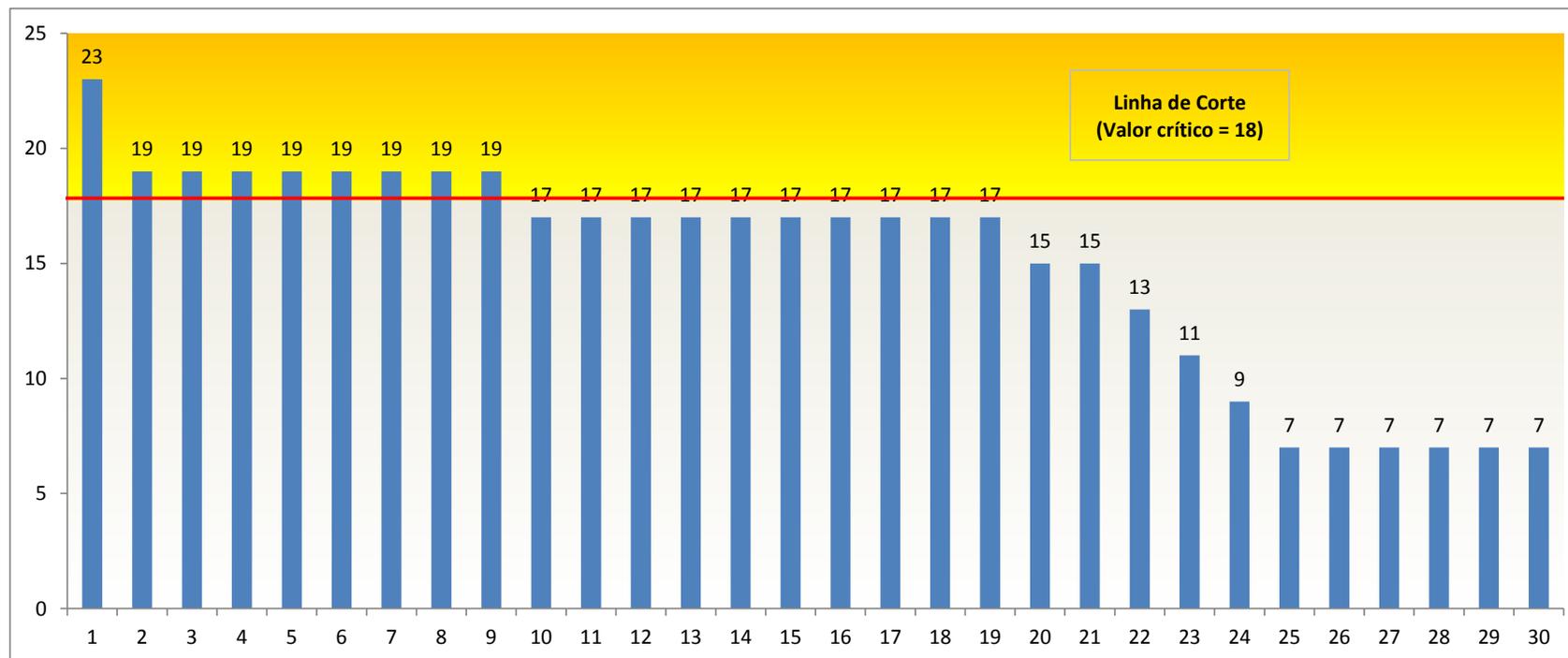
Após decompor o subsistema, foram utilizados os parâmetros críticos na classificação dos seus componentes, focando análise dos modos de malha apenas para os que apresentarem níveis críticos, utilizando como critério de seleção a regra “80/20” e o Diagrama de Pareto, descritos no item 3.3.2.

A figura 21 apresenta o resultado da análise dos componentes do Controle de Tensão.

Dos 30 componentes do subsistema, foram selecionados apenas 9 que apresentaram um número crítico superior ao limite de 18, estabelecido pela regra “80/20”. No apêndice B é apresentado o formulário de análise dos componentes.

Assim foram definiram-se os seguintes componentes que participarão da análise FMECA e decisional:

- ✓ motores de corrente contínua;
- ✓ acoplamento do motor ao eixo estriado;
- ✓ came do sensor magnético;
- ✓ drive de acionamento;
- ✓ eixo estriado;
- ✓ comunicação ótica;
- ✓ luva do eixo estriado;
- ✓ pinça inflável; e
- ✓ cilindros de passagem.



**Figura 21:** Análise de Criticidade dos Componentes do Sistema  
**Fonte:** Autor (2011)

#### 4.2.5 Análise FMECA

A análise das funções e falhas funcionais foi realizada em virtude do contexto operacional, onde o subsistema analisado apresenta somente uma função principal, apresentada na planilha de descrição do sistema (figura 19).

Foram identificadas duas falhas funcionais para o sistema em análise: (i) falha no controle de tensão da folha de alumínio; e (ii) falha de sincronismo de velocidade.

Após a identificação das falhas funcionais, realizou-se uma análise FMECA, através do formulário padrão ilustrado na figura 22. Na planilha os efeitos/consequências dos modos de falha foram associados as suas causas através de uma identificação sequencial em função do modo de falha de cada componente, esta identificação forma o código de identificação do modo de falha.

Como só foram analisados os componentes críticos, todos os modos de falha apresentados nesta etapa foram conduzidos à etapa decisional para seleção de atividades.

Com a análise FMEA foram identificados 6 modos de falha para as falhas funcionais do Controle de Tensão, resultando em 73 modos de falhas dos componentes do sistema.

#### 4.2.6 Seleção das atividades de manutenção

Para análise das tarefas utilizou-se o diagrama decisional apresentado na figura 17, e os critérios de aplicabilidade e efetividade das tarefas (apêndice D). A primeira parte da análise foi realizada no formulário de esquema decisional, ilustrado na figura 24, onde os modos de falha dos componentes foram classificados quanto a sua visibilidade e natureza do seu impacto.

Após conclusão do esquema decisional, realizaram-se a avaliação do RPN de cada modo de falha, e sua seleção das tarefas através do diagrama decisional. Foi necessário um diagrama de decisão para os modos de falha avaliados com um risco insignificante, para isso foi utilizado um diagrama decisional em função do RPN, apresentado na figura 23.

Concluído o processo de seleção, as atividades selecionadas foram documentadas no diagrama decisional (figura 25), juntamente com as demais informações dos modos de falha. A periodicidade das tarefas foi estabelecida com base na experiência dos analistas e manutentores, histórico dos equipamentos e documentação técnica e informações dos fabricantes.

A análise completa resultou na identificação de setenta e seis atividades de manutenção, das quais cinquenta e cinco foram aceitas pela equipe de análise e identificadas como viáveis, sendo sete atividades de detecção de falha (sendo três delas realizadas pela operação), vinte e três atividades de inspeção preditiva, seis atividades de substituição preventiva e dezenove mudanças de projeto.

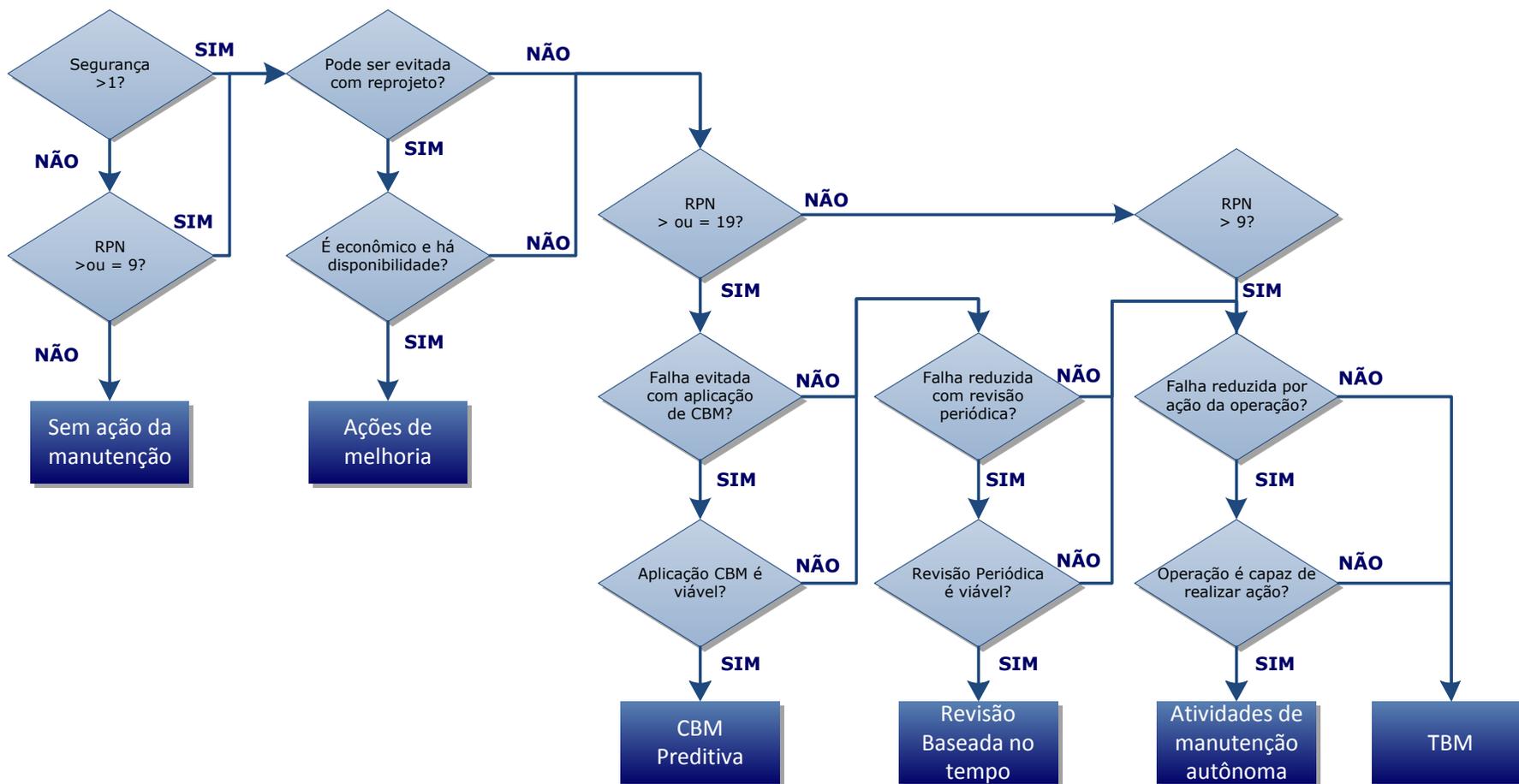
#### 4.2.6.1 Plano de manutenção

Concluída a seleção das tarefas, foram atualizados os planos de manutenção programada (plano preventivo, plano de inspeção preditiva e plano de manutenção autônoma) com as tarefas e frequências estabelecidas.

Após atualização dos planos de manutenção, as atividades se incorporaram a rotina sistêmica da equipe de manutenção da fábrica, sendo realizado conforme o planejamento da manutenção e periodicidade estabelecida.

PLANILHA ANÁLISE DE FALHAS - FMECA		Processo: Embalagem cartonada		No.: 01		Coordenador:		Data:					
		Linha: Laminação embalagem cartonada		Rev:		###		Abril/ 2009					
		Equipamento: Desbobinador de Alumínio				Equipe:		Folha: 1/2					
		Conjunto: Controlador de tensão				Análise Tensionamento							
<b>Descrição do Ítem:</b> Desbobinar rolo de alumínio com um valor de tensionamento de aproximadamente 150N (newtons), e realizar a troca automática da bobina em espera, sem ocasionar uma quebra de alumínio independente do valor de velocidade da linha.													
ÍTEM	FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO/CONSEQUÊNCIA DA FALHA	CAUSA			Falha Oculta	Frequência	Consequência	RPN			
SUBSISTEMA CONTROLADOR DE TENSÃO	Desbobinar rolo de alumínio com um valor de tensionamento de aproximadamente 150N (newtons), e realizar a troca automática da bobina em espera, sem ocasionar uma quebra de alumínio independente do valor de velocidade da linha	Falha no Bailarino	A falha no controle da tensão ocasiona o rompimento da folha de alumínio, gerando refugo, perda de produção e parada de 10 min. / Risco queimaduras na passagem do papel	1			Falha do bailarino		1	5	5		
				A			Travamento mecânico articulações		2	5	10		
				B			Travamento do rolo bailarino		2	5	10		
					1		Falha rolamento blindado		2	5	10		
				C			Cilindro pneumático do bailarino		2	3	6		
					1		Falha gaxetas do êmbolo		2	3	6		
					2		Desgaste conjunto retentor		2	3	6		
					3		Desgaste camisa		2	3	6		
					4		Desgaste da rótula da ponta da haste		2	3	6		
					5		Falha na mangueira pneumática		2	3	6		
					6		Falha na válvula proporcional do		2	3	6		
						1	Falha de calibração		2	3	6		
						2	Erro malha de controle		2	3	6		
						3	Falha de ar comprimido		2	3	6		
			Afeta controle de velocidade do motor ocasionando perda de tensão	D				1	3	3			
			Falha oculta possibilitando trabalho sem controle	E			S	3	3	9			
			Range muito pequeno para correção	F				10	3	30			
			Falha no controle de velocidade do motor		Perda de tensão ocasionando quebra alumínio	2			Falha no controle de velocidade do motor		1	5	5
				A	Ocasiona erro de referência e falha controle da velocidade do desbobinador. Derruba a linha da Laminadora				Falha link		1	5	5
						1			Falha de referência para o Drive		1	5	5
				2			Falha do set-point de tensão da folha de alumínio		1	5	5		

Figura 22: Formulário de Análise FMECA  
Fonte: Autor (2011)



**Figura 23:** Diagrama de seleção das tarefas em função do RPN  
**Fonte:** Autor (2011)

FUNÇÃO		FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CONSEQÜÊNCIAS DA FALHA						
				Descrição	H	S	MA	O		
I	Desbobinar rolo de alumínio com um valor de tensionamento de aproximadamente 150N (newtons), e realizar a troca automática da bobina em espera, sem ocasionar uma quebra de alumínio independente do valor de velocidade da linha	A	Falha no controle da tensão da folha de alumínio	1	Falha do bailarino	A falha no controle da tensão ocasiona o rompimento da folha de alumínio, gerando refugo, perda de produção e parada de 10 min. / Risco queimaduras na passagem do papel	N	S	N	S
					A. Travamento mecânico articulações					
					B. Travamento do rolo bailarino					
					B1. Falha rolamento blindado					
					C. Cilindro pneumático do bailarino					
					C1. Falha gaxetas do êmbolo					
					C2. Desgaste conjunto retentor					
					C3. Desgaste camisa					
					C4. Desgaste da rótula da ponta da haste do pistão					
					C5. Falha na mangueira pneumática					
					C6. Falha na válvula proporcional do bailarino					
					C6.1. Falha de calibração					
					C6.2. Erro malha de controle					
					C6.3. Falha de ar comprimido					
	D. Falha sensor de proximidade bailarino	Afeta controle de velocidade do motor ocasionando perda de tensão	N	S	N	S				
	E. Falha de indicação na posição up/down	Falha oculta possibilitando trabalho sem controle	S	S	N	S				
	F. Curso insuficiente do bailarino	Range muito pequeno para correção	N	S	N	S				
		Falha no controle de velocidade do motor	Perda de tensão ocasionando quebra alumínio	N	S	N	S			
		A. Falha link	Ocasiona erro de referência e falha controle da velocidade do desbobinador. Derruba a linha da Laminadora	N	S	N	S			
		A.1. Falha de referência para o Drive								
		A.2 Falha do set-point de tensão da folha de alumínio								

**Figura 24:** Formulário do Esquema Decisinal  
**Fonte:** Autor (2011)

DIAGRAMA DECISIONAL MCC				Processo: Fabricação embalagem cartonada				Nº.:	Coord: Nagao	Data: 01/04/2009		
				Linha: Laminação embalagem cartonada								
				Equipamento: Desbobinador de Alumínio				Rev.:	Equipe: Análise Tensionamento	Folha: 01/01		
				Conjunto: Controlador de tensão								
REFERÊNCIA DA INFORMAÇÃO			FILTRO/TAREFA				FREQÜÊNCIA = F	C	RISCO = F X C	TAREFA PROPOSTA	Frequência da Tarefa	Responsável pela Execução
F	FF	MF	DETECTIVA	PREDITIVA	PREVENTIVA	REPROJETO						
1	A	1A	N	N	N	N	1	5	5	Acidental	-	-
	B	1B	N	S	N	N	2	5	10	Análise de vibração. Nível global: velocidade, aceleração e envelope aceleração.	Mensal	Preditiva
		1B1	N	N	N	S				Sugestão: aquisição coletor nível global com software tipo Martin da SKF.	Único	Especialista Mecânico
							2	5	10	Utilização de rolamentos blindados com graxa poliuréia. Por exemplo NSK G207DU EEM	Sistemático	Mecânicos
	C	1C	N	N	N	S				Substituir cilindro pneumático do dancer por modelo de cilindro pneumático de baixo coeficiente de atrito.	Após Anál.	Manutenção
							2	5	10	Inspeção detalhada pela manutenção.	Anual	Manutenção
										Inspeção check list pelo operador	Semanal	Autônoma
		1C1	N	S	N	N	2	3	6	Inspeção detalhada pela manutenção.	Anual	Manutenção
		1C2	N	S	N	N	2	3	6	Inspeção check list pelo operador	Semanal	Autônoma
		1C3	N	S	N	N	2	3	6	Inspeção check list pelo operador	Semanal	Autônoma
		1C4	N	S	N	N	2	3	6	Inspeção check list pelo operador	Semanal	Autônoma
		1C5	N	S	N	N	2	3	6	Inspeção check list pelo operador	Semanal	Autônoma
		1C6	N	S	N	N	2	3	6	Verificação calibração da válvula e malha de controle.	Anual	Manutenção
		1C6.1	S	N	N	N	2	3	6	Instalação filtro absoluto 3 microns no circuito ar comprimido.	Única	Manutenção
		1C6.2	S	N	N	N	2	3	6	Verificação estado elemento filtrante. Troca filtro absoluto sob condição.	Mensal	Manutenção
		1C6.3	S	N	N	S				Melhoria do sistema de secagem de ar comprimido. Verificar qual é o ponto de orvalho atual.	Análise	Manutenção e Projetos
							3	3	9			
	D	1D	N	N	N	N	1	3	3	Já realizado travamento da fixação do carne.	Realizado	Manutenção
			S	N	N	N	1	3	3	Verificação do sinal/ajuste fino do sinal.	Semestral	Manutenção
	E	1E	N	N	N	S	10	3	30	Instalação de rolo duplo ou prolongar braço existente	Após Anál.	Manutenção
	F	1F	S	N	N	S	3	3	9	Instalação alarme posição up down do bailarino.	Após Anál.	Manutenção
	A	2A	N	N	N	N				Há spare part do link.	Único	Manutenção
							1	5	5	Anteriormente, o link entrava em falha por ruído do sinal de cálculo do diâmetro, hoje existe interlock física para desacoplamento do sinal quando entram o inversor do bumper ou do giro da tone. Problema resolvido.		
		2A1	N	N	N	N				Mudança da referência do sinal da velocidade atual da linha pela velocidade do rolo 32 (rolo não acionado mais próximo do desbobinador de alumínio. (Eliminação do atraso do sinal devido ao tempo de resposta da velocidade da linha em relação ao laminador 1		
							1	5	5		Após Anál.	Especialista Eletrônico
		2A2	N	N	N	S	1	5	5	Calibração da malha controle. (preparar tabela pressão x tensão)	Anual	Manutenção
			S	N	N	N	1	5	5	Check list operacional para verificação Pressão x Tensão	Diário	Operação

Figura 25: Formulário Diagrama Decisional

Fonte: Autor (2011)

#### 4.2.7 Processo de Atualização e Melhoria Contínua da Análise

Durante o processo de análise e após a sua conclusão foram realizadas auditorias com objetivo de avaliar os resultados obtidos e corrigir possíveis discrepâncias e falhas da equipe de análise.

Concluída a análise, verificou-se a efetividade das tarefas de manutenção com uma comparação com o plano de manutenção do sistema, evitando possíveis redundâncias, além disso, foi realizado um treinamento para os técnicos de manutenção e operação que não participaram da análise, informando as ações resultantes e atividades necessárias.

Todo o processo de Laminação, mais especificamente o Desbobinador de Alumínio e o Controle de Tensão, foram monitorados para comprovar o resultado da análise e monitorar se o número de ocorrências de falhas ligadas a problemas de tensionamento estava dentro do proposto.

Com base nos resultados do monitoramento dos modos de falhas e da avaliação das tarefas de manutenção, foram realizadas atualizações na análise MCC, principalmente relacionados a periodicidades das tarefas.

## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho propôs contribuir com metodologia de implantação da MCC com foco na redução e eliminação de falhas em sistemas industriais. Durante a sua execução foram observadas contribuições de natureza teórica e práticas.

Avaliando o resultado do trabalho do ponto de vista teórico, a revisão bibliográfica confrontou o conceito da MCC dos principais autores do tema, das principais versões MCC e de pesquisas na área de Confiabilidade e Manutenção, sintetizando os conceitos principais de cada obra e autor. Quanto à implantação da MCC, a revisão bibliográfica identificou as etapas essenciais que irão garantir a concretização dos objetivos propostos pela metodologia MCC, podendo ser consultada em futuras aplicações.

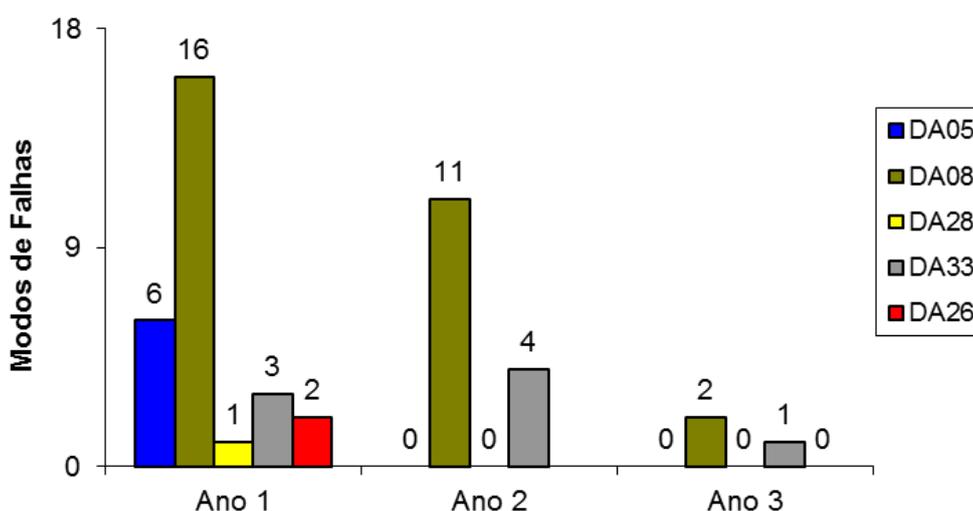
Na revisão do processo de implantação da MCC observou-se que algumas obras são próprias para aplicação a itens e sistemas específicos como a MIL (1980), NAVAIR (2005) e NAVSEA (2007). Para a metodologia de implantação apresentada, foram utilizados como referência as obras de Moubay (1997), Siqueira (2009), Smith (1993) e Smith e Hincliffe (2004).

O resultado da implantação da MCC na redução das falhas pode ser avaliado com base no gráfico da figura 26. No ano da implantação (ano 1) o Desbobinador de Alumínio apresentava um média mensal de 28 falhas relacionadas ao controle de tensão, divididas em quatro modos de falhas distintos.

Concluída a análise e a execução das atividades de manutenção (ano 2), houve uma redução de 47% na incidência mensal das falhas de tensionamento, chegando a um número de 15 falhas/mês. Além disso, não houve registro da ocorrência de dois modos de falhas nesse período.

Após a execução, avaliação e análise dos resultados das atividades de manutenção foram realizadas as atualizações do plano de manutenção, referente à etapa de melhoria contínua. Nesse último estágio (ano 3) a redução dos modos de falhas foi de 80% e não houveram registros dos dois modos de falhas eliminados no período anterior.

Com base nos resultados apresentados, a implantação da MCC mostrou-se uma ferramenta eficaz na redução de modos de falhas específicos de um sistema e na manutenção desse resultado.



**Figura 26:** Média mensal de falhas de tensionamento

**Fonte:** Autor (2011)

O trabalho pode ser avaliado positivamente nos seguintes aspectos:

- Consolidação da MCC como processo de documentação na análise das funções, falhas e identificação das ações de manutenção;
- Todas as etapas da análise exigem um alto grau de conhecimento do sistema em questão, sendo necessária a participação de profissionais de todas as áreas para um resultado otimizado;
  - A inclusão de parâmetros de criticidade específicos para o sistema em análise, avaliando-os sob o contexto operacional, já tradicionalmente aplicado na MCC, mas também enfatizando o caráter econômico do processo;
  - O processo de seleção utilizando a regra “80/20”, Diagramas de Pareto e a Classificação ABC, se mostraram eficazes e de simples utilização para os analistas, sem a necessidade do domínio de ferramentas complexas;
  - O processo de melhoria continua viabilizou a monitoria do processo de implantação, durante as etapas de análise, possibilitando a correção do mesmo e contribuindo de maneira significativa para o resultado final. Após execução das atividades propostas, o monitoramento do sistema analisado contribuiu com dados para a manutenção dos resultados.

Durante a análise algumas dificuldades foram observadas:

- A necessidade de treinamento para a equipe de analistas, na metodologia MCC e emprego de suas ferramentas, pois durante o processo de análise a não compreensão total da metodologia por parte de alguns membros da equipe, resultou em atrasos e deficiência na análise;
- A análise focada apenas ao subsistema responsável pela falha funcional limitou o processo de análise de falhas somente ao limite do mesmo;
- A participação não efetiva de um técnico de segurança, resultou em uma subjetividade na avaliação das consequências relacionadas a impactos ambientais e riscos de segurança;
- A periodicidade de manutenção poderia ser mais efetiva com aplicação de métodos estatísticos e uma análise de dados mais profunda.

Para futuros trabalhos, além da avaliação dos pontos negativos apresentados anteriormente, sugere-se:

- (i) Utilização de um *software* de análise MCC, facilitando o processo de desenvolvimento e aumentando a confiança na documentação;
- (ii) Criar um banco de dados de cada equipamento, visando sua utilização em análises estatísticas e matemáticas, para determinar a periodicidade de manutenção de forma mais eficaz.

De forma geral, o trabalho proposto atingiu seu objetivo principal, que consistia na apresentação metodologia MCC e criação de um modelo de aplicação orientado na redução de falhas funcionais.

## 6 REFERÊNCIAS

ALSYOUF, Imad. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal ProductionvEconomic**, v. 121, n. 1, p. 212-223, mai. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade: terminologia. Rio de Janeiro, 1994.

BACKLUND, Fredrik. **Managing the Introduction of Reliability-Centred Maintenance, RCM – RCM as a method of working within hydropower organisations**. 2003. 317 f. Thesys (Doctoral) – Departament of Business Administration and Social Sciences – Division of Quality and Environmental Management, Lulea University of Technology. Lulea, 2003.

BASSETTO, S.; SIADAT, A. & TOLLENAERE, M. The management of process control deployment using interactions in risks analyses. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. Montreal, v. 24, p. 458-465, 2011.

BLOCH, P.; GEITNER, K. **Machinery Component Maintenance and Repair: practical machinery management for process plants**. 3ª. ed. Burlington: Elsevier Inc., v. 3, 2005.

BLOOM, N. **Reliability Centered Maintenance (RCM): implementation made simple**. 1ª. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2006.

CARAZAS, Fernando J. G. **Decisões baseadas em Risco: Método aplicado na Indústria de Geração de Energia Elétrica para seleção de equipamentos críticos e políticas de manutenção**. 2011. 238 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

DHILLON, B. S. **Engineering maintenance: a modern approach**. 2ª. ed. Florida: CRC Press , 2002.

DHILLON, B. S. **Maintainability, maintenance and reliability for Engineers**. 1ª. ed. New York: CRC Press, 2006.

DOHI, T. et al. Optimizing the repair-time limit replacement schedule with discounting and imperfect repair. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 7, n. 1, p. 71-84, jan-abr 2001.

EFESO CONSULTING. **Planned Maintenance**: training. rel. I 03/2002. São Paulo, 2002.

FERREIRA, A. B. D. H. **Novo dicionário de língua portuguesa**. 3<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

FILHO, G. B. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. 1<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

GARZA, Luiz. **A Case Study of the Application of Reliability Centered Maintenance (RCM) in the Acquisition of the Advanced Amphibious Assault Vehicle (AAAV)**. 2002. 85 f. Thesys (Master) – Naval Postgraduate School, United States Navy. California, 2002.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUTIÉRREZ, A. M. **Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios**: enfoque sistémico kantiano. 1<sup>a</sup>. ed. Colômbia: AMG, 2005.

HEADQUARTERS. **Failure Modes, Effects and Criticality Analyses (FMECA) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities**. Technical Manual (TM 5-698-4). Department of the Army. Washington, DC, 2006.

HOKSTAD, Per & TRYGVE, Steiro. Overall strategy for risk evaluation and priority setting of risk regulations. **Reliability Engineering and System Safety**, n. 9, p. 100-111, 2006.

HORENBEEK, Adriaan V.; PINTELON, Liliane & MUCHIRI, Peter. Maintenance optimization models and criteria. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**. v. 1, n. 3, p. 189-200, DOI: 10.1007/s13198-011-0045-x

HUADONG, Yang; ZHIGANG, Bai. Risk Evaluation of Boiler Tube Using FMEA. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS AND KNOWLEDGE DISCOVERY. 7, 2009. **Anais...**: IEEEExplore Digital Library, 2009. p. 81-85.

Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5359954&isnumber=5359933>>. Acesso em: 10 abr. 2011.

doi: 10.1109/FSKD.2009.424

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION'S. **IEC 60812**: Analysis techniques for system reliability – procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). Switzerland, 2006.

JAPAN INSTITUTE FOR PLANT MAINTENANCE (JIPM). **600 Forms Manual**. Japan, 1995.

JIAN-MING, Cai; et al. The Risk Priority Number methodology for distribution priority of emergency logistics after earthquake disasters. Management Science and Industrial Engineering (MSIE), 2011 International Conference on..., p.560-562, 8-11 Jan. 2011. Disponível em:

<[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007\\_TR680488\\_9882.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR680488_9882.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2011.

doi: 10.1109/MSIE.2011.5707469

KARDEC, A.; NASFIC, J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KIM, J. H.; JEONG, H. Y. & PARK, J. S. Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for Railroad Systems. **International Journal of Automotive Technology**. Montreal, v. 10, n. 6, p. 753-759, 2009.

KOBBACY, A. H.; MURTHY, P. **Complex System Maintenance Handbook**. 1ª. ed. Manchester: Springer, 2008.

KOCH, Richard. **The 80/20 Principle**: the secret of achieving more with less. 1ª. ed. London: Nicholas Brealey Publishing Limited, 1998.

LEVERETTE, J. C. An Introduction to the US Naval Air System Command RCM Process and Integrated Reliability Centered Maintenance Software. In: RCM 2006 - The Reliability Centred Maintenance Managers' Forum. 2006. **Anais...**: p. 22-29.

LUNA, Sérgio V. **Planejamento de Pesquisa: uma introdução**. 1ª. ed. São Paulo: EDUC, 1997.

MARÇAL, Rui F. M. **Um método para detectar falhas incipientes em Máquinas Rotativas baseado em Análise de Vibrações e Lógica Fuzzy**. 2000. 124 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

MCDERMOTT, R. E.; MIKULAK, J.; BEAUREGARD, R. **The Basics of FMEA**. 2ª. ed. New York: CRC Press, 2009.

MILITARY STANDARD. **MIL-1629**. Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. US DEPARTMENT DEFENSE. Washington, DC, 1980.

MOBLEY, K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, **Maintenance Engineering Handbook**. 7ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

MOBLEY, R. K. **Root Cause Failure Analysis**. 1ª. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1999.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance: second edition**. 2ª. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

NAKAGAWA, T. **Maintenance theory of reliability**. 1ª. ed. Japan: Springer, 2005.

NASA. **Nasa Reliability-Centered Maintenance Guide**. National Aeronautics and Space Administration. USA, 2008

NAVAIR. **Management Manual: guidelines for the naval aviation Reliability-Centered Maintenance Process**. NAVAIR 00-25-403. Naval Air Systems Command. USA, 2005.

NAVSEA. **Reliability-Centered Maintenance (RCM) Handbook**. S9081-AB-GIB-010. Naval Sea Systems Command. USA, 2007.

NOWLAN, F. S. & HEAP, H. F. **Reliability-Centered Maintenance**. Technical Report AD/A066-579, National Technical Information Service, US Department of Commerce, Virginia, 1978.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. **Reliability-Centered Maintenance**. 1ª. ed. Califórnia: Dolby Access Press, 1978.

OLIVEIRA, U. R.; PAIVA, E. J. & ALMEIDA D. A. Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas FTA, FMEA e a análise crítica de especialistas. **Revista Produção**. São Paulo, v. 20, n. 1 p. 77-91, 2010.

PAPIC, Ljubisa; ARONOV, Joseph & PANTELIC, Milorad. Safety Based Maintenance Concept. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, New Jersey (USA), v. 16, n. 6, p. 533–549, dez. 2009.

PELROKORPI, Mika. **Feasibility Study of Reliability Centered Maintenance Process – Applying RCM II approach to customer feedback in SW development environment**. 2009. 55 f. Thesys Final (Bachelor of Science) – Department of Machine and Manufacturing Aeronautics, TAMK University of Applied Sciences. Tampere, 2009.

RAPOSO, José L. O. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada a Sistemas Elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2004.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System Reliability Theory: models, statistical methods, and applications**. 2ª. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

ROSIUM, David R. **What is the Best Tension for My Product**. Disponível em: < <http://www.tappi.org/content/enewsletters/eplace/2006/06PLA68.pdf> > acesso em 20 out. 2009.

SAE STANDART. **Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA)**. SAE Standard. Surface Vehicle Recommended Practice SAE -J1739. 2000.

SHARMA, A.; YADAVA, G. S.; DESHMUKH, S. G. A literature review and future perspectives on maintenance optimization. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 7, n. 1, p. 5-25, jan-abr 2011.

SHENOY, D.; BHADURY, B. **Maintenance resources management: adapting MRP**. 1ª. ed. London: Taylor & Francis Ltd, 2005.

SILVA, Edna L. & MENEZES, Estera M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração da Dissertação**. 4ª. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implantação**. 1ª (Reimpressão). ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G. R. **RCM: gateway to world class maintenance**. 2ª. ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, v. 1, 2004.

SMITH, Anthony M. **Reliability-Centered Maintenance**. 1ª. ed. Boston: McGraw-Hill, 1993.

SMITH, R.; MOBLEY, R. K. **Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers**. 1º. ed. Burlington: Butterworth Heinemann, 2007.

SOUZA, Fábio J. **Melhoria do Pilar “Manutenção Planejada” da TPM através da utilização do RCM para nortear as Estratégias de Manutenção**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

STARR, A. G. A STRUCTURED APPROACH TO THE SELECTION OF CONDITION BASED MAINTENANCE. In: 5<sup>th</sup> International Conference on FACTORY. 2-4 abr., 2000. **Anais...**: IEEEExplore Digital Library, p. 131-138.

SULLIVAN, G. P. et al. **Operations & Maintenance: best practices**. 2ª. ed. U.S. Department of Energy: Pacific Northwest National Laboratory, 2004.

TAVARES, L. A. **Administración moderna de mantenimiento: en español**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Novo Pólo Publicações, 1999.

THE EUROPEAN STANDARD. **EN 13306**: maintenance terminology. Brussels, 2001.

TSANG, A. H. C. Strategic dimensions of maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8 n. 1, p.7-39, jan-abr 2002.

TURAN, O.; LAZAKIS, I.; JUDAH; S & INCECIK, A. Investigating the Reliability and Criticality of the Maintenance Characteristics of a Diving Support Vessel. **Quality and Reliability Engineering International**. v. 27, n. 7, p. 931–946, nov. 2011.

WANG, Cheng-Hua & HWANG, Sheue-Ling. A stochastic maintenance management model with recovery factor. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 2, p. 154-164, Bingley (UK), abr-jun. 2004.

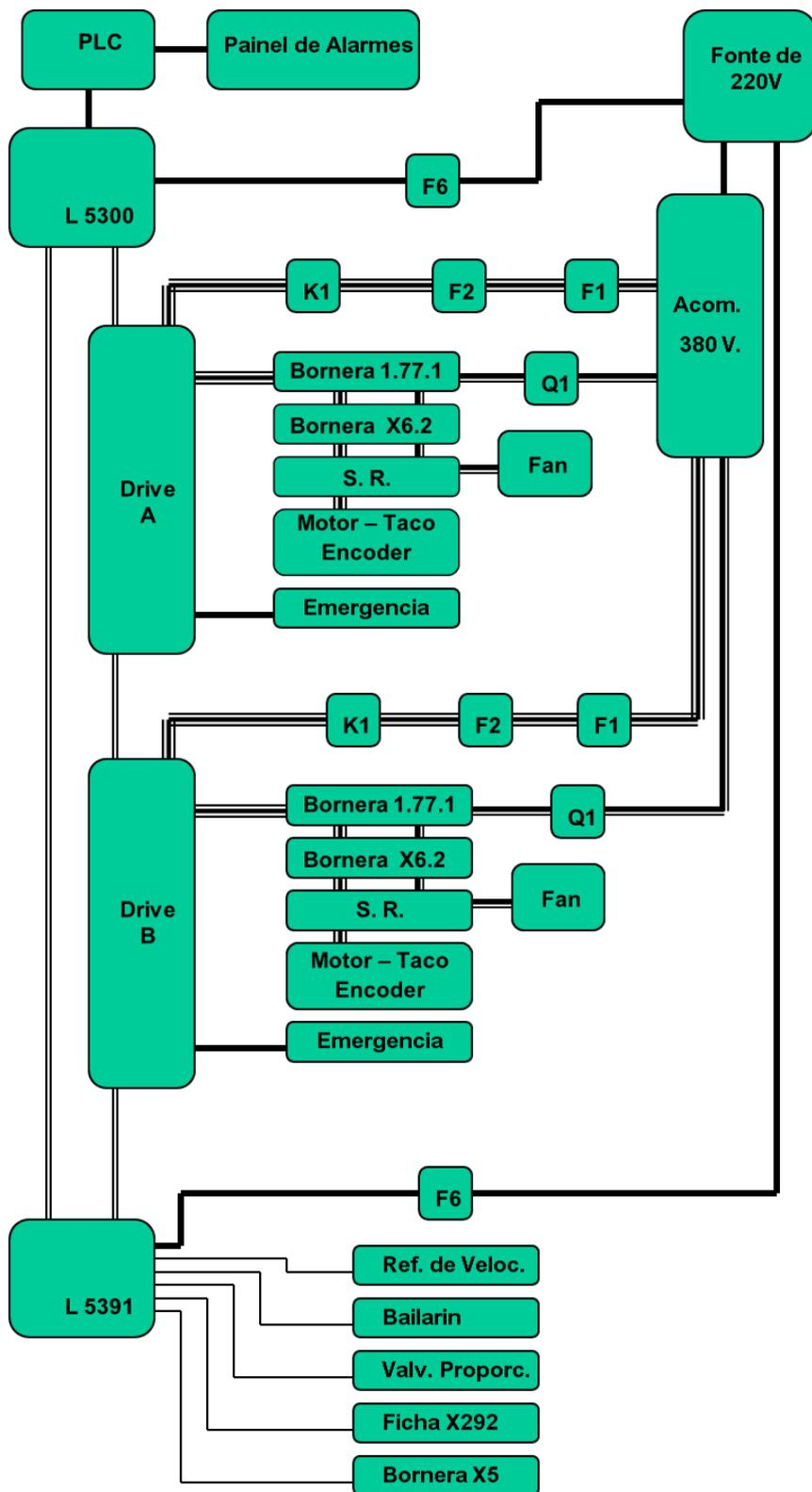
WESSELS, Willian R. & SAUTER, F. C. Reliability Analysis Required to Determine CBM Condition Indicators. In: Reliability and Maintainability Symposium. Fort Worth, 26-29 jan., 2009. **Anais...**: p. 454-459.

XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: INDG TecS, 2004.

ZAIONS, Douglas R. **Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma Planta de Celulose e Papel**. 2003. 219 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

## **APÊNDICE A - Diagramas funcionais utilizados na análise MCC**

Diagrama componentes eletroeletrônicos do Controle de Tensão



## Sistema mecânico de transmissão do Controle de Tensão

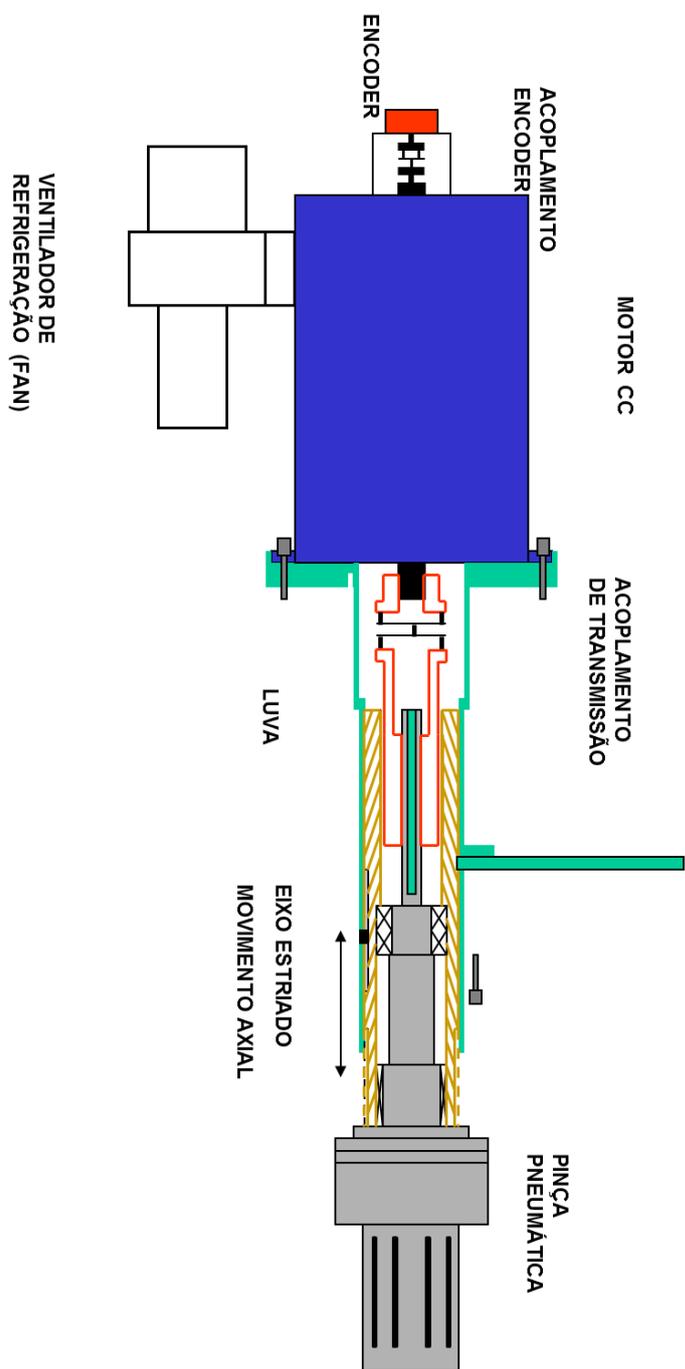
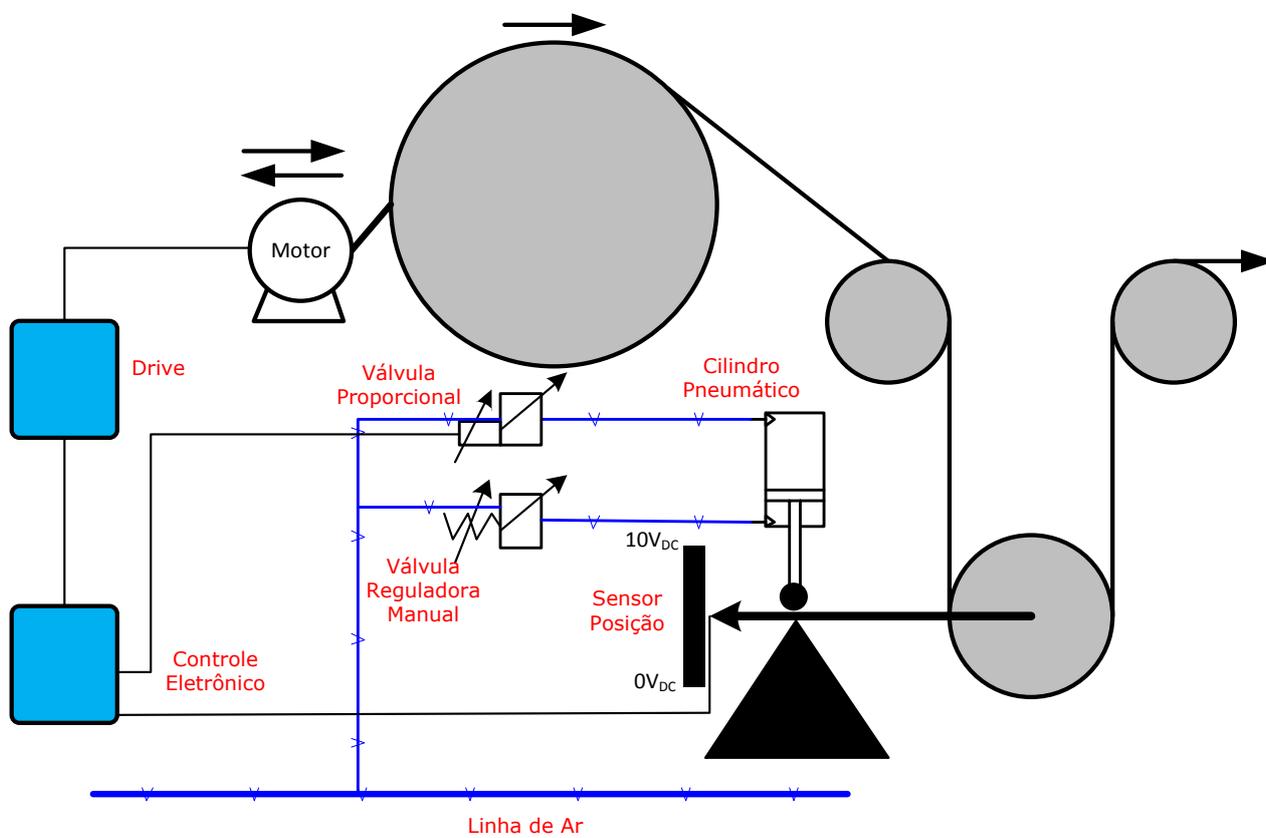
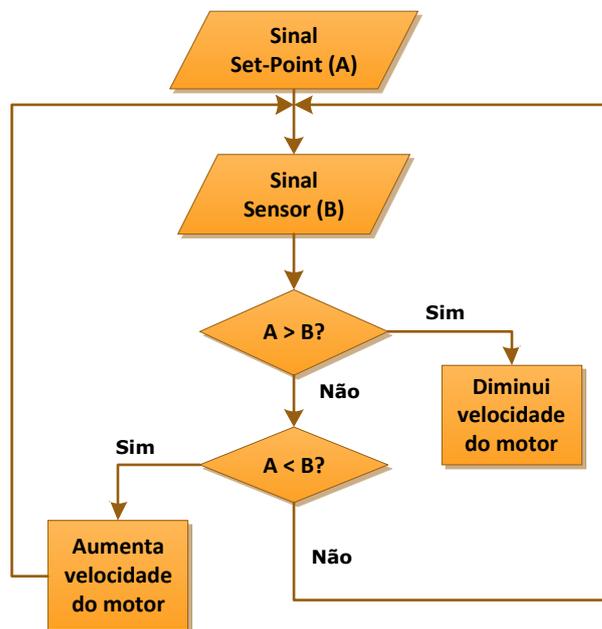


Diagrama funcional do Controle de Tensão



**APÊNDICE B - Formulário de Análise de Criticidade do Componente**

Legenda	Componentes	Percentua l Posição	Avaliação Críticidade	ACC Críticidade	Percentual Críticidade
1	Motor corrente contínua	3,33%	23	23	5,11%
2	Acop. do motor ao eixo estriado	6,67%	19	42	9,33%
3	Came do sensor magnético	10,00%	19	61	13,56%
4	Drive Eurotherm 590	13,33%	19	80	17,78%
5	Eixo estriado	16,67%	19	99	22,00%
6	Fibra ótica	20,00%	19	118	26,22%
7	Luva do eixo estriado	23,33%	19	137	30,44%
8	Pinça inflável	26,67%	19	156	34,67%
9	Rolos de passagem	30,00%	19	175	38,89%
10	Atuador pneumático	33,33%	17	192	42,67%
11	Braço do Dançarino	36,67%	17	209	46,44%
12	Coletor elétrico	40,00%	17	226	50,22%
13	Conexões elétricas	43,33%	17	243	54,00%
14	Módulo Link L5311 - Eurotherm	46,67%	17	260	57,78%
15	Módulo Link L5341 - Eurotherm	50,00%	17	277	61,56%
16	Módulo Link - L5391 - Eurotherm	53,33%	17	294	65,33%
17	Line drive - Eurotherm	56,67%	17	311	69,11%
18	Válvula proporcional pneumática	60,00%	17	328	72,89%
19	Ventilador CA p/ a refrigeração do motor CC	63,33%	17	345	76,67%
20	Encoder 2048 pulsos	66,67%	15	360	80,00%
21	Sensor indutivo de posição do dancer	70,00%	15	375	83,33%
22	Acop. do encoder	73,33%	13	388	86,22%
23	Válvula manual de compensação de peso	76,67%	11	399	88,67%
24	Painel de alarmes	80,00%	9	408	90,67%
25	Contactora siemens SIRIUS 3R3TF46	83,33%	7	415	92,22%
26	Disjuntores monofásicos	86,67%	7	422	93,78%
27	Fuzíveis F1 diazed 50 amp.	90,00%	7	429	95,33%
28	Fuzível ultra rápido p/ proteção de semicondutor	93,33%	7	436	96,89%
29	Indutores	96,67%	7	443	98,44%
30	Trafos de 400/220 Volts	100,00%	7	450	100,00%

## **APÊNDICE C - Classificação ABC**

A classificação e priorização das máquinas e equipamentos em uma planta industrial constituem um papel fundamental para a escolha de uma política de manutenção adequada, segundo critérios econômicos avaliados em função da criticidade do mesmo em relação ao processo.

O JIPM (1995) recomenda a utilização da classificação ABC, como uma ferramenta para avaliar a criticidade de uma máquina ou sistema dentro de um processo industrial, mediante a utilização de um fluxograma decisional apresentado na figura C1.

Para utilizar o fluxo, deve-se observar o sistema com base nos critérios apresentados, classificando em uma das classes (A, B ou C), por exemplo, um sistema que durante uma falha apresente um alto risco a segurança ou qualidade é automaticamente classificado como “Classe A”.

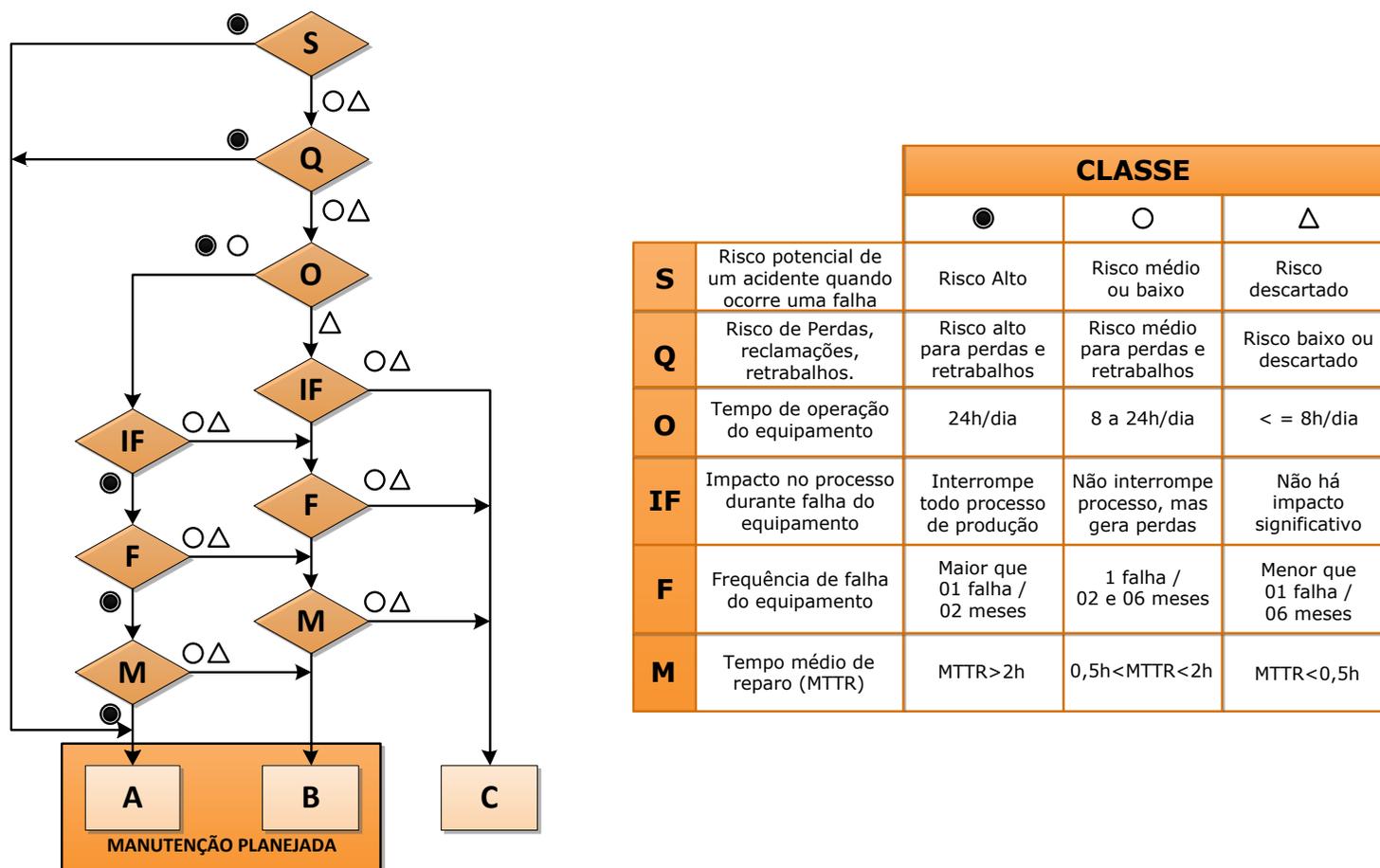
Após o término da análise, a atuação da manutenção é orientada para cada classe de equipamentos, sendo:

Classe A: Manutenção preditiva e preventiva, análise das falhas pela manutenção com suporte da operação, times de melhoria, times focados na redução de falhas, aplicação de RCM ou FMECA.

Classe B: Manutenção preditiva e preventiva, times focados na redução de falhas, análise das falhas pela manutenção.

Classe C: Manutenção corretiva, manutenção preditiva e/ou preventiva em equipamentos utilitários, monitoramento das falhas para evitar recorrências.

Para novos equipamentos estabelece-se a utilização de corretiva, preventivas segundo o fabricante, análise de falhas e sua classificação ABC após um ano de operação.



**Figura C1:** Fluxo Decisional e Critérios da Classificação ABC

Fonte: adaptado pelo autor de JIPM (1995)

**APÊNDICE D - Critérios de Aplicabilidade e Efetividade**

Tarefa	Aplicabilidade	Efetividade		
		Segurança	Operacional	Econômico
Serviço Operacional	Deve reduzir a taxa de deterioração funcional	Reduzir o risco de falha	Reduzir risco de falha a nível aceitável	Possuir custo reduzido
Deteção de Falhas	Possibilidade de identificar falhas e defeitos ocultos em operação	Detectar falhas ocultas reduzindo risco de falhas múltiplas	Geralmente não recomendado. Tarefa deve detectar falhas ocultas e possuir custo reduzido	Detectar falhas ocultas evitando efeitos econômicos e possuir custo nreduzido
Inspeção Preditiva	Possibilidade de indenticar falhas e defeitos por teste ou inspeção. Intervalo P-F adequado.	Reduzir probabilidade ou risco de falha garantindo uma operação segura	Reduzir risco de falha a nível aceitável	Tarefa deve possuir custo menor que o da falha evitada.
Reparo Preventivo	O item apresenta uma idade definida (de preferência um visível) no qual há um aumento da probabilidade condicional do modo de falha em consideração, sendo que a restauração previne a ocorrência do modo de falha a um nível aceitável para o usuário do sistema	Reduzir probabilidade ou risco de falha garantindo uma operação segura	Reduzir risco de falha a nível aceitável	Tarefa deve possuir custo menor que o da falha evitada.
Substituição Preventiva	O item apresenta uma idade definida (de preferência um visível) no qual há um aumento da probabilidade condicional do modo de falha em consideração e o reparo preventivo não é viável (razões de segurança, técnicas, econômicas)	Reduzir probabilidade ou risco de falha garantindo uma operação segura	Reduzir risco de falha a nível aceitável	Tarefa deve possuir custo menor que o da falha evitada.
Combinação das técnicas	Nenhuma atividade anterior consegue identificar ou corrigir a falha de maneira isolada, sendo necessária uma combinação de tarefas	Reduzir probabilidade ou risco de falha garantindo uma operação segura	Reduzir risco de falha a nível aceitável	Tarefa deve possuir custo menor que o da falha evitada.
Reprojeto	Nenhuma atividade anterior consegue identificar ou corrigir a falha de maneira isolada.	Reduzir probabilidade ou risco de falha garantindo uma operação segura	Reduzir risco de falha a nível aceitável	Combinação de tarefas possui custo superior ao da falha