

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**

FLÁVIO PIECHNICKI

MODELO DE APLICAÇÃO DA MCC EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

CURITIBA

2012

FLÁVIO PIECHNICKI

MODELO DE APLICAÇÃO DA MCC EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Área de concentração: Automação e Controle de Processos, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos

CURITIBA

2012

FLÁVIO PIECHNICKI

MODELO DE APLICAÇÃO DA MCC EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Área de concentração: Automação e Controle de Processos, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Agnelo Denis Vieira
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Curitiba, 27 de julho de 2012.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que se mostrou criador e protetor, que trouxe a calma e a tranquilidade necessárias para a concretização desta etapa.

À minha família, por acreditar em mim. Seu cuidado e dedicação trouxeram a esperança para seguir sempre confiante. De maneira especial ao meu irmão, Ademir Piechnicki, pelos conselhos e pela ajuda profissional.

Aos meus amigos, pelas alegrias e tristezas compartilhadas. Em especial aos amigos Leandro, Sílvio e Gilson, por sua ajuda pessoal e profissional.

Ao professor Dr. Eduardo Alves Portela Santos, por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo das supervisões das minhas atividades na PUC. É um prazer tê-lo como professor e orientador.

Ao professor Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures, um dos responsáveis pelo meu crescimento pessoal e profissional na caminhada do curso.

Ao professor Dr. Agnelo Vieira, pelas contribuições durante o programa e em minha qualificação.

Ao SENAI, que me proporcionou a oportunidade de realizar o curso, disponibilizando a ajuda financeira e o tempo necessário.

Ao gerente da unidade do SENAI de Telêmaco Borba, Sr. Carlos Alberto Jakovacz e ao coordenador Sr. José Luis Lino Andrioni, pessoas importantes que me apoiaram em todos os processos envolvidos para a concretização deste feito.

Meu agradecimento especial a todos aqueles que de alguma forma auxiliaram direta e indiretamente na realização deste curso.

Se quiser ter uma vida feliz, amarre-se a
uma meta, e não às pessoas nem às
coisas.

(Albert Einstein)

RESUMO

Os sistemas industriais atuais são obrigados a operar dentro de limites, metas e parâmetros estabelecidos, com o objetivo de reduzir custos e garantir a disponibilidade e confiabilidade. Neste contexto encontra-se a função manutenção, que tem como objetivo principal aumentar a vida útil do equipamento, ou ao menos, o tempo médio para a próxima falha, cujo reparo pode ter um custo elevado. Além disso, espera-se que as políticas de manutenção sejam eficazes e possam reduzir a frequência das interrupções de trabalho e as consequências indesejáveis destas paradas para o processo como um todo. 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 as atividades desnecessárias, aumentando a confiabilidade do sistema, através da redução de ocorrências das falhas. O modelo de implantação da MCC proposto nesse trabalho é composto das etapas: (i) preparação do estudo; (ii) seleção do sistema; (iii) análise das funções e falhas; (iv) seleção dos sistemas críticos; (v) análise crítica dos modos de falha e efeitos; (vi) seleção das atividades de manutenção e (vii) melhoria contínua. Explorando as características dos processos industriais, a metodologia para implantação da MCC é aplicada em sistemas que possuem diferentes funções, tamanhos, segmentos industriais e níveis de maturidade da manutenção. Neste contexto são selecionados os componentes críticos e identificadas as atividades de manutenção com base no contexto operacional e nas consequências de suas falhas. Além disso, contribui com a exploração dos benefícios da utilização da MCC na seleção das melhores políticas de manutenção.

Palavras-chave: Manutenção, Falhas, Confiabilidade, Políticas de Manutenção.

ABSTRACT

Industrial systems today are required to operate within limits, set goals and parameters, in order to reduce costs and ensure availability and reliability. In this context is the maintenance function, which aims primarily to increase the life of the equipment, or at least, the median time to next failure, whose repair can be expensive. Further, it is expected that maintenance policies are effective and can reduce the frequency of work stoppages and the undesirable consequences of these charts for the process as a whole. The Reliability Centered Maintenance (RCM) is a technique that can help organizations to develop a systematic maintenance program, achieving the objectives in relation to cost-effectively effectively. The RCM combines other techniques and tools in a structured methodology for the selection of maintenance actions, reducing costs and unnecessary activities, increasing system reliability by reducing the occurrence of failures. The implementation of the RCM model proposed in this work consists of steps: (i) preparation of the study, (ii) selection system, (iii) analysis of the functions and failures, (iv) selection of critical systems, (v) review failure modes and effects, (vi) selection of maintenance activities and (vii) continuous improvement. Exploring the characteristics of industrial processes, the methodology for implementation of the RCM is applied in systems that have different functions, sizes, industries and levels of maturity of the maintenance. In this context, the critical components are selected and identified maintenance activities based on the operational context and the consequences of their failure. Moreover, it contributes to the exploration of the benefits of using RCM in selecting the best maintenance policies.

Keywords: Maintenance, Failures, Reliability, Maintenance Policies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxo das etapas para a realização do trabalho.....	17
Figura 2: Evolução temporal da manutenção.....	20
Figura 3: Desenvolvimento das técnicas de manutenção.....	23
Figura 4: Técnicas de manutenção.....	28
Figura 5: Fluxograma para classificação ABC de máquinas e equipamentos.....	30
Figura 6: Disponibilidade de uma máquina/equipamento.....	32
Figura 7: Evolução da MCC.....	37
Figura 8: Diagrama de Implantação da MCC.....	39
Figura 9: Intervalo P-F.....	45
Figura 10: Curva da Banheira.....	46
Figura 11: Padrões de Falha.....	47
Figura 12: Fluxo de Aplicação do FMECA.....	51
Figura 13: Consequências de um modo de falha em vários níveis.....	52
Figura 14: Matriz de Criticidade.....	58
Figura 15: Fluxo de decisão das funções significativas.....	59
Figura 16: Níveis de avaliação das consequências.....	61
Figura 17: Formulário para registro das consequências das falhas.....	62
Figura 18: Formulário de Análise Decisional.....	67
Figura 19: Diagrama Decisional.....	69
Figura 20: Diagrama de Processo MCC.....	73
Figura 21: Fluxo das etapas de implantação da MCC.....	74
Figura 22: Diagrama do sistema de geração de ozônio.....	77
Figura 23: Componentes escolhidos e a análise de criticidade.....	79
Figura 24: Formulário da análise FMEA.....	80
Figura 25: Diagrama decisional em função do RPN.....	81
Figura 26: Planilha do esquema decisional.....	82
Figura 27: Planilha do Diagrama Decisional.....	83
Figura 28: Linha de refinação de alta consistência.....	86
Figura 29: Subsistema do ciclone primário e do alimentador secundário.....	87
Figura 30: Planilha de Descrição do Sistema.....	88
Figura 31: Fluxograma de operação do sistema de refinação.....	89
Figura 32: Formulário padrão de análise FMEA.....	91

Figura 33: Diagrama Decisional MCC	92
Figura 34: Esquema Decisional MCC	93
Figura 35: Sistema de picagem de resíduos de madeira	96
Figura 36: Picador de resíduos de madeira.....	96
Figura 37: Planilha FMEA do sistema do picador de madeiras.....	99
Figura 38: Planilha do esquema decisional MCC do Picador.....	101
Figura 39: Planilha do diagrama decisional do MCC.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação ABC de máquinas e equipamentos	29
Tabela 2: Principais indicadores de desempenho utilizados (%).	31
Tabela 3: Comparação da Manutenção Tradicional com a MCC	34
Tabela 4: Níveis de Severidade	54
Tabela 5: Níveis de Frequência.....	55
Tabela 6: Níveis de Detecção	56
Tabela 7: Seleção dos parâmetros críticos	78
Tabela 8: Equipamentos selecionados para análise MCC	90
Tabela 9: Equipamentos selecionados para análise MCC	98
Tabela 10: Plano de Manutenção para o sistema do picador	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção
ATA	<i>Air Transport Association of America</i>
CA	Análise de Criticidade
CBM	Manutenção Baseada em Condições
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
CTMP	Pasta Químico Termo Mecânica
CTMP	<i>Chemical Thermo Mechanical Pulping</i>
DoD	Departamento de Defesa Americano
ECM	<i>Experience-Centered Maintenance</i>
EOE	Evidência Operacional/Econômica
ESA	Evidência Segurança/Ambiental
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
FF	Falhas Funcionais para cada Função
FMEA	Análise dos Modos de Falha e Efeitos
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode Effects e Criticality Analysis</i>
FMECA	Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
FTA	Árvore de Análise de Falhas
HAZOP	<i>Hazard and Operability Studies</i>
HAZOP	Análise de Operabilidade de Perigos
JIPM	<i>Japan Institute of Plant Maintenance</i>
JIPM	Instituto Japonês de Manutenção em Plantas
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MPT	Manutenção Produtiva Total
MSG	<i>Maintenance Steering Group</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTBF	Tempo Médio entre Falhas
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
MTTR	Tempo Médio para Reparo
OOE	Evidência Oculta Operacional/Econômica

OSA	Oculto Segurança/Ambiental
RCM	<i>Reability Centered Maintanance</i>
RPN	Número de risco
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
TBM	Manutenção Baseada no Tempo
TBM	<i>Time Based Maintenance</i>
TPM	Manutenção Produtiva Total
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA E QUESTÃO DE PESQUISA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo Principal.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 DEFINIÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	16
1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2 MANUTENÇÃO	19
2.1 CONCEITO DE MANUTENÇÃO.....	19
2.2 EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	20
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MANUTENÇÃO.....	23
2.3.1 Manutenção Corretiva.....	24
2.3.2 Manutenção Preventiva	25
2.3.3 Manutenção Preditiva	26
2.4 CLASSIFICAÇÃO ABC.....	29
2.5 INDICADORES DE MANUTENÇÃO.....	30
2.5.1 MTBF – <i>Mean Time Between Failures</i>	31
2.5.2 MTTR – <i>Mean Time To Repair</i>	31
2.5.3 Disponibilidade	32
2.5.4 Confiabilidade	33
2.6 MCC – MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE.....	33
2.6.1 Objetivos do MCC.....	34
2.6.2 Histórico da MCC.....	35
3 METODOLOGIA PARA A APLICAÇÃO DA MCC	38
3.1 FUNDAMENTOS DA MCC	38
3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA	39
3.2.1 Nível de análise	40
3.2.2 Seleção do sistema e coleta de informações.....	40
3.2.3 Identificação do sistema	41
3.2.4 Funções do Sistema	43
3.3 ANÁLISE DAS FALHAS.....	44

3.3.1	Classificação das Falhas	44
3.3.2	Mecanismos de Falhas	45
3.3.3	Modos de Falha	48
3.4	DOCUMENTAÇÃO DAS FALHAS	49
3.4.1	Análise FMEA	49
3.4.2	Análise FMECA	50
3.5	EFEITOS DAS FALHAS	51
3.6	CLASSIFICAÇÃO DOS EFEITOS	53
3.7	ANÁLISE E DECISÃO	58
3.7.1	Consequências das Falhas.....	58
3.7.2	Funções Significantes.....	59
3.7.3	Lógica de Decisão	60
3.7.4	Aplicabilidade da manutenção	62
3.7.5	Efetividade da manutenção	66
3.7.6	Seleção das atividades	66
3.7.7	Periodicidade das atividades	70
3.8	PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO E REVISÃO.....	71
4	VISÃO GERAL DA PROPOSTA DO MODELO DE APLICAÇÃO MCC.....	72
5	APLICAÇÃO DA MCC - ESTUDO DE CASO	75
5.1	ESTUDO DE CASO 1	75
5.1.1	Preparação do Estudo	76
5.1.2	Seleção do sistema	76
5.1.3	Análise das funções e falhas	77
5.1.4	Seleção dos sistemas críticos.....	78
5.1.5	Análise crítica dos modos de falha e efeitos.....	79
5.1.6	Seleção das Atividades de Manutenção.....	80
5.1.7	Melhoria contínua	84
5.1.8	Conclusão.....	84
5.2	ESTUDO DE CASO 2.....	85
5.2.1	Preparação do Estudo	85
5.2.2	Seleção do sistema	85
5.2.3	Análise das funções e falhas	88
5.2.4	Seleção dos sistemas críticos.....	90
5.2.5	Análise crítica dos modos de falhas e efeitos.....	90

5.2.6 Seleção das atividades de manutenção	92
5.2.7 Melhoria contínua	93
5.2.8 Conclusão.....	94
5.3 ESTUDO DE CASO 3.....	94
5.3.1 Preparação do estudo.....	95
5.3.2 Seleção do sistema	95
5.3.3 Análise das funções e falhas	97
5.3.5 Análise crítica dos modos de falhas e efeitos.....	98
5.3.6 Seleção das atividades de manutenção	99
5.3.7 Melhoria contínua	103
5.3.8 Conclusão.....	103
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
REFERÊNCIAS.....	109

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.

A globalização, o aumento dos níveis de automação dos processos industriais e a ambição para aplicação de produção enxuta aumentam a demanda de uma manutenção cada vez mais eficaz (SALONEN e DELERYD, 2011).

As atuais políticas de gestão resultam em estoques cada vez menores, processos mais enxutos e sistemas dimensionados praticamente no limite de sua capacidade operacional, fazendo 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.

De acordo com Tsang (2002), o desenvolvimento de técnicas e métodos de manutenção deve fazer frente às 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 (*Reability Centered Maintanance*). Contudo, a escolha da correta política de manutenção a ser utilizada em uma indústria ou processo precisa ser corretamente selecionada, pois impacta diretamente nos custos. De acordo com Samet *et al.* (2010), a performance de uma estratégia é geralmente avaliada em termos de média do custo total em um determinado horizonte ou em termos de disponibilidade do sistema de produção.

Para Tsarouhas (2011) o objetivo das estratégias de manutenção é aumentar o tempo entre as falhas e diminuir o tempo de reparo dos equipamentos. Além disso, espera-se que as políticas efetivas de manutenção possam, além de reduzir a frequência das interrupções para manutenção, evitar as mais indesejáveis

consequências dessas interrupções. As restrições relacionadas ao tempo, qualidade e custos obrigam as empresas a garantir a máxima disponibilidade dos equipamentos utilizados na produção. Nestas condições, a implementação de estratégias de manutenção preventiva são inevitáveis (SAMET *et al.*, 2010).

Neste escopo da manutenção, a análise da confiabilidade do equipamento é um fator essencial no gerenciamento de plantas industriais. Diversos são os métodos e técnicas utilizadas, como FTA (Árvore de Análise de Falhas), FMECA (Análise da Criticidade dos Modos e Efeitos da Falha), HAZOP (Análise de Operabilidade de Perigos). Essas técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de coletar e analisar o parâmetro de confiabilidade do sistema. Entre eles, a disponibilidade do sistema, o tempo médio entre as falhas (MTBF), o tempo médio de reparo (MTTR), o tempo disponível (*uptime*) da máquina e o tempo indisponível (*downtime*) da máquina. Os dados de confiabilidade do sistema estão geralmente embutidos no FMEA, o qual tem provado ser uma metodologia eficaz na avaliação dos elementos críticos de uma máquina/equipamento industrial. A técnica FMEA foi introduzida inicialmente como uma ferramenta para análise de falhas durante o processo de desenvolvimento do produto (MIL-STD 1629A), sendo depois utilizada no desenvolvimento de planos de TPM, de acordo com os princípios da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MOUBRAY, 1997).

1.1 TEMA E QUESTÃO DE PESQUISA

A manutenção é apenas umas das ferramentas utilizadas para melhorar a confiabilidade do sistema. O emprego de equipamentos mais confiáveis e redundantes, sistemas de informações também são empregados para tornar a instalação mais confiável. A regra da manutenção em sistemas de manufatura modernos está se tornando mais importante com empresas que adotam a manutenção como um elemento de lucro para os negócios (SHARMA e YADAVA, 2011).

Nos dias de hoje, os sistemas estão operando de forma mais eficiente, efetiva e econômica, para sustentar a sua sobrevivência a longo prazo (WANG e HWANG, 2004). Dentro deste contexto, a MCC busca 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).

Embora a literatura apresente trabalhos científicos 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. Além disso, o nível de maturidade da manutenção das empresas (Figura 3) quase não é levado em conta, sendo a MCC utilizada apenas no controle e redução de falhas. Desconsidera-se que a aplicação da metodologia e a consequente criação de um plano de manutenção podem forçar a adoção de melhores políticas de manutenção e, conseqüentemente, melhorar a confiabilidade do sistema.

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:

- Muitas vezes, do ponto de vista técnico, não é viável evitar uma falha;
- Mesmo que todas as falhas pudessem ser evitadas qual seria o custo dessa ação?

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

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é apresentar, adaptar, aplicar e avaliar a metodologia MCC, orientada para redução e prevenção de falhas em diferentes tipos de sistemas industriais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar um estudo atualizado da literatura com o tema Manutenção Centrada em Confiabilidade;
- Conceituar a manutenção, seus métodos, planejamento e ações com foco orientado para Manutenção Centrada em Confiabilidade;
- Desenvolver uma metodologia adaptada para a aplicação da MCC, com base nos padrões existentes.
- Aplicar o método adaptado da MCC em diferentes sistemas industriais, com funções, tamanhos e segmentos distintos;
- Avaliar os resultados da implantação do método da MCC proposto, com ênfase na redução das falhas funcionais e na escolha das políticas de manutenção.

1.3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa justifica-se pela abordagem da implantação da MCC na redução de falhas e na seleção das políticas de manutenção em diferentes sistemas industriais.

1.4 DEFINIÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA

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).

As etapas para a realização deste trabalho são demonstradas na Figura 1.

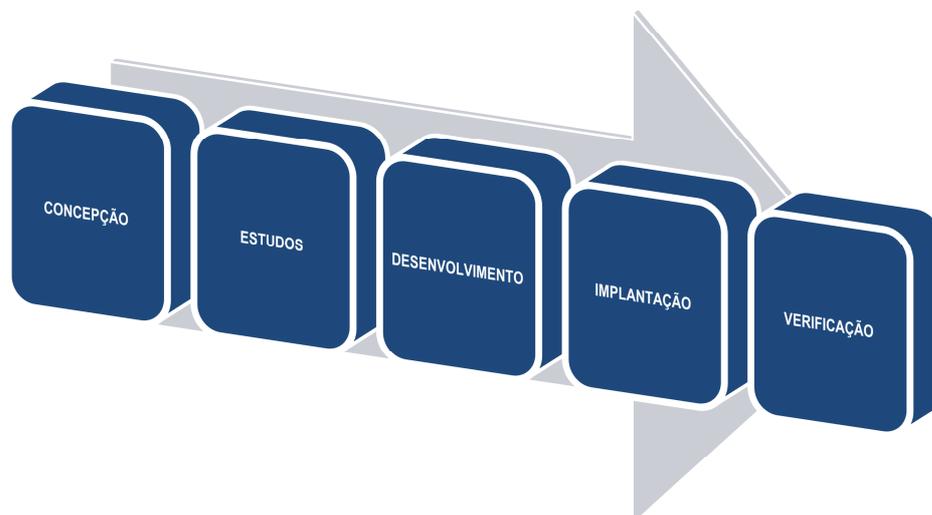


Figura 1: Fluxo das etapas para a realização do trabalho
Fonte: Autoria própria (2011)

Quanto à natureza, optou-se por uma pesquisa 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) embasamento teórico; (iii) seleção dos sistemas e subsistemas críticos; (iv) identificação e análise das funções e falhas funcionais; (v) análise dos modos de falha e efeitos; (vi) seleção das atividades de manutenção; e (vii) melhoria contínua.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é apresentado e estruturado nos seguintes capítulos:

No capítulo 1 são realizados os comentários iniciais, a contextualização do trabalho, tema e questão de pesquisa. Aborda também os objetivos do trabalho, sua justificativa, questões metodológicas e estrutura.

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. Também é apresentada a MCC, seus conceitos, objetivos e histórico.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta para a aplicação da MCC, com a revisão dos conceitos e definições empregadas, sua evolução temporal, os padrões existentes e a descrição das ferramentas utilizadas e do fluxo de aplicação.

No capítulo 4 são apresentados três estudos de caso da aplicação do modelo da metodologia MCC.

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

2 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).

2.1 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.

2.2 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 2 apresenta as três gerações da manutenção e o enfoque de cada uma.

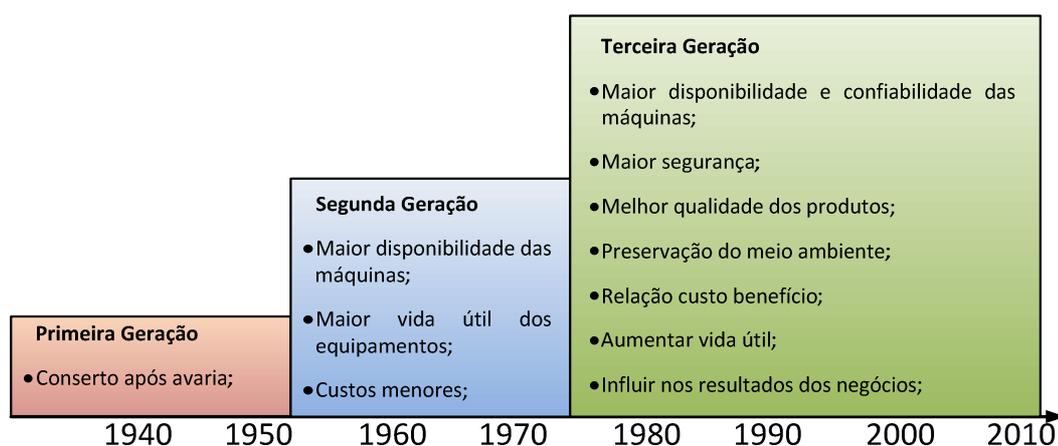


Figura 2: Evolução temporal da manutenção
Fonte: Moubray (1997)

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 ações corretivas executadas após uma falha ou defeito e rotinas operacionais como atividades de limpeza, controle e lubrificação (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009).

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 em 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).

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 o avanço da automação, aumenta-se a possibilidade de ocorrer uma falha ou defeito. Isso em função da 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 o 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 3.

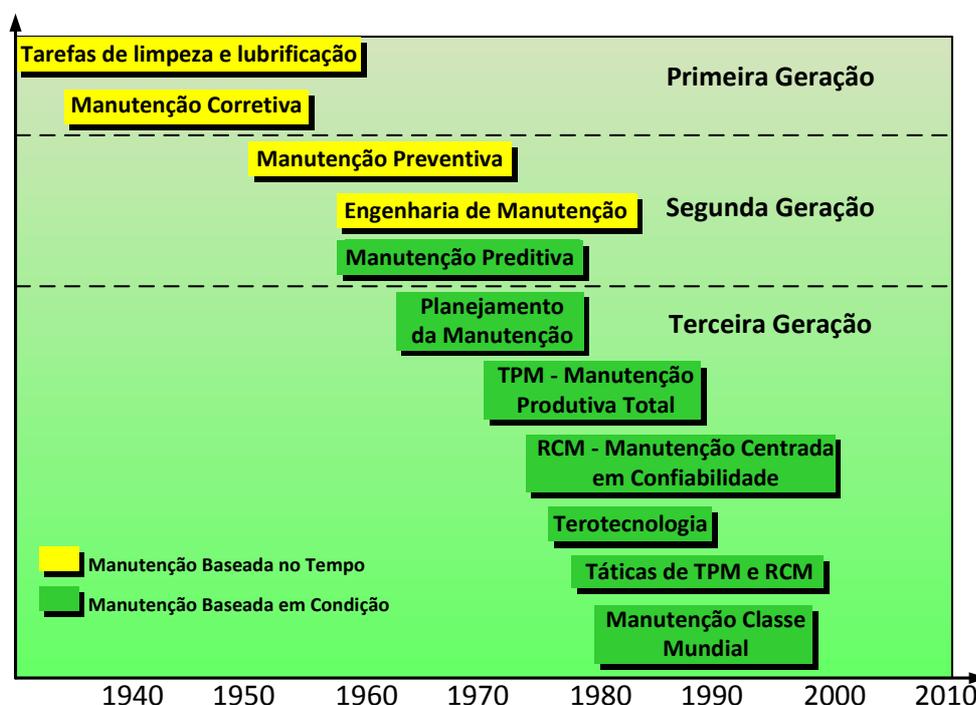


Figura 3: Desenvolvimento das técnicas de manutenção

Fonte: Gutiérrez (2005)

2.3 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 preestabelecidas, 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) complementam 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.

2.3.1 Manutenção Corretiva

Bloom (2006) define manutenção corretiva como: todo trabalho executado em uma máquina ou equipamento em falha com objetivo de repará-lo. 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 a 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 citam-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 à 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 (FILHO, 2008; KARDEC e NASCIF, 2009, PAPIC *et al.*, 2009).

2.3.2 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 (1999) 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 *et al.*, 2008; 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.

2.3.3 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 pode 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 sob 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 ação 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 a necessidade 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 4.

2.4 CLASSIFICAÇÃO ABC

No Planejamento e Controle de Manutenção é importante que as máquinas e equipamentos da planta sejam classificados, para a priorização das tarefas a serem realizadas. Em algumas situações as atividades de manutenção preventiva, preditiva, reprojeto e até mesmo inspeções demandam tempo e recursos, impactando diretamente nos custos. Entretanto, o grau de criticidade da máquina/equipamento deve ser levado em consideração.

Um método utilizado para a seleção de sistemas críticos do processo é a classificação ABC, aplicada em máquinas e equipamentos. Este método é definido pelo JIPM (*Japan Institute for Plant Maintenance*), que é um instituto japonês que trata questões de manutenção em plantas industriais, com princípios da TPM.

JIPM (1995) define a classificação ABC como uma ferramenta que pode ser adotada em qualquer tipo de processo, visando estabelecer as prioridades iniciais de atuação na manutenção. Para isso, é utilizada a tabela a seguir (Tabela 1), onde A tem prioridade alta, B intermediária e C baixa.

Tabela 1: Classificação ABC de máquinas e equipamentos

		Classe		
		A	B	C
S	Segurança, poluição	Forte influência	Qualquer influência	Nenhuma influência
Q	Qualidade	Influência significativa	Qualquer influência	Nenhuma influência
W	Tempo de trabalho	24 horas/dia	8-24 horas/dia	8 horas/dia
D	Quebras	Perdas por quebra > das outras linhas	Perdas por quebra > das máquinas anteriores e posteriores	Máquina reserva ou fácil de reparar
F	Frequência	De três quebras por mês a uma a cada dois meses	De uma quebra a cada dois meses a uma a cada seis meses	Menos de uma quebra a cada seis meses
M	Manutenabilidade	MTTR > 4 horas Custo > US\$ 1,5 mil	MTTR 1-4 horas Custo entre US\$ 0,5-1,5 mil	MTTR < 1 hora Custo < US\$ 0,5 mil

Fonte: Cunha, 2002

Para executar a classificação devem ser associadas respostas da Tabela 1, ao fluxograma da Figura 5, mostrado a seguir.

De acordo com a ABRAMAN (2007), os indicadores de manutenção mais utilizados no Brasil são mostrados na tabela a seguir (Tabela 2):

Tabela 2: Principais indicadores de desempenho utilizados (%)

Tipos	1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007
Custos	26,21	26,49	26,32	25,91	21,45	21,96	20,33
Frequência de Falhas	17,54	12,20	14,24	16,22	11,66	12,17	9,75
Satisfação do Cliente	13,91	11,01	11,76	11,86	8,62	8,11	8,93
Disponibilidade Operacional	25,20	24,70	22,60	23,24	19,58	19,81	18,51
Retrabalho	9,07	5,65	8,36	8,96	6,06	6,68	3,97
Backlog	8,07	6,55	8,98	10,41	9,32	6,92	11,57
Não utilizam	-	2,09	2,79	1,22	1,63	0,72	0,33
MTBF	-	-	-	-	11,89	11,69	14,21
MTTR	-	-	-	-	9,56	11,46	11,74
Outros Indicadores	-	11,31	4,95	2,18	0,23	0,48	0,66

Fonte: Abramam (2007)

2.5.1 MTBF – Mean Time Between Failures

O tempo médio entre falhas é definido como:

$$MTBF = TD / NC$$

Equação 1

Onde (TD) expressa o tempo disponível da máquina / equipamento e (NC) o número de intervenções corretivas realizadas.

O objetivo deste índice é observar o comportamento da máquina / equipamento, diante das ações de manutenção. Se o valor do MTBF aumentar com o passar do tempo, indica que o número de intervenções corretivas está diminuindo, e a disponibilidade aumentando (VIANA, 2009).

2.5.2 MTTR – Mean Time To Repair

O tempo médio de reparo é dado como uma relação entre as horas de indisponibilidade para a operação em função de atividades de manutenção e o número de intervenções corretivas no período (SIQUEIRA, 2009).

$$MTTR = TI / NC$$

Equação 2

Onde (TI) expressa o tempo indisponível da máquina / equipamento e (NC) o número de intervenções corretivas realizadas.

2.5.3 Disponibilidade

Conforme a ABNT (1994), disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma determinada função em um determinado instante, ou durante um intervalo de tempo determinado.

De um modo geral, a disponibilidade é o percentual de operação de um equipamento, ou uma planta, em função das horas totais do período. A Figura a seguir mostra este conceito.



Figura 6: Disponibilidade de uma máquina/equipamento.
Fonte: Viana (2009)

A partir da Figura 5 pode-se dizer que a disponibilidade é a relação entre o tempo disponível e o tempo total do período. Já que o tempo total (T) é a soma entre o tempo disponível (TD) e o tempo indisponível (TI), ou seja, $T = TD + TI$, pode-se calcular a disponibilidade de duas maneiras:

$$Disp = TD / T$$

Equação 3

$$Disp = 1 - (TI / T)$$

Equação 4

Onde (TD) expressa o tempo disponível, (TI) o tempo indisponível e (T) o tempo total.

2.5.4 Confiabilidade

De acordo com Kardec e Nascif (2009), confiabilidade (do inglês *reliability*) é a probabilidade de que um item possa desempenhar sua função requerida por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso.

A confiabilidade de um equipamento pode ser expressa por uma expressão com distribuição exponencial, com taxa de falhas constante:

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

Equação 5

Onde:

$R(t)$ = confiabilidade a qualquer tempo t .

e = base dos logaritmos neperianos ($e = 2,303$).

λ = taxa de falhas (número total de falhas por período de operação, definida como o número de falhas sobre o tempo total de operação).

t = tempo previsto de operação.

De acordo com Takahashi e Osada (2002), para que aconteça uma evolução nas atividades de manutenção preventiva, é preciso tratar os problemas de avaliação de sua eficácia. Esta questão é complicada pelo significado do termo “efeito”, que tem múltiplas conotações. Neste contexto, talvez seja de grande ajuda substituir a palavra efeito por avaliação ou realização.

Cabe ressaltar que, ainda de acordo com Takahashi e Osada (2002), o efeito das atividades de manutenção preventiva pode ser analisado quanti e qualitativamente.

2.6 MCC – 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).

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. A Tabela 3 apresenta as principais expectativas da manutenção na MCC e no modelo tradicional:

Tabela 3: Comparação da Manutenção Tradicional com a MCC

Características	Manutenção Tradicional	MCC
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

Fonte: Siqueira (2009)

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.

2.6.1 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 Moubrey (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.

2.6.2 Histórico da MCC

A indústria aeronáutica foi à precursora em pesquisas de confiabilidade e efeitos das falhas em manutenção com objetivo de atender às 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-

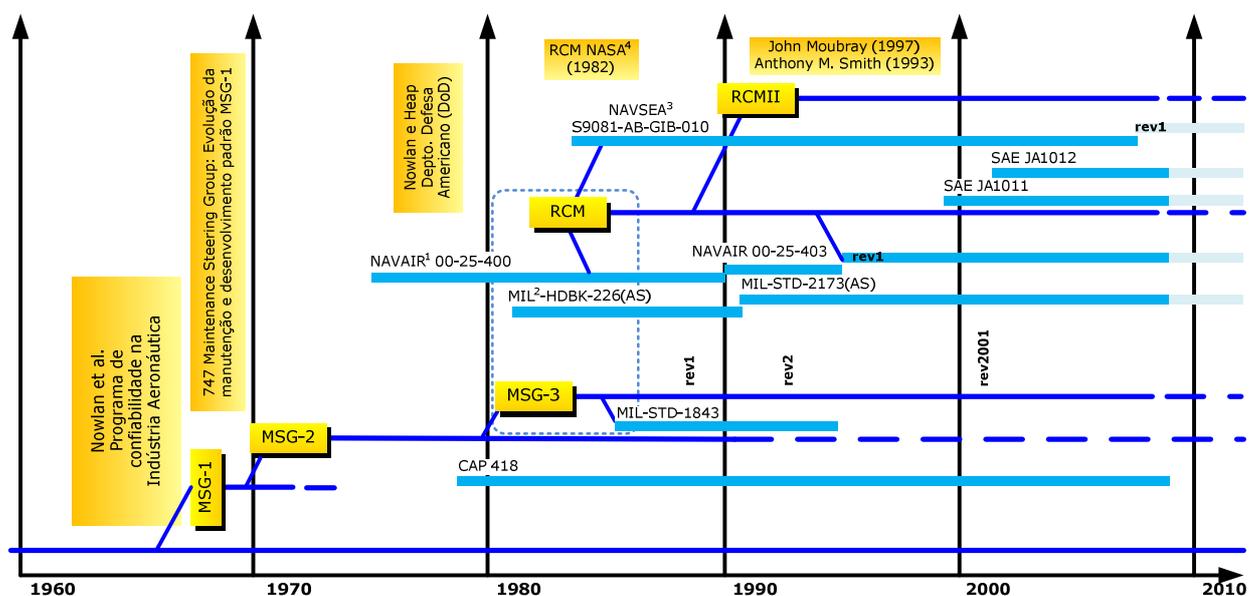
tarefa para revisão da aplicação dos métodos e técnicas de manutenção existentes para manutenção das aeronaves (BACKLUND, 2003; SIQUEIRA, 2009).

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 nos 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 7.



¹NAVAIR – Diretrizes do RCM para Aviação Naval (EUA)

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

³NAVSEA – Diretrizes do RCM para Comando Naval de Sistemas do Mar (EUA)

⁴NASA RCM – Diretrizes do RCM da NASA para aplicação em Instalações e Equipamentos Críticos

Figura 7: Evolução da MCC
Fonte: Adaptado de Peltokorpi (2009)

3 METODOLOGIA PARA A APLICAÇÃO DA MCC

A literatura 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, pela experiência do autor/analista ou pelo nível de maturidade da manutenção. Contudo, em sua essência, possuem uma abordagem e objetivos similares. Neste capítulo são levantados os principais autores/padrões para a MCC, com foco na implementação em sistemas industriais. As contribuições levantadas neste estudo serão utilizadas para a elaboração de uma proposta de implantação desta metodologia.

3.1 FUNDAMENTOS DA MCC

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

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 em 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 8 ilustra os processos de análise e possíveis relacionamentos que podem estar presentes em cada etapa da implantação.

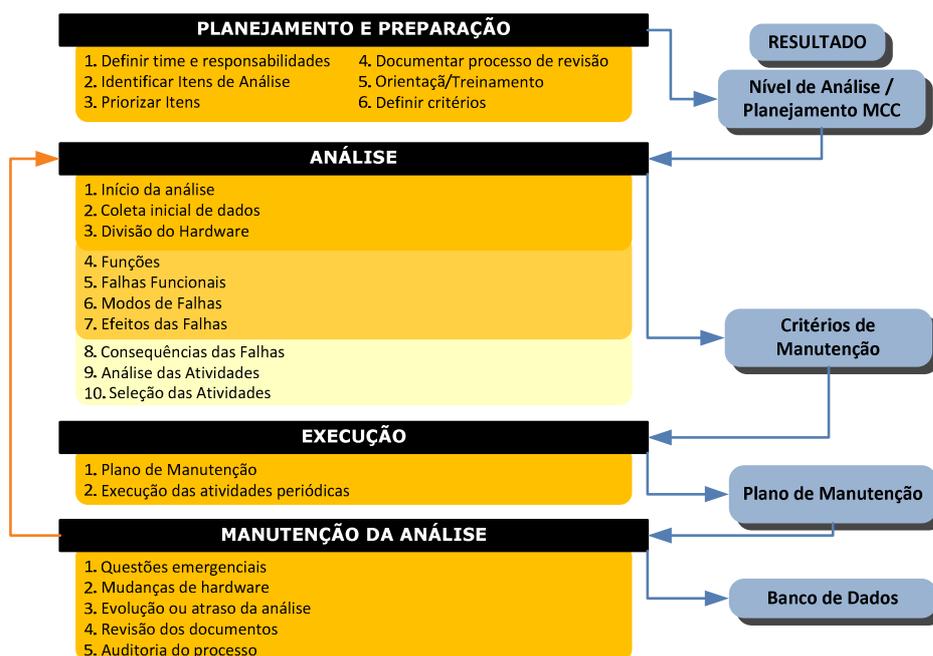


Figura 8: Diagrama de Implantação da MCC
Fonte: Leverette (2006)

3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS 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.

3.2.1 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.

3.2.2 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”, 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.

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

3.2.3 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.

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.

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

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.

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).

3.2.4 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 *et al.* (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 as funções do sistema e seus subsistemas, Moubrey (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.

3.3 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 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.

3.3.1 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 9 apresenta essa relação.

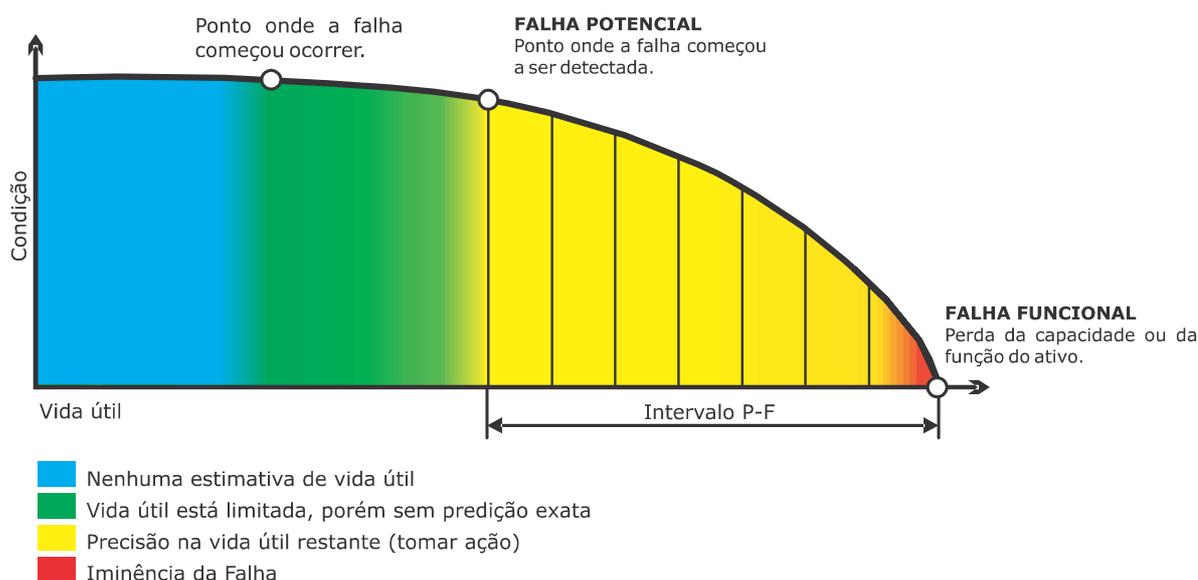


Figura 9: Intervalo P-F
Fonte: Adaptado de NASA (2008)

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).

3.3.2 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 10.

Assim, a taxa de falhas decresce, estabilizando-se à medida que passa o tempo, e aumentando aos poucos 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.

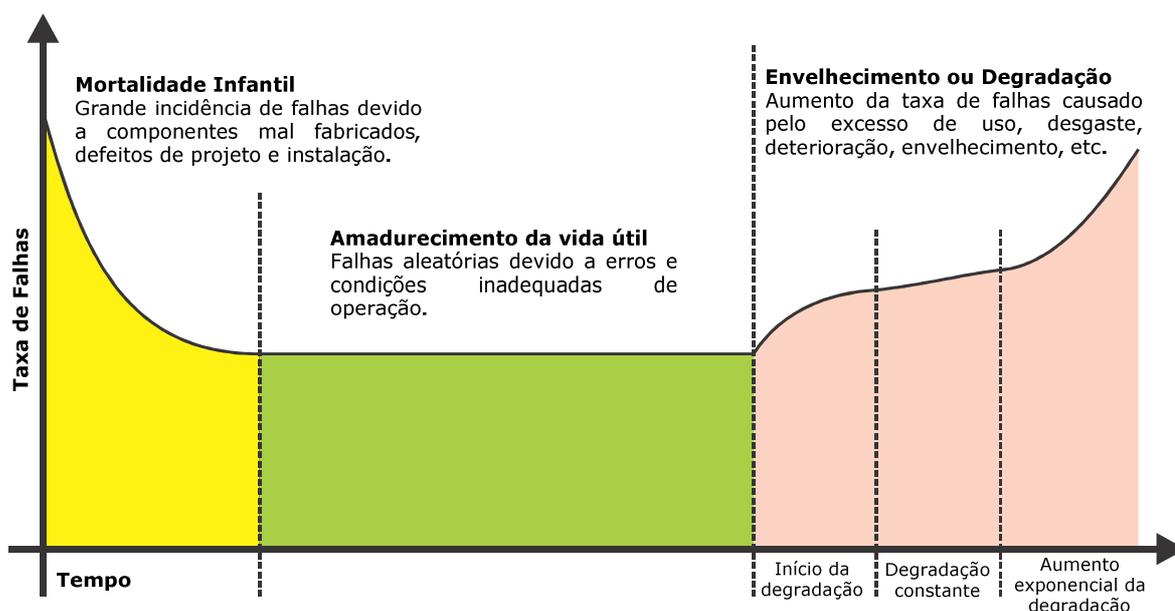


Figura 10: Curva da Banheira
Fonte: Gutiérrez (2005)

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 11 (NASA, 2008):

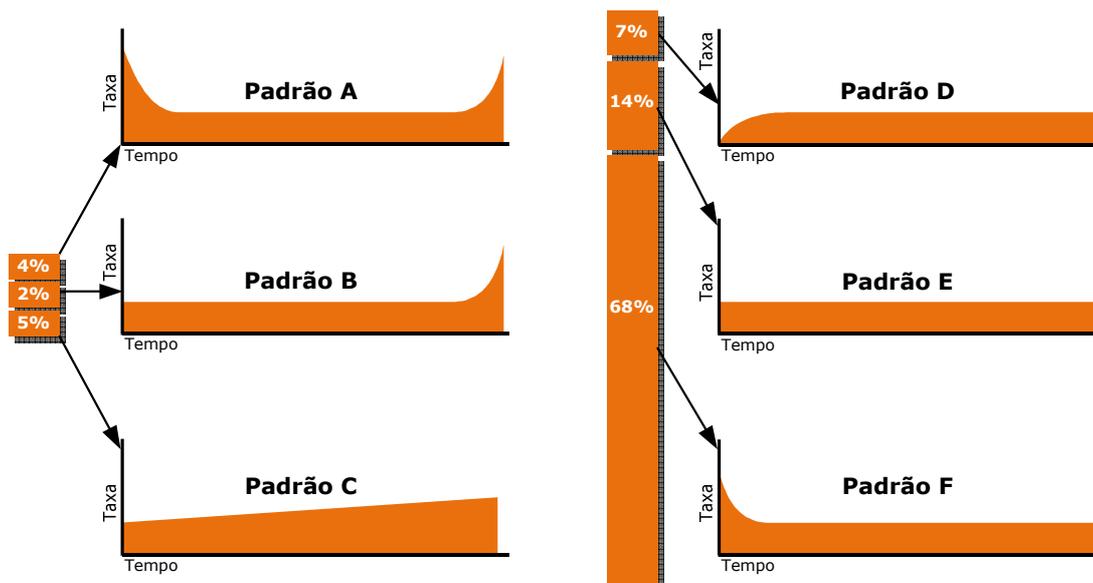


Figura 11: Padrões de Falha
Fonte: Adaptado de NASA (2008)

- **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.

3.3.3 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.

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.

3.4 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 e Criticality Analysis*).

3.4.1 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.

3.4.2 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).

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 12 apresenta o fluxo de aplicação para um FMECA segundo a norma IEC 60518.

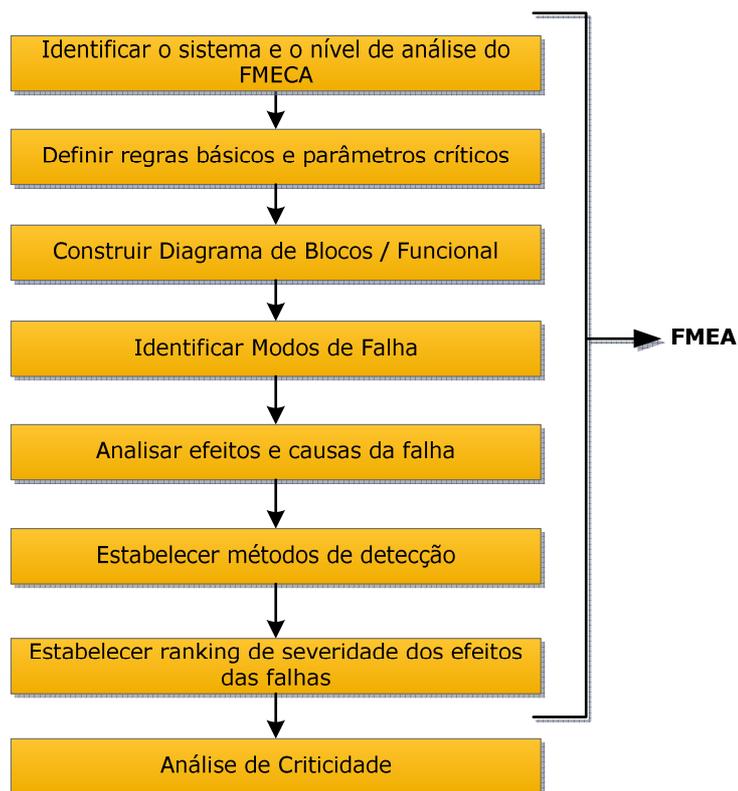


Figura 12: Fluxo de Aplicação do FMECA
Fonte: Headquarters (2006)

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).

3.5 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 que o efeito do modo de falha a nível componente pode impactar em uma função em nível de subsistema e, e que este pode impactar na função principal do sistema. Esta relação é ilustrada na Figura 13.

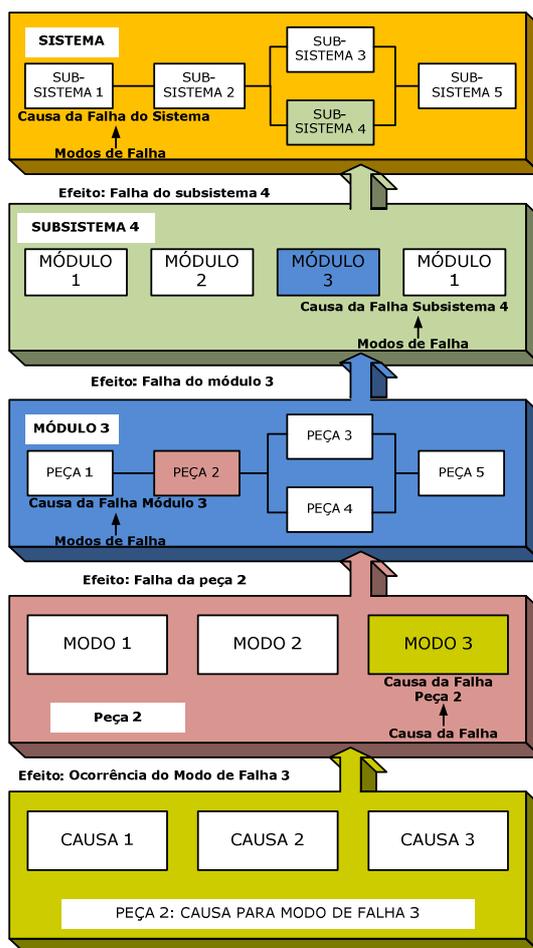


Figura 13: Consequências de um modo de falha em vários níveis
Fonte: IEC (2006)

Basseto *et al.* (2011) complementam 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 presentes somente no limite da análise;
- **Nível subsistema:** efeitos ultrapassam para um nível superior ao limite analisado;

- **Nível sistema:** efeitos ultrapassam os limites, interferindo na função principal do processo.

3.6 CLASSIFICAÇÃO DOS EFEITOS

Segundo Carazas (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.

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 FMEA 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 4.

Tabela 4: 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)

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.

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, 2008; HEADQUARTERS, 2006).

A Tabela 5 apresenta um exemplo do nível de frequência para um modo de falha.

Tabela 5: 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 de Headquarters (2006)

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).

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).

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 6, ou quando utilizado o nível de detecção pela equação 7 (IEC, 2006; HUADONG E ZHIGANG, 2009):

$$\text{RPN} = S \times F \quad \text{Equação 6}$$

$$\text{RPN} = S \times F \times D \quad \text{Equação 7}$$

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

O Nível de Detecção 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 e ZHIGANG, 2011; MCDERMOTT *et al.*, 2009).

Um exemplo de classificação de detecção é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: 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)

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.

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 14, 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).

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

Figura 14: 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 o 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 15.

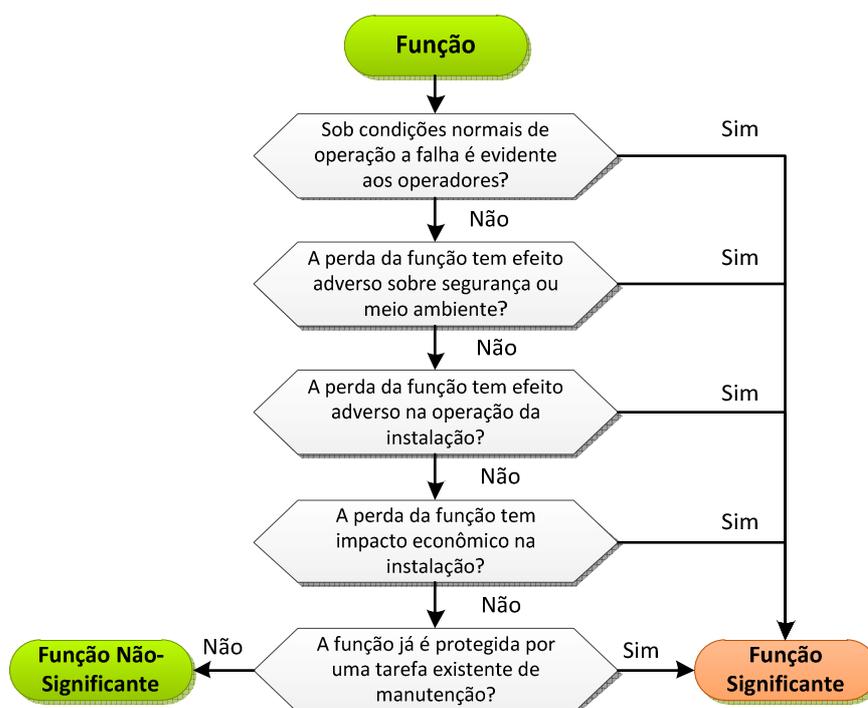


Figura 15: Fluxo de decisão das funções significativas
Fonte: Adaptado de Siqueira (2009)

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).

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.

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.

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, 2008).

Tradicionalmente o processo de decisão do MCC ocorre em três níveis, conforme ilustra Figura 16 (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;

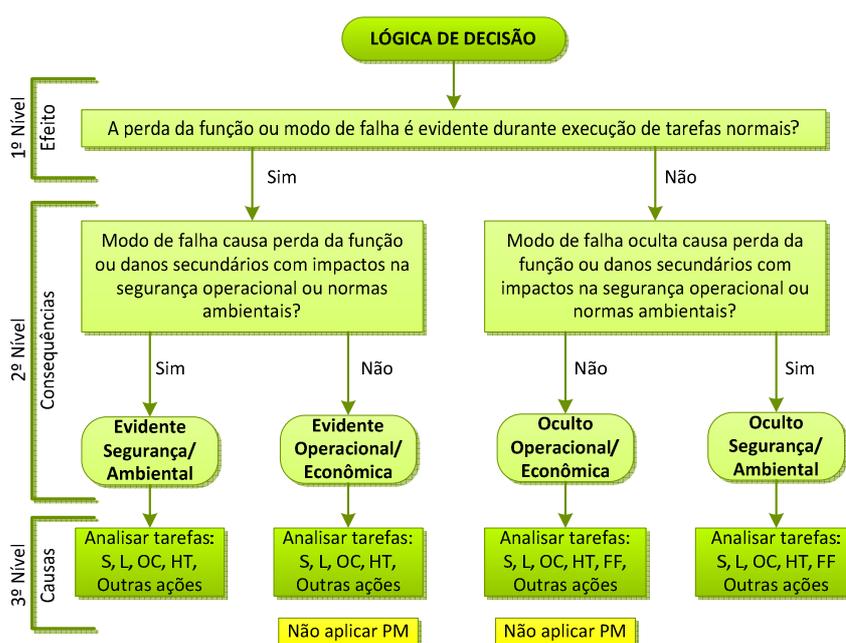


Figura 16: Níveis de avaliação das consequências
Fonte: Leverette (2006)

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 17, auxiliando na sequência de implementação, formando um histórico do sistema e para futuras auditorias (NAVAIR, 2005).

PLANILHA DECISÃO MCC	Processo:	N°:	Coord:	Data:		
	Linha:					
	Equipamento:	Rev.:	Equipe:	Folha:		
	Conjunto:					
Descrição do Item:						
FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CONSEQÜÊNCIAS DA FALHA			
			Descrição	S	MA	O

Figura 17: Formulário para registro das conseqüências das falhas
Fonte: Adaptado de Moubray (1997)

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 conseqüências, com os campos para:

- Referência da informação – contém a descrição das funções do sistema, falhas funcionais para cada função e os modos de falha de cada falha funcional;
- Descrição da conseqüência – descrição detalhada do efeito do modo da falha e sua conseqüência no sistema e processo;
- Avaliação da conseqüência – informa, através de SIM ou NÃO, se a conseqüência 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.

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.

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).

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.

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.

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 *et al.*, 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).

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 (KOBACCY e MURTHY, 2008).

Mobley *et al.* (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.

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) 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 18 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 18 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	Pode ser feita por
	F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4		

Figura 18: Formulário de Análise Decisional
Fonte: Adaptado de Moubray (1997)

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).

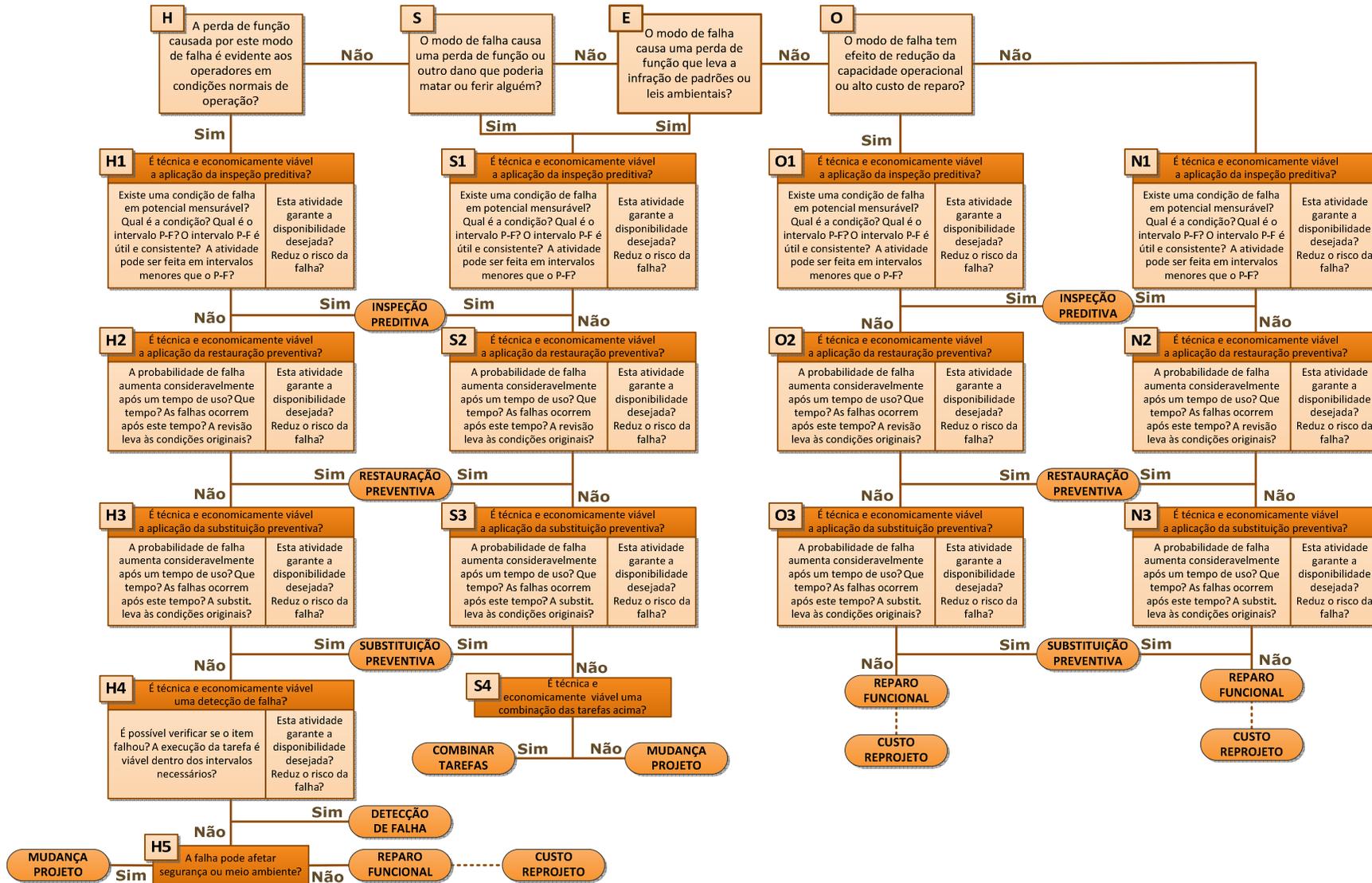


Figura 19: Diagrama Decisinal
 Fonte: Adaptado de Moubray (1997)

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 VISÃO GERAL DA PROPOSTA DO MODELO DE APLICAÇÃO MCC

Os objetivos de um programa MCC, conforme apresentados no item 2.5.1, 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.

Contudo, 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.

Siqueira (2009) propõe um modelo para a aplicação da MCC com uma sequência estruturada, composta por sete etapas:

- Seleção do sistema e coleta de informações;
- Análise dos modos de falha e efeitos;
- Seleção de funções significantes;
- Seleção de atividades aplicáveis;
- Avaliação da efetividade das atividades;
- Seleção das atividades aplicáveis e efetivas;
- Definição da periodicidade das atividades.

Para as respostas e para a documentação da MCC, o autor sugere o detalhamento do processo de implantação através do Diagrama de Processo mostrado na Figura 20, que mostra os produtos e relacionamentos entre as etapas da análise. O autor propõe o diagrama como um guia de implementação da MCC.

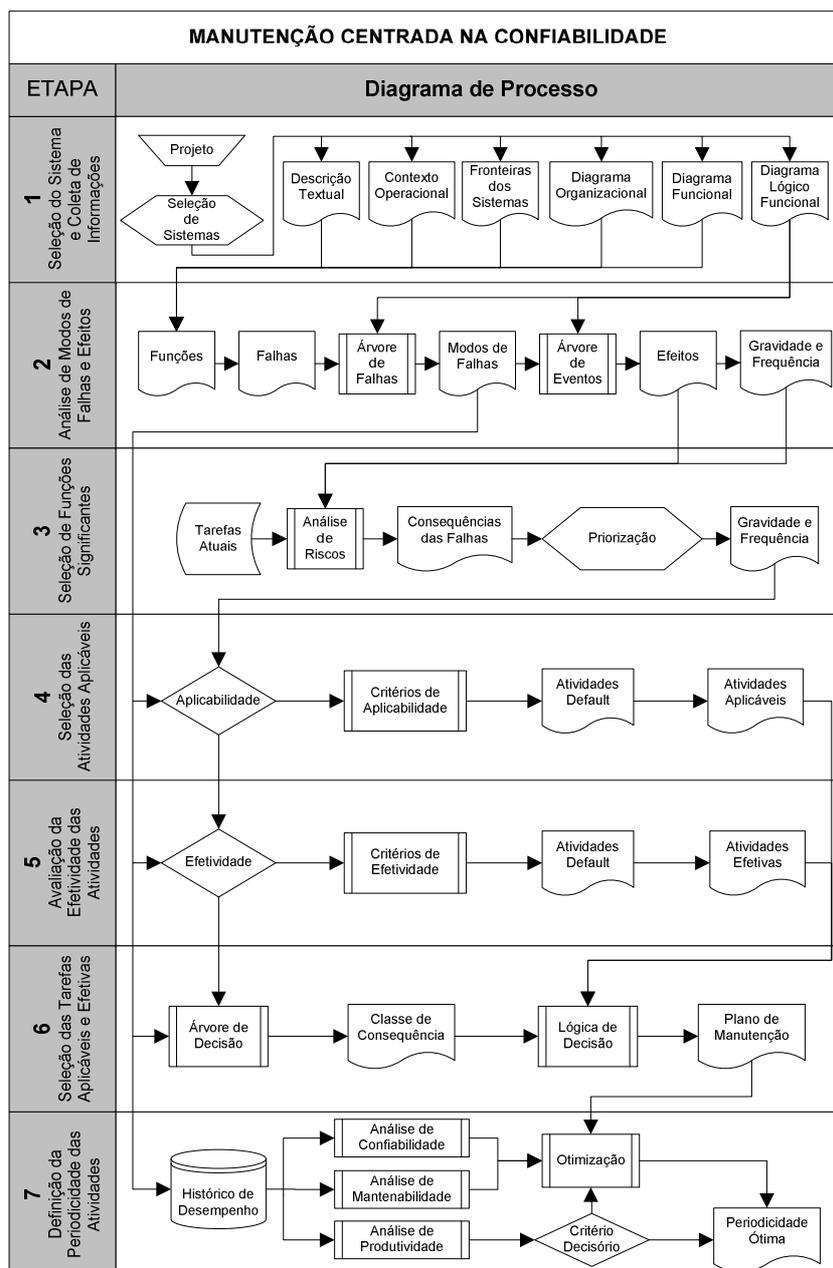


Figura 20: Diagrama de Processo MCC
Fonte: Siqueira (2009)

Considerando as questões acima, as etapas para implantação observadas no item 3.1 e os autores/padrões abordados neste trabalho, é proposto um programa de implantação do MCC com base no seguinte fluxo:

- Preparação do estudo;
- Seleção do sistema;
- Análise das funções e falhas;
- Seleção dos sistemas críticos;
- Análise crítica dos modos de falhas e efeitos;

- Seleção das atividades de manutenção;
- Melhoria contínua.

O diagrama do processo, com as etapas e ferramentas propostas para a aplicação da MCC, é apresentado na Figura 21.

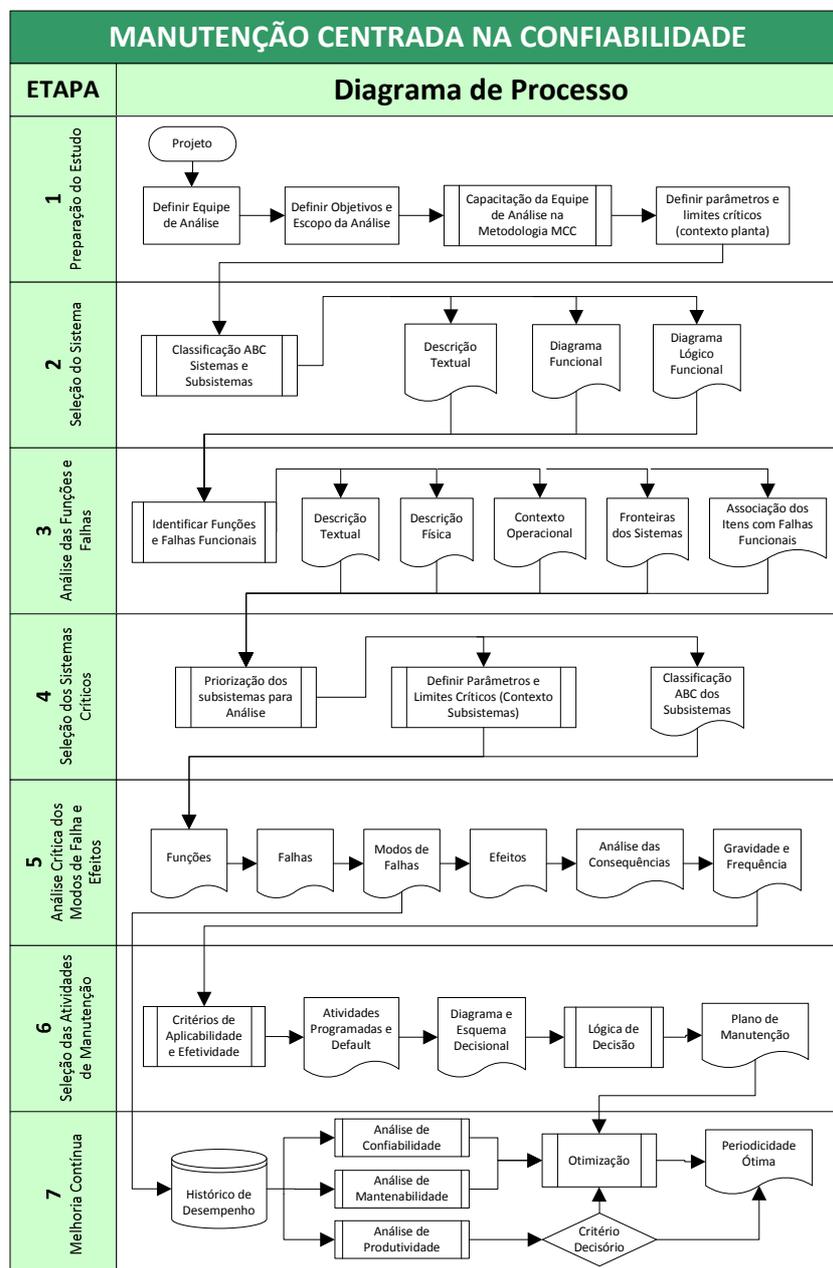


Figura 21: Fluxo das etapas de implantação da MCC
Fonte: Adaptado de Siqueira (2009)

A descrição do modelo será ilustrada através da sua aplicação em três estudos de caso, descritos no capítulo 5.

5 APLICAÇÃO DA MCC - ESTUDO DE CASO

A avaliação da aplicabilidade e eficácia da metodologia MCC proposta foi realizada através três estudos de casos em sistemas industriais, visando avaliar o modelo em diferentes ambientes e situações. Os sistemas de estudo possuem funções, tamanho, segmentos industriais e níveis de maturidade da função manutenção distintos.

Nos três estudos, a equipe responsável pela análise foi composta de membros da manutenção e operação em conjunto com profissionais da área de segurança. Após a definição da equipe e dos objetivos, foi levantado um estudo de funcionamento do sistema, com auxílio de toda a documentação técnica do mesmo.

O primeiro estudo apresenta a aplicação do modelo na redução de falhas em um sistema de geração de ozônio, subsistema de uma linha de laminação, em uma indústria de embalagens assépticas cartonadas. Este processo é caracterizado como de fabricação contínua, de médio porte.

O segundo estudo foi realizado no alimentador primário de um sistema de refinação de madeira, utilizado na fabricação de pasta termo mecânica de uma indústria de grande porte fabricante de papel e celulose. Este tipo de processo se caracteriza como de fabricação contínua, de grande porte.

No terceiro estudo, avaliou-se o modelo em um sistema de picagem de madeiras de uma Indústria de fabricação de molduras, sendo este, um sistema de pequeno porte e complexidade, com características de processo de manufatura.

As etapas da implantação da metodologia para os três estudos estão apresentadas na Figura 19.

5.1 ESTUDO DE CASO 1

O modelo proposto foi avaliado em um sistema de geração de ozônio (O_3) de uma indústria de embalagens cartonadas assépticas. Este sistema está inserido na linha de laminação da fábrica.

Um aspecto relevante no sistema é que, além de ser crítico para o processo, o mesmo já apresenta um plano de manutenção, com atividades e rotinas definidas. Contudo, em um período de 9 meses, de todas as falhas da linha de laminação, 5,18% eram oriundas ou decorrentes do Sistema de Geração de Ozônio.

5.1.1 Preparação do Estudo

O objetivo da aplicação da MCC foi a redução no número de incidências e falhas funcionais relacionadas à geração de ozônio. Outro objetivo consiste na revisão do plano de manutenção do sistema, avaliando-o de forma geral, reduzindo ou eliminando as atividades desnecessárias com auxílio da MCC. Para isso foi formada uma equipe responsável pela análise, formada por membros da manutenção e operação em conjunto com profissionais da área de segurança. Os integrantes da equipe participaram de um breve treinamento sobre a metodologia MCC proposta. Após a definição da equipe, dos objetivos e da capacitação foi realizado um estudo do funcionamento do sistema, com auxílio de toda a documentação técnica do mesmo. Com isso foram identificadas informações sobre os parâmetros e os limites (interfaces) do sistema.

5.1.2 Seleção do sistema

O sistema selecionado para a análise foi o de geração de ozônio, que está inserido no processo de laminação. Para isso foi analisado o processo e verificado que a formação da embalagem é a linha mais crítica da indústria.

Dentre os diferentes processos utilizados para a geração de ozônio, o mais difundido é o método de descarga por efeito corona, realizado através de descargas elétricas de alta tensão entre dois eletrodos, quebrando a molécula de oxigênio, O_2 , que se recombina em ozônio O_3 .

A topologia mais utilizada para geração de ozônio consiste em um inversor em ponte completa, ligado ao primário do transformador que tem o

secundário conectado à câmara geradora. O diagrama de geração de ozônio do processo em análise é apresentado na Figura 22.

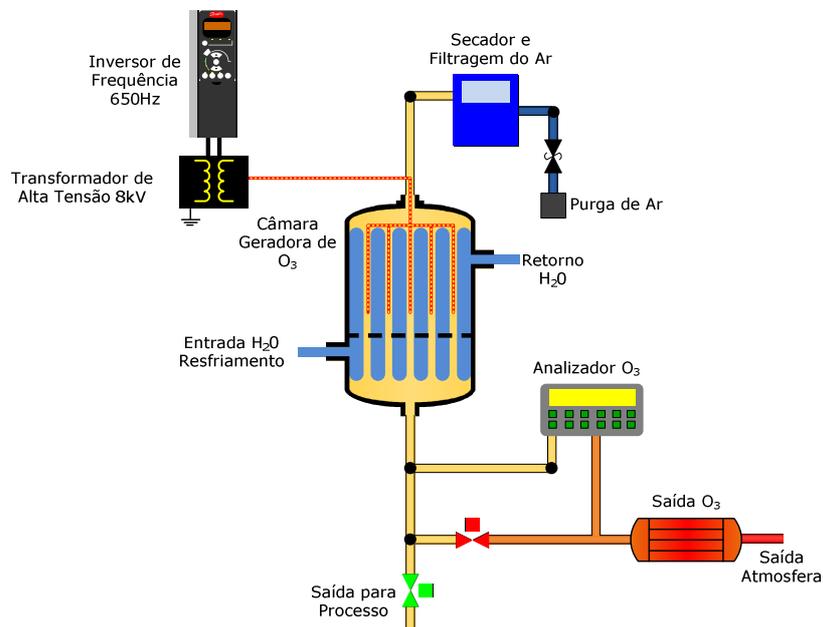


Figura 22: Diagrama do sistema de geração de ozônio
Fonte: Autoria própria (2011)

5.1.3 Análise das funções e falhas

Nesta etapa foram elaborados os diagramas funcionais do Gerador de Ozônio, definidas suas entradas, saídas e fronteiras. Os diagramas foram baseados no fluxo de operação do subsistema, análise dos diagramas técnicos de manutenção e documentação de projeto.

As funções e falhas funcionais foram identificadas em um contexto operacional do sistema, com base na sua função principal: gerar ozônio em uma concentração mínima de 25g/m^3 de O_3 , através do efeito corona, que consiste em aplicar uma descarga elétrica sobre um fluxo de ar isento de impurezas, transformando o O_2 em O_3 . Assim foram identificados três falhas funcionais: (i) não gerar ozônio; (ii) geração de ozônio em concentração insuficiente e (iii) falha na distribuição de ozônio.

5.1.4 Seleção dos sistemas críticos

O Sistema de Geração de Ozônio é composto por 8 subsistemas, com um grande número de componentes. Assim, uma análise completa do sistema demandaria mais tempo para a aplicação e necessitaria de mais técnicos para a execução. Além disso, o objetivo na redução das incidências relacionadas ao sistema era de curto para médio prazo. Sendo assim optou-se pela análise dos subsistemas mais críticos do Gerador de Ozônio.

Na seleção dos subsistemas críticos foram utilizados a “regra 80/20” e o Diagrama de Pareto, através de uma análise de cada subsistema em razão dos parâmetros críticos apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Seleção dos parâmetros críticos

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

Fonte: Autoria própria (2011)

Esta etapa de seleção resultou em 5 subsistemas: sistema de geração, sistema pneumático e sistema de distribuição de ozônio (analisados em função de sua alta criticidade) e os sistemas de tratamento de ozônio e de refrigeração (analisados em função de possuir uma interação direta com os sistemas considerados críticos).

A decomposição dos subsistemas resultou em 22 componentes. Destes, apenas 7 foram escolhidos, através de uma nova análise de criticidade (desta vez à nível de componente). Os componentes escolhidos e a análise de criticidade são apresentados na Figura 23.

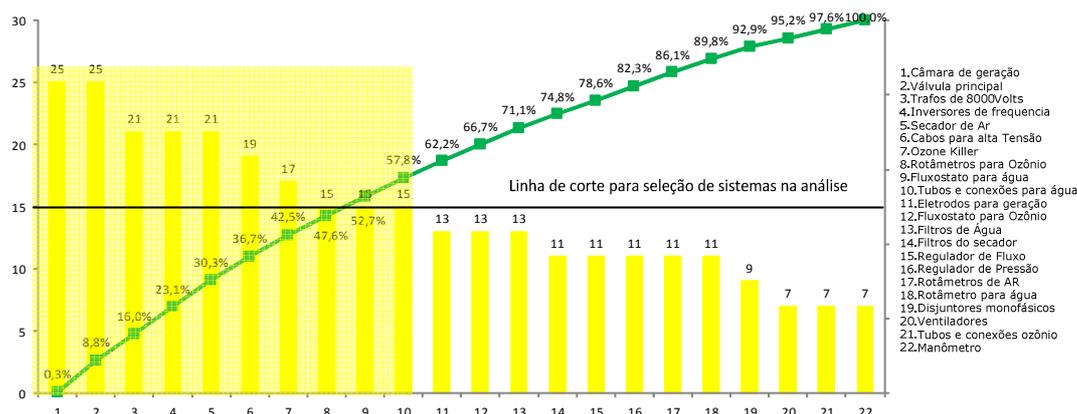


Figura 23: Componentes escolhidos e a análise de criticidade.
Fonte: Autoria própria (2011)

5.1.5 Análise crítica dos modos de falha e efeitos

Identificada a função principal e as falhas funcionais (item 4.1.3), foi realizada a análise FMEA, onde associou-se os efeitos/consequências dos modos de falha às suas causas através de uma identificação sequencial, em função de como esse modo de falha apresentava-se em cada componente.

Assim, foram identificados 9 modos de falhas funcionais, que resultaram em 98 modos de falhas (quando associados aos componentes do sistema). Observou-se que alguns modos de falhas estavam presentes nas três falhas principais. Por exemplo: o erro de parametrização do inversor pode resultar na falha de não geração de ozônio (modo de falha 1C8) ou na concentração de ozônio insuficiente (modo de falha 2C3).

O formulário da análise FMEA é apresentado na Figura 24.

PLANILHA ANÁLISE DE FALHAS - FMEA		Processo: Embalagem Cartonada	Nº.: 1	Coordenador:	Data: 01/11/2011
		Linha: Laminação Embalagem Cartonada	Rev: 0	Equipe: RCM Gerador O3	Folha: 1/1
		Equipamento: Gerador de Ozônio			
		Conjunto: Sistema de Geração			
Descrição do item: O Gerador de Ozônio é composto por oito câmaras que geram efeito corona necessário para a transformação de O2 para O3, com uma concentração mínima de 25g/m3 de O3, garantindo uma oxidação necessária para que haja uma boa adesão entre o papel/poliétileno e poliétileno/alumínio.					
ÍTEM	FUNÇÃO	FALHA	EFEITO/CONSEQUÊNCIA DA FALHA	MODO DE FALHA	CAUSA
GERADOR DE OZÔNIO	gerar ozônio em uma concentração mínima de 25g/m3 de O3, através do efeito corona, que consiste em aplicar uma descarga elétrica sobre um fluxo ar isento de impurezas, transformando o O2 em O3.	Não gerar Ozônio	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 na câmara de ozônio
				A	Falha de ar comprimido
				1	Falha na Reguladora de Pressão (saída do gerador)
				1	Travamento mecânico na mola da válvula
				2	Diafragma furado da válvula
				2	Falha na Reguladora de Pressão (entrada do gerador)
				1	Travamento mecânico na mola da válvula
				2	Diafragma furado da válvula
				B	Falha no sistema de refrigeração
				1	Filtro de água obstruído
				2	válvula manual de esfera fechada acidentalmente
				3	Tubulação de água obstruída.
				4	Mangueiras de água rompidas.
				C	Falha no sistema elétrico
				1	Drive danificado.
				2	Falha no transformador.
				1	Fuga de corrente elétrica.
				2	Baixa isolamento.
				3	Mau contato.
				3	Falha no controlador Yokogawa
				1	Controlador em manual.
				2	Perda de sinal nos drives.
				3	Perda de calibração.
				4	Analizador em Falha
				1	Parametrização errada.
				2	Lâmpada UV danificada.
				3	Circuito eletrônico corruído.
				4	Perda de sinal elétrico para lami-
	Perda de material por falta de adesão	4			
	Gerar uma concentração de Ozônio menor que 25 g/m3	2			Baixa concentração de ozônio
		A			Falha de ar comprimido
		1			Filtro coalescente (entrada do secador) saturado
		2			Filtro coalescente (saída do secador) saturado
		3			Elemento filtrante da coluna de ar saturado
		4			Obstrução do purgador do secador de ar

Figura 24: Formulário da análise FMEA.
Fonte: Autoria própria (2011)

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

5.1.6 Seleção das Atividades de Manutenção

Para seleção das atividades de manutenção foram utilizadas as planilhas de esquema decisional e diagrama decisional (Figura 19). Na primeira, os modos de falhas foram classificados em razão da sua visibilidade durante a operação e natureza do seu impacto no sistema.

Na planilha do diagrama decisional, através do RPN, dos critérios de aplicabilidade e efetividade das tarefas e do diagrama de decisional da Figura

19, foram selecionadas as atividades de manutenção para cada modo de falha. Os modos de falha com um risco insignificante (RPN baixo) foram avaliados através do diagrama decisional em função do RPN, apresentado na Figura 25.

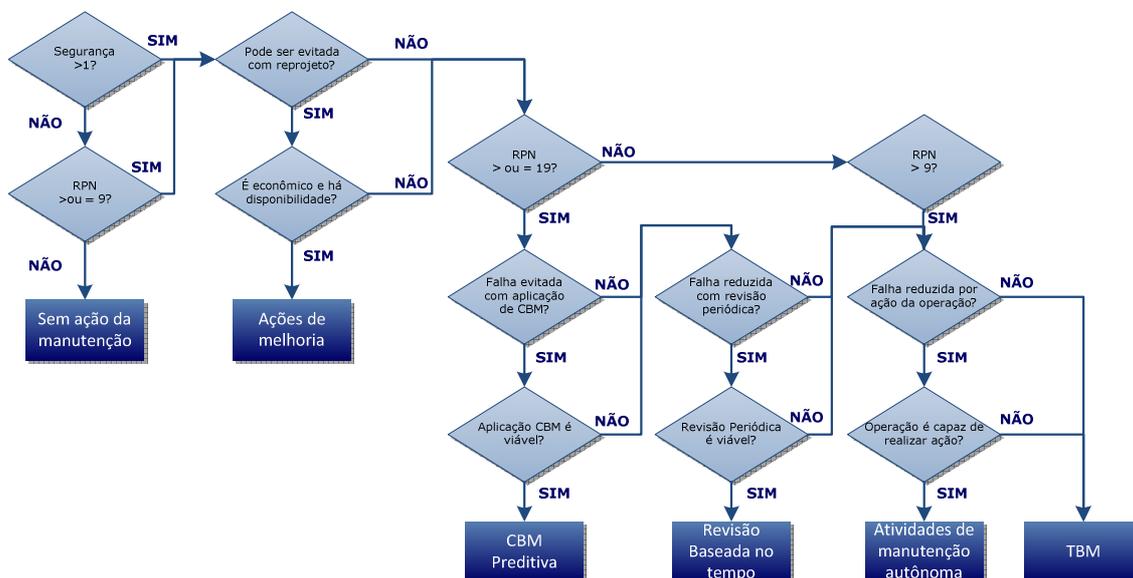


Figura 25: Diagrama decisional em função do RPN
Fonte: Autoria própria (2011)

A etapa de seleção resultou em: 14 atividades de inspeção, 3 atividades de CBM, 43 atividades de preventiva e 14 atividades de melhoria. Ao fim do processo, as atividades de manutenção foram documentadas no diagrama decisional, sendo complementadas com as demais informações do modo de falha. Outra ação foi a adição das atividades selecionadas ao planejamento da manutenção para controle e acompanhamento de sua execução.

A periodicidade das tarefas foi determinada através da experiência dos analistas e técnicos de manutenção, histórico do sistema, documentação técnica e informações dos fabricantes. As planilhas de esquema decisional e diagrama de seleção são apresentadas nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

FUNÇÃO		FALHA FUNCIONAL		MODO DE FALHA		CONSEQUÊNCIA DA FALHA				
						Descrição	H	S	MA	O
1 Gerar ozônio em uma concentração mínima de 25g/m ³ de O ₃ , através do efeito corona, que consiste em aplicar uma descarga elétrica sobre um fluxo ar isento de impurezas, transformando o O ₂ em O ₃ .		A	Não gerar Ozônio	1	Falha na câmara de ozônio	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	N	N	S
					A. Falha de ar comprimido					
					A.1. Falha na Reguladora de Pressão (saída do gerador)	Perda de material por falta de adesão	N	N	N	S
					A1.1. Travamento mecânico na mola da válvula					
					A1.2. Diafragma furado da válvula					
					A.2. Falha na Reguladora de Pressão (saída do gerador)					
					A2.1. Travamento mecânico na mola da válvula					
					A.2.2. Diafragma furado da válvula					
					C. Falha no sistema elétrico					
					C.4. Analisador em Falha					
					C4.1. Parametrização errada.					
					C.4.2. Lâmpada UV danificada.					
					C4.3. Circuito eletrônico corruído.					
					C.4.4. Perda de sinal elétrico para lami-					
		B	Gerar uma concentração de Ozônio menor que 25 g/m ³	2	Baixa concentração de ozônio	Perda da concentração de ozônio no sistema, gerando uma falha com parada de produção de 10 min., com perdas de material por falta de adesão e perda de aproximadamente 150 metros de material devido a desaceleração da máquina	N	N	N	S
					A. Falha de ar comprimido					
					A.1. Filtro coalescente (entrada do secador) saturado					
					A.2. Filtro coalescente (saída do secador) saturado					
					A.3. Elemento filtrante da coluna de ar saturado					
					A.4. Obstrução do purgador do secador de ar					

Figura 26: Planilha do esquema decisional
Fonte: Autoria própria (2011)

DIAGRAMA DECISIONAL MCC				Processo: Embalagem Cartonada					Nº.: 1		Coordenador:		Data: 01/11/2011	
				Linha: Laminação Embalagem Cartonada					Rev: 0		Equipe: RCM Gerador O3		Folha: 1/1	
				Equipamento: Gerador de Ozônio										
				Conjunto: Sistema de Geração										
REFERÊNCIA DA INFORMAÇÃO			FILTRO/TAREFA				FREQÜÊNCIA = F	CONSEQUÊNCIA = C	RISCO = F x C	TAREFA PROPOSTA	FREQUÊNCIA DA TAREFA	RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO		
			DETECTIVA	PREDITIVA	PREVENTIVA	REPROJEETO								
F	FF	MF												
1	A	1A1	N	N	S	N	2	2	4	Reposicionar a reguladora de pressão da saída do secador	Única	Manutenção Mecânica		
		1A1.1	N	N	S	N	1	2	2	Inserir no plano de preventiva a troca da reguladora de pressão da saída do secador	Bienal	Manutenção Mecânica		
		1A1.2	N	N	S	S	2	2	4					
		1A2	N	N	N	S	2	2	4	Eliminar do sistema pneumático a reguladora de pressão de entrada do gerador, devido a redundância com a saída do secador.	Única	Manutenção Mecânica		
		1A2.1	N	N	N	S	2	2	4					
		1A2.2	N	N	N	S	2	2	4					
		1A3	N	N	S	N	2	2	4	Inserir no plano de preventiva a troca da reguladora de pressão da entrada das câmaras de ozônio.	Bienal	Manutenção Mecânica		
		1A3.1	N	N	S	N	1	2	2					
		1A3.2	N	N	S	N	2	2	4					
		1A4	N	N	N	S	2	2	4	Instalar um indicador visual de condição de válvula (aberta/fechada).	Única	Manutenção Mecânica		
		1A5	N	N	N	N	5	2	10	Criar OPL e repassar atividade de inspeção dos rotâmetros de ar	Única	Manutenção		
		1A6	N	N	S	N	2	2	4	Inserir no plano de preventiva a troca da válvula direcional do secador.	Bienal	Manutenção Mecânica		
		1A6.1	N	N	S	N	2	2	4					
		1A6.2	N	N	S	N	2	2	4					
		1A6.3	N	N	S	N	2	2	4	Inserir no plano de preventiva o reaperto elétrico e da trava da válvula direcional do secador.	Trimestral	Manutenção Eletroeletrônica		
		1A6.4	N	N	S	N	2	2	4					
		1A7	N	N	S	N	2	2	4	Inserir no plano de preventiva a troca da solenóide de escape do secador.	Bienal	Manutenção Mecânica		
		1A7.1	N	N	S	N	2	2	4					
		1A7.2	N	N	S	N	2	2	4	Inserir no plano de preventiva o reaperto elétrico e da trava da solenóide de escape do secador.	Trimestral	Manutenção Eletroeletrônica		
		1A7.3	N	N	S	N	2	2	4					
2	A	2A1	S	S	N	N	2	3	6	Criar OPL e repassar atividade de inspeção e troca por condição do	Única	Manutenção Mecânica		
		2A2	S	S	N	N	2	3	6	Criar OPL e repassar atividade de inspeção e troca por condição do	Única	Manutenção Mecânica		
		2A3	N	N	S	N	2	3	6	Inserir no plano de preventiva a troca (sugerida pelo fabricante a	3 em 3 anos	Manutenção Mecânica		
		2A4	N	N	S	N	3	3	9	Inserir no plano de preventiva a troca do purgador do secador de ar	Anual	Manutenção Mecânica		
		2A5	S	N	N	N	5	2	10	Criar OPL e repassar atividade de inspeção dos rotâmetros de ar	Semestral	Manutenção Mecânica		
		2A6	S	N	N	N	3	2	6	Criar OPL e repassar atividade de inspeção da válvula reguladora	Semestral	Manutenção Mecânica		
		2A7	N	N	N	S	2	3	6	Eliminar do sistema pneumático a reguladora de pressão de entrada	Única	Manutenção Mecânica		
		2A8	S	N	N	N	3	2	6	Criar OPL e repassar atividade de inspeção da válvula reguladora	Semestral	Manutenção Mecânica		
	B	2B1	S	N	N	N	3	2	6	Criar OPL e repassar atividade de inspeção do rotâmetro de água	Semanal	Manutenção Mecânica		
		2B2	N	N	S	N	4	3	12	Inserir no plano de preventiva a limpeza das câmaras do gerador.	Semestral	Manutenção		
		2B3	S	N	N	N	3	2	6	Criar OPL e repassar atividade de inspeção da válvula reguladora	Semanal	Manutenção Mecânica		
		2B4	N	N	N	N	2	2	4	Restabelecer as condições básicas do revestimento térmico das	Única	Manutenção Mecânica		

Figura 27: Planilha do Diagrama Decisional
Fonte: Autoria própria (2011)

5.1.7 Melhoria contínua

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 geração de ozônio foi monitorado para comprovar o resultado da análise e monitorar se o número de ocorrências de falhas 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.

5.1.8 Conclusão

Concluída a seleção das tarefas descritas na Figura 27, foram atualizados os planos de manutenção programada, (plano preventivo, plano de inspeção preditiva, plano de manutenção autônoma), com as tarefas e frequências estabelecidas.

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

Concluída a análise do sistema e suas ações, em três meses o sistema de geração de ozônio apresentou somente cinco incidências, das quais apenas 3 resultaram em falhas, o que contribuiu para reduzir o impacto do sistema na linha principal de 5,18% para 1,036%, representando uma redução de 80%. Portanto confirmou-se através deste estudo de caso, que o modelo MCC

proposto é eficaz quando utilizado como ferramenta de confiabilidade na manutenção e atualização da política de manutenção de sistemas industriais.

5.2 ESTUDO DE CASO 2

A metodologia proposta também foi aplicada no subsistema do ciclone primário e no alimentador secundário de uma indústria de papel e celulose. Esse subsistema faz parte do processo de refinação na fabricação de CTMP (*Chemical Thermo Mechanical Pulping*) ou Pasta Químico Termo Mecânica, a qual é utilizada como matéria-prima para a produção de papéis, sendo considerada uma das linhas mais críticas da fábrica.

5.2.1 Preparação do Estudo

O objetivo da aplicação da MCC foi a seleção e redução no número de incidências e falhas funcionais relacionadas ao subsistema do ciclone primário e no alimentador secundário. Outro objetivo consiste na atualização do plano de manutenção do sistema, avaliando-o de forma geral, realizando um levantamento das atividades necessárias através da MCC. Para esse estudo foi formada uma equipe para análise, formada por operadores e manutentores, além de profissionais da área de saúde e segurança no trabalho. A metodologia MCC proposta foi explanada através de um treinamento. Após a formação da equipe e a capacitação, foi realizado um estudo de funcionamento do sistema, com auxílio de manuais, fluxogramas, documentos técnicos em geral, para o levantamento dos limites críticos com relação a planta como um todo.

5.2.2 Seleção do sistema

O processo selecionado trata-se de um subsistema do processo de fabricação de CTMP (*Chemical Thermo Mechanical Pulping*) ou Pasta Químico Termo Mecânica, a qual é utilizada como matéria-prima para a produção de

papéis toalhas, *tissue* higiênicos, guardanapos e cartões para os mais diversos tipos de embalagens. A pasta é enviada para as máquinas de papel, que estão inseridas na mesma planta. Em função disso, é considerada uma das partes mais críticas, pois o subsistema selecionado impacta na fabricação da pasta, que impacta diretamente na fabricação de papéis.

O processo de fabricação de massas de papel químico termo mecânicas (CTMP) consiste, basicamente, em imergir lascas de madeira em reagentes químicos; na sequência, desfibrá-las mecanicamente (refinação primária) sob atmosfera de vapor d'água e sob pressão para a obtenção de uma massa bruta. Em seguida é realizado o refinamento da referida massa (refinação secundária).

A Figura 28 mostra o leiaute da linha de refinação, parte do processo de fabricação de CTMP.

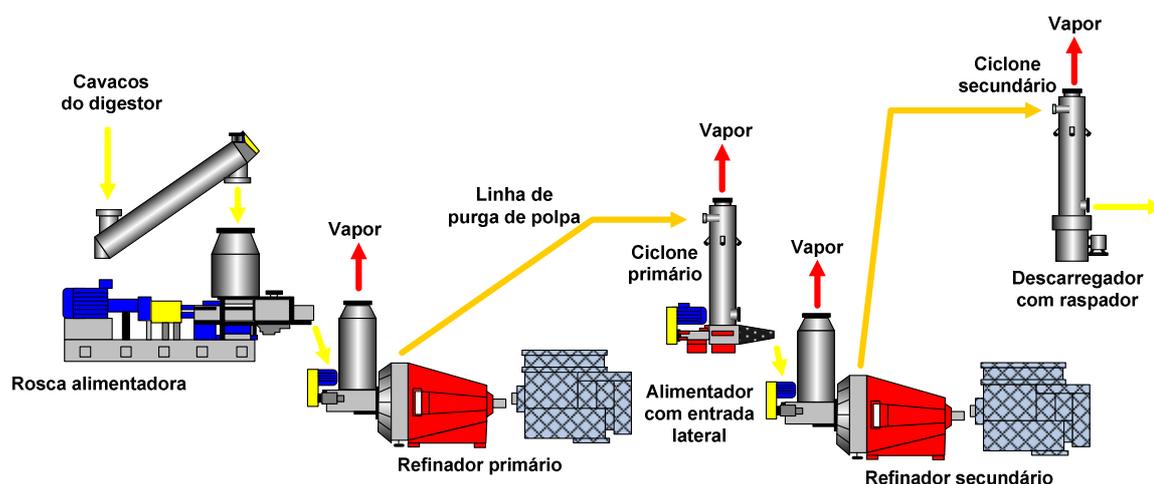


Figura 28: Linha de refinação de alta consistência
Fonte: Autoria própria (2012)

A função primária do ciclone primário e do alimentador secundário é separar a pasta do vapor (o que pode ser verificado através da medição da consistência da pasta) e alimentar a rosca transportadora (rosca fita) do refinador secundário.

A mistura contendo pasta e vapor entra no ciclone tangencialmente, perto do topo. Devido às forças centrífugas, as fibras se acumulam ao longo da parede do ciclone e afundam por gravidade. Logo abaixo do ciclone está o alimentador secundário, que leva a pasta para a rosca transportadora (rosca

cônica) que é um dispositivo de compressão que, por fim, vai direcionar a pasta para o refinador secundário, conforme a Figura 29.

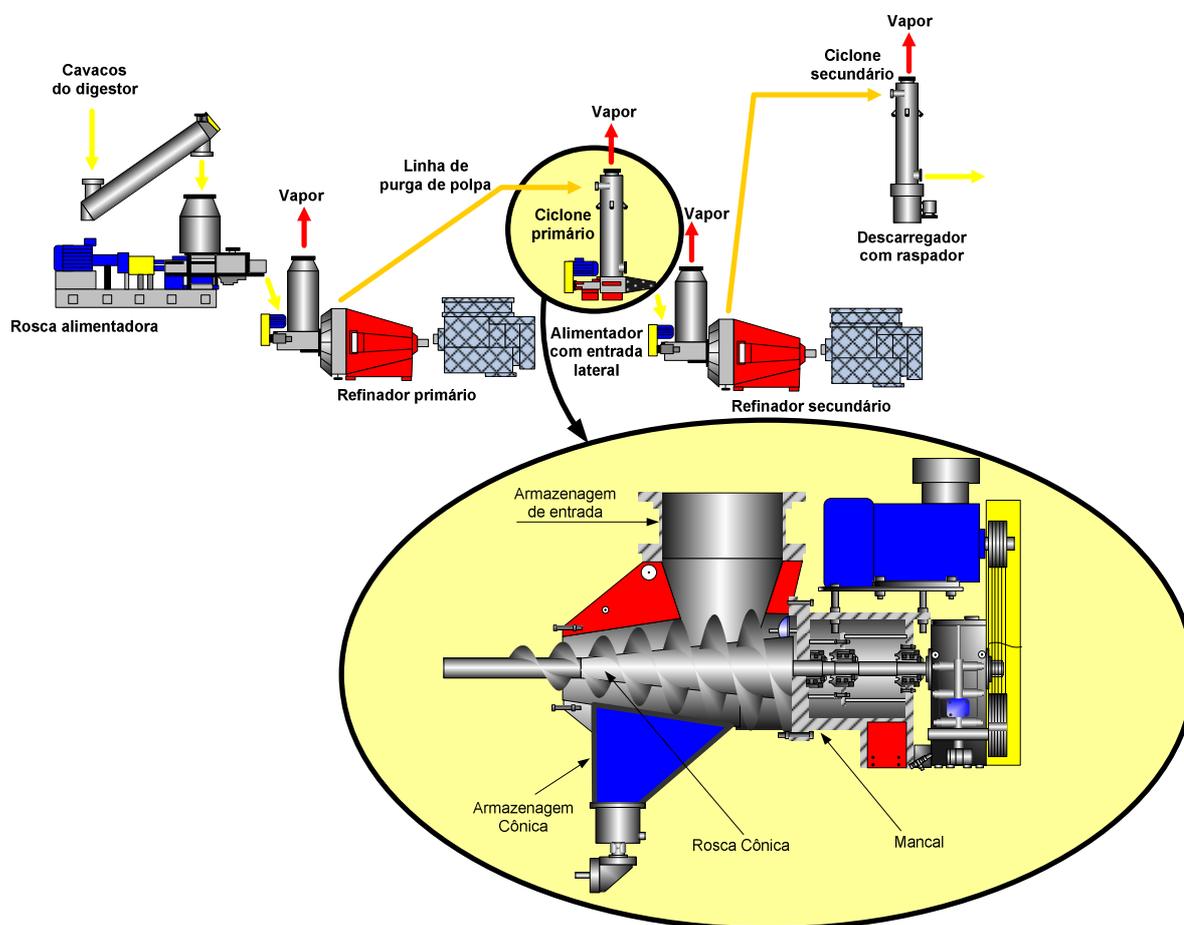


Figura 29: Subsistema do ciclone primário e do alimentador secundário
Fonte: Autoria própria (2012)

Este alimentador secundário possui um comando de velocidade variável para ajustar a velocidade da rosca sem fim, segundo uma taxa de produção, a fim de permitir uma alimentação homogênea para o refinador, quesito muito importante neste processo.

O compartimento da rosca é cônico, com a extremidade maior do lado de entrada e a extremidade menor, restritiva, do lado de descarga. À medida que a pasta seja transportada através do alimentador secundário, ela é comprimida e limitada na seção cônica. A pasta comprimida forma um tampão que evita que o vapor d'água escape do refinador.

5.2.3 Análise das funções e falhas

O primeiro passo realizado na identificação das funções foi à elaboração de uma planilha de descrição do sistema (Figura 30), que contém informações das funções e parâmetros dos componentes do subsistema, redundâncias, dispositivos de proteção e detalhes de instrumentação.

Planilha de Descrição do Sistema	Processo: Fabricação de Papel e Celulose	Nº.:	Coordenador:	Data:
	Linha: CTMP	1		09/01/2012
	Equipamento: Refinação de alta consistência	Rev.:	Equipe:	Folha:
	Conjunto: Ciclone primário e alimentador	0	RCM CTMP	1/1
Função: Separar a pasta do vapor, o que pode ser verificado através da medição da consistência da pasta, e alimentar a rosca transportadora (rosca fita) do refinador secundário.				
Redundâncias: Não há.				
Dispositivos de Proteção: Sobrecarga do motor, sobrecorrente, parâmetros de proteção do acionamento e proteção dos dispositivos eletrônicos.				
Instrumentação e Controle: Bloqueio no dreno alimentador do ciclone pressurizado / Parâmetros do acionamento / Interface de rede / Malha de controle de pressão / Malha de controle de velocidade do alimentador do ciclone.				

Figura 30: Planilha de Descrição do Sistema
Fonte: Autoria própria (2012)

A partir do diagrama funcional e do fluxograma de operação, foram definidos os limites e fronteiras dos sistemas em análise dentro da linha de refinação, pois uma falha no ciclone ou no alimentador tem impacto direto na função principal do sistema. Também foram identificadas as entradas e saídas de outros sistemas do processo da CTMP, como a referência de velocidade da planta (entrada), e sinais de alarme e *set-point* de velocidade (saídas). O fluxograma operacional é mostrado na Figura 31.

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

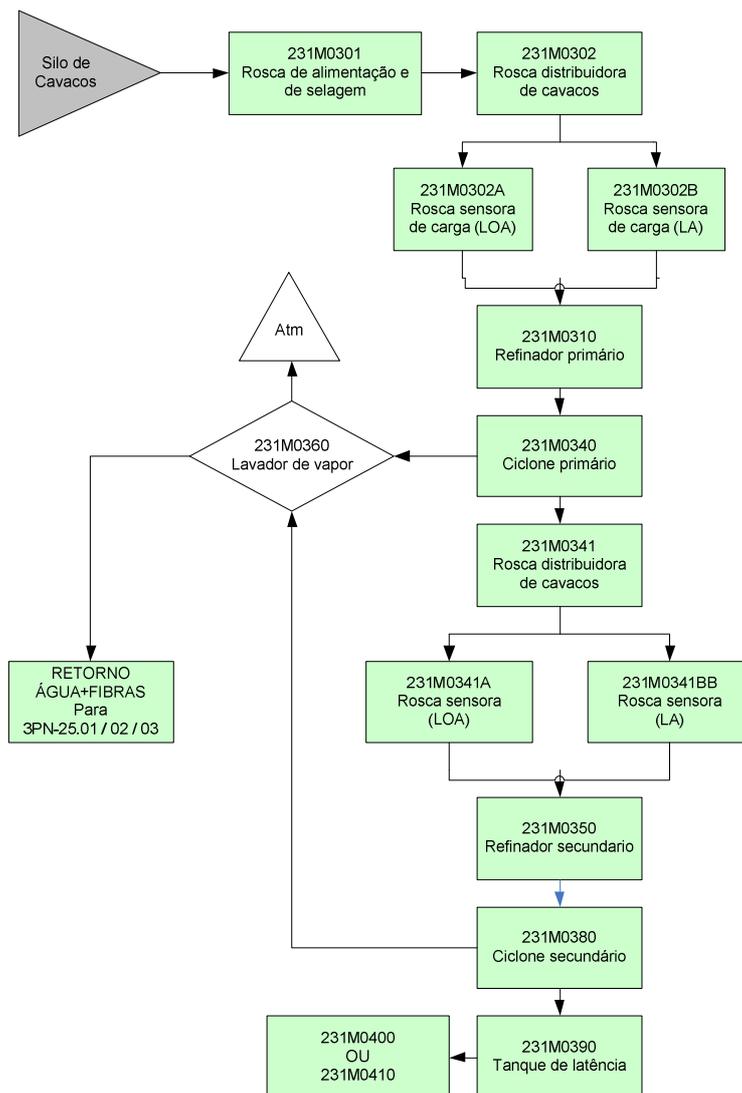


Figura 31: Fluxograma de operação do sistema de refinação
Fonte: Autoria própria (2012)

A análise das funções e falhas funcionais foi realizada em virtude do contexto operacional, onde o subsistema analisado apresenta duas funções principais: (i) separar a pasta do vapor e (ii) alimentar a rosca transportadora. Ainda foram identificadas as seguintes funções secundárias: (i) controlar velocidade da rosca; (ii) proteger a vedação do alimentador e; (iii) parar motor no caso de alarme.

Com base nas funções primárias dos sistemas, foram identificadas cinco falhas funcionais: (i) não separar a pasta do vapor e não alimentar a rosca fita do refinador secundário; (ii) não alimentar o refinador secundário de forma homogênea; (iii) não formar um tampão de pasta que evite a fuga de

vapor do refinador; (iv) não controlar a velocidade da rosca; (v) não proteger a vedação do alimentador.

5.2.4 Seleção dos sistemas críticos

O ciclone primário e o alimentador secundário fazem parte do sistema de refino na linha principal da planta de celulose, sendo classificados como subsistemas dessa linha. Como ambos possuem um número reduzido de equipamentos, decidiu-se por realizar a análise de todos os equipamentos presentes nos sistemas, estando a análise de implantação limitada a este nível.

Os equipamentos selecionados para análise são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Equipamentos selecionados para análise MCC

Equipamento	Descrição
Linha de Entrada da Pasta	Tubulação que traz a pasta do refinador primário 231M0310 para alimentar o ciclone primário 231M0340.
Corpo do Ciclone	Local onde a pasta é inserida para separação da pasta do vapor (por rotação e gravidade).
Exaustão do Vapor	Tubulação para a exaustão do vapor.
Motor do Alimentador Secundário	Motor de acionamento do alimentador secundário tipo tampão, com 110kW e 1800rpm. Este motor traciona o alimentador por correias e polias, e possui "vigia de velocidade".
Rosca Cônica do Alimentador Secundário	Rosca cônica sem fim que recebe a pasta vinda do ciclone e alimenta a rosca transportadora de fita (231M0345) acoplada ao refinador secundário.
Lubrificação	Lubrificação por banho de óleo (cárter) e engraxamento.
Instrumentação	Comando de velocidade variável - Inversor de Frequência.

Fonte: Aatoria própria (2012)

5.2.5 Análise crítica dos modos de falhas e efeitos

Após a identificação das falhas funcionais, realizou-se uma análise FMEA, através do formulário padrão ilustrado na Figura 32. Na planilha, os efeitos/consequências dos modos de falha foram associados às 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.

Com a análise FMEA foram encontrados 16 modos de falha associados às falhas funcionais dos sistemas analisados. Em razão de a análise estar restrita à um sistema com número reduzido de equipamentos (sendo estes críticos para o processo de refino) optou-se por conduzir todos os modos de falha encontrados para a seleção das atividades de manutenção.

PLANILHA ANÁLISE DE FALHAS - FMEA		Processo: Fabricação de Papel e Celulose		N.º:	Coordenador:	Data:	
		Linha: CTMP		1		09/01/2012	
		Equipamento: Refinação de alta consistência		Rev.:	Equipe:	Folha:	
		Conjunto: Ciclone primário e alimentador secundário		0	RCM CTMP	1/1	
Descrição do item: Separar a pasta do vapor, o que pode ser verificado através da medição da consistência da pasta, e alimentar a rosca transportadora (rosca fita) do refinador secundário.							
ÍTEM	FUNÇÃO	FALHA	EFEITO/CONSEQUÊNCIA DA FALHA	MODO DE FALHA		CAUSA	
SUBSISTEMA DO CICLONE PRIMÁRIO E ALIMENTADOR SECUNDÁRIO	Separar a pasta do vapor e alimentar a rosca fita do refinador secundário de forma homogênea.	Falha no acionamento do ciclone	O sistema de proteção do motor envia um sinal para o SDCD que gera um alarme na sala de controle e desliga o refinador e a planta como um todo, afetando a produção. O eixo do alimentador gira de forma irregular ou pára. O vigia de velocidade do motor detecta o problema e pára o motor O motor da rosca pára, gerando um alarme na sala de controle. O SDCD detecta a condição e desliga toda a planta. O sensor de vazão de água de selagem detecta o defeito, pára o motor do alimentador, gerando um alarme na sala de controle. O SDCD identifica o problema e faz o desligamento da planta.	1	A	1	Motor do alimentador tipo tampão parado.
					B	1	Correias de tracionamento do alimentador frouxas ou
					2	Caixa de redução com rolamentos quebrados	
					3	Caixa de redução com engrenagens quebradas	
					C	1	Eixo da rosca travado; rolamento quebrado
					2	Eixo da rosca travado; material estranho na rosca	
					3	Eixo da rosca travado; polpa concentrada	
		1	D	1	Baixa vazão de água de selagem		
		1	E	1	Baixa vazão de pasta no sistema: < 11 ton / h		
		1	F	1	Comando de velocidade variável com defeito		
		1	G	1	Base do motor com parafusos frouxos		
	Formar um tampão de pasta que evite a fuga de vapor do refinador.	Falha no tampão de pasta	Não formando o tampão na entrada do Refinador Secundário, o vapor escapa e vai abaixar a pressão do vapor dentro do Refinador. O sensor de pressão de vapor dentro do Refinador detecta o problema e envia um sinal para o SDCD que alarma na sala de controle, intertravando o sistema. A baixa pressão do alimentador não permite a formação do tampão como especificado, deixando escapar o vapor do Refinador para o Alimentador. O sensor de torque do alimentador detecta a condição, pára o motor e alarma na sala de controle. O SDCD detecta o problema e intertrava a planta.	2	A	1	Pouca quantidade de pasta no alimentador
				2	B	1	Baixo torque da rosca do alimentador
	Controlar a velocidade da rosca	Falha na velocidade da rosca	O Alimentador secundário fica com velocidades variadas. O vigia de velocidade detecta o problema, pára o motor e gera um alarme na sala de controle. O SDCD faz o intertravamento do sistema.	3	A	1	Referência de velocidade para o Inversor de frequência alterada sem interferência humana
	Proteger a vedação do alimentador	Falha na vedação do alimentador	O Alimentador secundário vai operar sem água de selagem, podendo danificar vedação. Vaza vapor e água.	4	A	1	Sensor de vazão da água de selagem com defeito
	Parar o motor e gerar alarme na sala de controle e falha no controle de velocidade da rosca	Falha no sistema de controle de velocidade	O alimentador secundário vai operar com velocidade variada causando prejuízos para produção e podendo haver danos ao equipamento.	5	A	1	Sistema vigia de velocidade em falha.

Figura 32: Formulário padrão de análise FMEA
Fonte: Autoria própria (2012)

5.2.6 Seleção das atividades de manutenção

Utilizando o diagrama decisional (Figura 19) e os critérios de aplicabilidade e efetividade das tarefas, foram identificadas 18 atividades de manutenção, documentadas na planilha decisional, com as demais informações de cada modo de falha. A periodicidade das tarefas foi estabelecida com base na experiência dos analistas e manutentores, histórico dos equipamentos, documentação técnica e informações dos fabricantes.

Todas as tarefas selecionadas foram aceitas quanto à sua aplicabilidade e viabilidade, sendo 10 atividades de detecção de falha (2 delas realizadas pela operação), 5 atividades de inspeção preditiva, 1 atividade de substituição preventiva e 2 atividades mudanças de projeto. A classificação dos modos de falhas e a seleção das atividades podem ser observadas no diagrama decisional (Figura 33) e esquema decisional (Figura 34).

DIAGRAMA DECISIONAL MCC			Processo: Fabricação de papel e celulose				Nº:	Coordenador:	Data:	
			Linha: CTMP				1		09/01/2012	
			Equipamento: Refinação de alta consistência				Rev.:	Equipe:	Folha:	
			Conjunto: Ciclone primário e alimentador secundário				0	RCM CTMP	1/1	
REFERÊNCIA DA INFORMAÇÃO	FILTRO/TAREFA						RISCO = F x C	TAREFA PROPOSTA	FREQUÊNCIA DA TAREFA	RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO
	DETECTIVA	PREDITIVA	PREVENTIVA	REPROJETO	FREQÜÊNCIA = F	CONSEQUÊNCIA = C				
F	FF	MF								
1	A	1A	S	N	N	N	0	Criar sinal no SDCD de alarme para desligar o refinador secundário e parar a planta na ocorrência de uma atuação do sistema de proteção do motor atuar.	Única	Especialista Automação
			N	S	N	N		Tarefa sob condição / Monitorar condições do motor através de inspeções preventivas	Trimestral	Preventiva
	B	1B1	N	N	S	N	0	Tarefa programada de descarte.	-	Especialista Mecânico
		1B2	N	S	N	N	0	Tarefa sob condição / Realizar monitoramento de ruído ou vibração na caixa de redução.	Trimestral	Preventiva
		1B3	N	S	N	N	0	Tarefa sob condição / Realizar monitoramento das condições das engrenagens e programar troca periódica	Trimestral	Preventiva
	C	1C1	N	S	N	N	0	Tarefa sob condição / Realizar monitoramento de vibração no rolamento.	Trimestral	Especialista Mecânico
		1C2	S	N	N	N	0	Monitorar condições de alimentação da rosca	-	Operação
		1C3	S	N	N	N	0	Monitorar condições de alimentação da rosca	-	Operação
	D	1D	N	N	N	N	0	Nenhuma manutenção programada.	-	-
	E	1E	S	N	N	N	0	Criação de um alarme no SDCD para detectar a oscilação de velocidade intertravando o sistema.	Única	Especialista Automação
	F	1F	S	N	N	N	0	Criação de um alarme no SDCD para detectar falhas no controle de velocidade variável	Única	Especialista Automação
	G	1G	N	S	N	N	0	Tarefa sob condição / Realizar inspeção sensível periódica (vibração).	Semestral	Preventiva
2	A	1A	S	N	N	S	0	Instalação de um sensor de pressão de vapor dentro do Refinador, para detectar o problema e enviar um sinal para o SDCD que alarma na sala de controle, intertravando o sistema.	Única	Especialista Automação
	B	1B	S	N	N	S	0	Instalação de um sensor de torque do alimentador detectando a condição, parando o motor e alarmando na sala de controle. O SDCD detecta o problema e intertrava a planta.	Única	Especialista Automação
3	A	1A	S	N	N	N	0	Inserir lógica de intertravamento quando velocidade estiver fora do SP, parando o motor e alarmando na sala de controle.	Única	Especialista Automação
4	A	1A	S	N	N	N	0	Tarefa programada de localização de falha / testar o funcionamento da proteção da vedação.	Semestral	Especialista Instrumentação
5	A	1A	S	N	N	N	0	Tarefa programada de localização de falha / testar o sistema de alarme e parada por falha de velocidade.	Semestral	Especialista Automação

Figura 33: Diagrama Decisional MCC
Fonte: Autoria Própria (2012)

ESQUEMA DECISIONAL MCC	Processo: Fabricação de Papel e Celulose		Nº.: 1	Coordenador:	Data: 09/01/2012		
	Linha: CTMP	Equipamento: Refinação de alta consistência				Rev.: 0	Equipe: RCM CTMP
Conjunto: Ciclone primário e alimentador secundário		CONSEQUÊNCIAS DA FALHA					
FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	Descrição				
			H	S	MA	O	
1 Separar a pasta do vapor e alimentar a rosca fita do Refinador Secundário de forma homogênea.	A Não separar a pasta do vapor e não alimentar a rosca fita do Refinador Secundário.	1 Falha no acionamento	Uma falha no acionamento gera a parada do subsistema e, conseqüentemente, de todo o sistema de refinação.	S	N	N	S
		A. Motor do alimentador tipo tampão parado.	O eixo do alimentador gira de forma irregular ou pára. O vigia de velocidade do motor detecta o problema e pára o motor enviando um sinal para o SDCD que gera uma alarme na sala de controle e desliga o refinador secundário, parando toda a planta.	S	N	N	S
		B1. Correias de tracionamento do alimentador frouxas ou rompidas	O eixo do alimentador gira de forma irregular ou pára. O vigia de velocidade do motor detecta o problema e pára o motor enviando um sinal para o SDCD que gera uma alarme na sala de controle e desliga o refinador secundário, parando toda a planta.	S	N	N	S
		B2. Caixa de redução com rolamentos quebrados	O eixo do alimentador gira de forma irregular ou pára. O vigia de velocidade do motor detecta o problema e pára o motor enviando um sinal para o SDCD que gera uma alarme na sala de controle e desliga o refinador secundário, parando toda a planta.	S	N	N	S
		B3. Caixa de redução com engrenagens quebradas	O eixo do alimentador gira de forma irregular ou pára. O vigia de velocidade do motor detecta o problema e pára o motor enviando um sinal para o SDCD que gera uma alarme na sala de controle e desliga o refinador secundário, parando toda a planta.	S	N	N	S
	B Não alimentar o Refinador Secundário de forma homogênea.	C1. Eixo da rosca travado; rolamento quebrado	O motor da rosca pára, gerando um alarme na sala de controle. O SDCD detecta a condição e desliga toda a planta.	S	N	N	S
		C2. Eixo da rosca travado; material estranho na rosca	O motor da rosca pára, gerando um alarme na sala de controle. O SDCD detecta a condição e desliga toda a planta.	S	N	N	S
		C3. Eixo da rosca travado; polpa concentrada	O motor da rosca pára, gerando um alarme na sala de controle. O SDCD detecta a condição e desliga toda a planta.	S	N	N	S
		D. Baixa vazão de água de selagem	O sensor de vazão de água de selagem detecta o defeito, pára o motor do alimentador, gerando um alarme na sala de controle. O SDCD identifica o problema e faz o desligamento da planta.	S	N	N	S
		E. Baixa vazão de pasta no sistema: < 11 ton / h	A baixa vazão de pasta vai provocar uma alimentação irregular no Refinador, que pode chegar a parar, caso esta vazão chegue a menos que 11 Toneladas por hora.	S	N	N	S
2 Formar um tampão de pasta que evite a fuga de vapor do refinador.	A Não formar um tampão de pasta que evite a fuga de vapor do refinador.	1 Falha no tampão de pasta	A não formação do tampão de pasta mecânica gera a parada do subsistema e, conseqüentemente, de todo o sistema de refinação.	S	N	N	S
		A. Pouca quantidade de pasta no alimentador	Não formando o tampão na entrada do Refinador Secundário, o vapor escapa e vai abaixar a pressão do vapor dentro do Refinador.	S	N	N	S
		B. Baixo torque da rosca do alimentador	A baixa pressão do alimentador não permite a formação do tampão como especificado, deixando escapar o vapor do Refinador para o Alimentador.	S	N	N	S
3 Controlar a velocidade da rosca	A Não controlar a velocidade da rosca	1 Falha na velocidade da rosca	A falha de velocidade na rosca gera a parada do subsistema e, conseqüentemente, de todo o sistema de refinação.	S	N	N	S
		A. Referência de velocidade para o Inversor de frequência alterada sem interferência humana	O Alimentador secundário fica com velocidades variadas.	S	N	N	S
4 Proteger a vedação do alimentador	A Não proteger a vedação do alimentador	1 Falha na vedação do alimentador	A falta de proteção na vedação do alimentador gera a parada do subsistema e, conseqüentemente, de todo o sistema de refinação.	S	N	N	S
		A. Sensor de vazão da água de selagem com defeito	O Alimentador secundário vai operar sem água de selagem, podendo danificar vedação. Vaza vapor e água.	S	N	N	S
5 Parar o motor e gerar alarme na sala de controle e falha no controle de velocidade da rosca	A Não parar o motor e gerar alarme na sala de controle e falha no controle de velocidade da rosca	1 Falha no sistema de controle de velocidade	A falha no controle de velocidade gera a parada do subsistema e, conseqüentemente, de todo o sistema de refinação.	N			
		A. Sistema vigia de velocidade em falha.	O alimentador secundário vai operar com velocidade variada causando prejuízos para produção e podendo haver danos ao equipamento.	N			

Figura 34: Esquema Decisinal MCC
Fonte: Autoria Própria (2012)

5.2.7 Melhoria contínua

Durante o processo de análise e após a sua conclusão foi formada uma equipe de auditores internos, com objetivo de avaliar os resultados obtidos e diagnosticar possíveis atualizações e/ou correções de falhas da equipe de implantação.

Conforme visto anteriormente, o processo MCC exige ajustes periódicos após os primeiros resultados. Além disso, o sistema pode sofrer alterações, como inclusão de novos equipamentos, mudanças em procedimentos, reprojeto, que podem interferir nos resultados da implantação.

Como neste estudo de caso a MCC foi implantada com o objetivo da criação de um plano de manutenção adequado, cabe à equipe de auditoria

verificar os resultados da implantação com o passar do tempo, de forma sistêmica e documentada, e realizar as devidas atualizações e revisões quando necessário.

5.2.8 Conclusão

Concluída a análise, foram executadas as tarefas e as melhorias propostas, além da inserção no plano de manutenção das atividades sistêmicas sugeridas.

Outra ação proveniente do processo de análise foi um treinamento para os técnicos de manutenção e operadores do processo, com todas as informações coletadas dos sistemas durante a implantação da MCC.

Como o objetivo da análise MCC era criar um plano de manutenção, através da identificação das funções, falhas funcionais e modos de falhas dos sistemas, o estudo conclui que o modelo proposto atendeu as expectativas. Em um primeiro momento como um importante processo de documentação das funções, falhas funcionais e análise dessas falhas, e em seguida como uma metodologia para criação de um plano de manutenção focado em atividades associadas as causas das falhas, com o objetivo de evitar a ocorrência de seus modos de falhas.

Visando avaliar o resultado, serão monitoradas as falhas e ocorrências relacionadas ao ciclone primário e ao alimentador secundário.

Cabe salientar que a MCC é um processo contínuo e que seu processo de aplicação deve ser revisto conforme acúmulo da experiência operacional e de manutenção desses sistemas.

5.3 ESTUDO DE CASO 3

Por fim, o método de implantação proposto também foi aplicado no subsistema de picagem de madeira, em uma indústria de molduras. Esse subsistema faz parte do processo de fabricação de molduras de madeira utilizadas na construção civil. O sistema de picagem é responsável por processar os resíduos de matéria-prima do processo e transformá-los em

cavacos, que são utilizados como combustível para a caldeira e/ou vendidos para outras empresas. É considerado um equipamento crítico no processo de fabricação de molduras.

5.3.1 Preparação do estudo

O objetivo da aplicação da MCC foi a seleção e a redução no número de incidências e falhas funcionais relacionadas ao subsistema de picagem de madeira, além da criação de um plano de manutenção através da aplicação da metodologia proposta. Uma equipe responsável pela análise foi formada, com base na experiência do pessoal da manutenção (manutentores e planejador) e da operação, com o apoio de profissionais da área de segurança no trabalho. A equipe formada iniciou as atividades com um treinamento no modelo proposto da MCC. Na sequência foi realizado estudo de todo o processo e das suas interfaces. Para isso foram utilizadas informações dos fabricantes e dados de equipamentos (mecânica, elétrica, automação), além da própria experiência dos envolvidos no processo.

5.3.2 Seleção do sistema

O sistema de picagem de madeiras é responsável por processar todo o resíduo de matéria-prima proveniente de toda a planta, transformando-o em cavacos. O picador tem como matéria-prima resíduos oriundos de todo o processo da planta, em razão disso, é classificado como um sistema crítico, pois uma parada sua implica em parar sua alimentação, o que acarreta a necessidade de parar todo o processo que o alimenta.

A correia transportadora principal recebe resíduos provenientes de vários equipamentos da serraria e da manufatura. O material passa por um separador de serragem e, em seguida, é transportado para uma segunda correia, que possui um detector de metais. Na sequência o material chega até o conjunto de rolos alimentadores, que auxiliam a entrada dos resíduos no picador.

Por meios de facas rotativas e uma contra-faca estática, é formada uma espécie de “tesoura”, e então a madeira é seccionada, transformando-se em cavaco. Por meio de força centrífuga, os cavacos são forçados contra a carcaça circular do rotor. São arrastados e propulsados por aletas fixadas no perímetro do rotor, as quais expulsam os cavacos por duto condutor até o ciclone separador, distribuindo-os (sem turbulência) para a peneira vibratória.

A peneira vibratória é composta por duas malhas, onde a primeira malha separa o cavaco *over-size*, retornando-o a correia de alimentação do picador e a segunda malha separa o cavaco (padrão) dos finos. O cavaco “padrão” é conduzido através da correia de cavaco verde até o silo de armazenagem e os “finos” são levados para a correia transportadora de serragem verde.

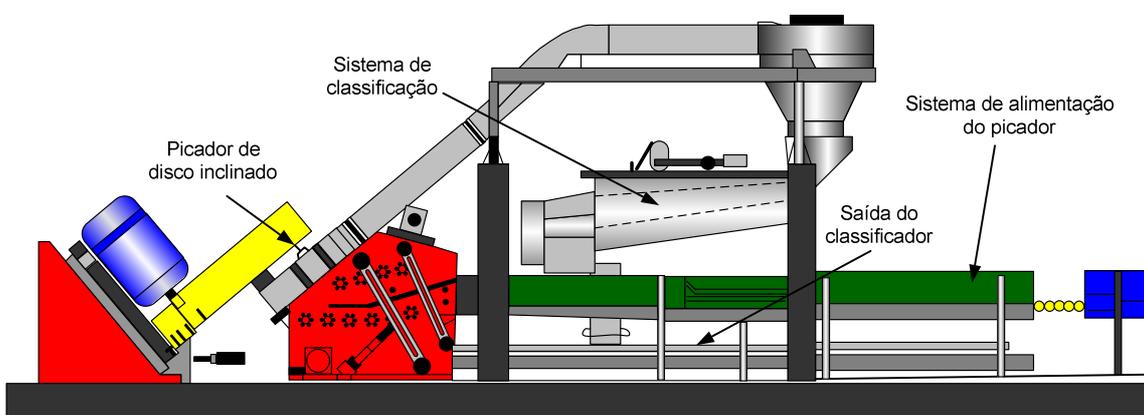


Figura 35: Sistema de picagem de resíduos de madeira
Fonte: Autoria própria (2012)

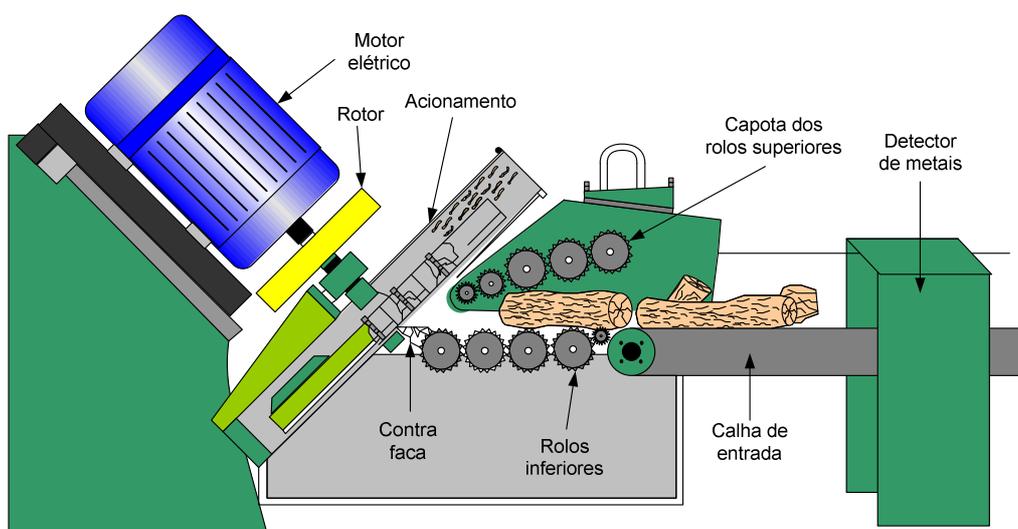


Figura 36: Picador de resíduos de madeira
Fonte: Autoria própria (2012)

5.3.3 Análise das funções e falhas

O primeiro passo na identificação das funções e falhas funcionais do picador foi estabelecer as entradas e saídas do equipamento e sua interface com outros equipamentos do processo.

Na sequência o sistema, o sistema foi analisado dentro do seu contexto operacional, onde foi definida como função principal: seccionar resíduos de matéria-prima da serraria, transformando-os em cavacos, com tamanho e formato padrão, para venda e serragem para alimentar a caldeira.

Foram identificadas duas falhas funcionais para o sistema: (i) não gerar cavacos e serragem e; (ii) gerar cavacos com tamanho e formato irregulares.

5.3.4 Seleção dos sistemas críticos

Após a definição da equipe responsável pela análise, escopo e objetivos da análise no sistema, foi definido o nível da em que seria realizada esta análise no mesmo, decidindo-se realizar uma análise ao nível de equipamento/componente.

Como o picador e a peneira vibratória compreende um conjunto pequeno de equipamentos, sendo em sua grande maioria componentes de natureza mecânica, e como ainda não apresentava nenhum plano de manutenção, optou-se por realizar a análise MCC em todo o equipamento. Os equipamentos analisados e sua descrição são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Equipamentos selecionados para análise MCC

Equipamento	Descrição
Separador de serragem	Sistema de separação de serragem instalado na correia de entrada do picador.
Calha de entrada	Calha para a entrada da madeira a ser processada pelo acionamento do picador. Direciona a madeira até os rolos alimentadores.
Rolos inferiores e superiores	Rolos alimentadores inferiores e superiores utilizados na “alimentação forçada” do picador.
Correntes dos rolos	Correntes de acionamento dos rolos alimentadores superiores e inferiores.
Contra-faca	Faca estática que, juntamente com as facas rotativas, formam uma espécie de “tesoura” para seccionar a madeira e formar os cavacos.
Acionamento do picador	Sistema mecânico onde ficam alocadas as facas rotativas.
Rotor	Rotor para a transmissão do movimento do motor para o acionamento do picador, com 2200mm de diâmetro e rotação de 432 RPM.
Motor elétrico	Motor elétrico de 300 CV de potência utilizado no acionamento do picador, com velocidade nominal de 1190 RPM.
Detector de metais	Equipamento de proteção utilizado para verificar a presença de metais na alimentação do picador.
Ciclone	Distribui o cavaco sem turbulência para as peneiras vibratórias.
Acionamento da peneira	Sistema de acionamento das peneiras vibratórias, com um motor elétrico com eixo excêntrico.
Correia de serragem verde	Sistema de transporte da serragem verde (cavacos finos) até o silo de armazenagem de serragem.
Correia de cavaco verde	Sistema de transporte do cavaco verde (cavaco padrão) até o silo de armazenagem de cavacos.

Fonte: Autoria própria (2012)

5.3.5 Análise crítica dos modos de falhas e efeitos

Utilizando o FMEA foram identificadas duas falhas funcionais para o sistema: (i) não gerar cavacos e serragem e; (ii) gerar cavacos com tamanho e formato irregulares. Através das falhas funcionais foram identificados 6 modos de falhas ao nível sistema, que resultaram em 23 modos de falha ao nível de componente.

A análise FMEA do sistema é apresentada na Figura 37.

PLANILHA ANÁLISE DE FALHAS - FMEA		Processo: Serraria	Nº: 1	Coordenador:	Data: 08/05/2012
		Linha: Geração de cavacos e finos	Rev: 0	Equipe: RCM PICADOR	Folha: 1/1
		Equipamento: Picador			
		Conjunto: Picador e Peneira oscilatória			
Descrição do Ítem: O sistema de picagem é responsável por digerir os resíduos de matéria-prima do processo e transformá-los em cavacos, que são utilizados como combustível para a caldeira e/ou vendidos para outras empresas.					
ÍTEM	FUNÇÃO	FALHA	EFEITO/CONSEQUÊNCIA DA FALHA	MODO DE FALHA	CAUSA
GERADOR DE OZÔNIO	Seccionar resíduos de matéria-prima da serraria, transformando-os em cavacos, com um tamanho e formato padrão, para venda e gerando serragem para alimentar a caldeira	Não gerar cavacos e serragem	Parada na alimentação da caldeira de biomassa da unidade, impactando em toda a unidade fabril, além de não geração dos cavacos, e parada de toda a planta da manufatura	1	Não há saída no picador
				A	Falhas nas facas
				1	Ajuste de fiação inadequado
				1	Ajuste inadequado do gabarito
				2	Falha no procedimento de ajuste
				2	Fixação da contra-faca
				3	Falha no detector de metais
				B	Falha na peneira oscilatória
				1	Quebra do cabo de aço
				2	Duto de saída entupido
				3	Desgaste nos rolamentos e eixo
				C	Falha nas correntes
				1	Corrente má especificada
				2	Quebra das correntes
	3	Má lubrificação das correntes			
	D	Falha nos rolos			
	1	Lubrificação ineficiente			
	2	Falta de vedação			
	3	Eixo desgastado			
	4	Abertura inadequadas			
		Gerar cavacos com tamanho e formatos irregulares	Geração de cavacos fora do tamanho e formato padrão, gerando claim dos clientes	2	Não há saída no picador
				A	Falhas nas facas
				1	Ajuste de fiação inadequado
				1	Ajuste inadequado do gabarito
				2	Falha no procedimento de ajuste
				2	Fixação da contra-faca
				3	Falha no detector de metais
				B	Falha na peneira oscilatória
1				Quebra do cabo de aço	
2				Duto de saída entupido	
3				Desgaste nos rolamentos e eixo	

Figura 37: Planilha FMEA do sistema do picador de madeiras
Fonte: Autoria própria (2012)

5.3.6 Seleção das atividades de manutenção

Como optou-se pela análise de todos os equipamentos do picador, não houve restrição nos modos de falha para a seleção das atividades de manutenção, visando também, criar um plano de manutenção para o equipamento.

Sendo assim todos os modos de falha foram analisados dentro da MCC, utilizando-se das planilhas de decisão e do diagrama para seleção das ações de manutenção (Figura 19), foram identificadas 17 atividades, das quais 13 são preventivas, 2 detectivas e 2 atividades de inspeção para a operação.

Após a definição das tarefas, foi estabelecido um plano de manutenção, contendo as ações selecionadas, o responsável por sua execução e o prazo

para sua conclusão, sendo este prazo estabelecido em razão do contexto operacional do equipamento e da experiência da equipe no mesmo.

O plano de manutenção é apresentado na Tabela 10 e as planilhas decisoriais da MCC são apresentados nas Figuras 38 e 39 respectivamente.

Tabela 10: Plano de Manutenção para o sistema do picador

Ações geradas	Prioridade	Responsável
Reposicionar mancal dos rolos craveados	1	Todos
Instalar defletor de resíduos	2	Mecânica
Substituir rolamento autocompensador de rolos, dupla carreira (22216K)	3	Mecânica
Substituir guia e chapa de desgaste	4	Mecânica
Verificar a possibilidade de instalar detector tipo túnel	5	Eletroeletrônica
Realizar LUP de conhecimento básico: como ligar / desligar o picador	6	Eletroeletrônica
Relocar detector da correia de cavacos para a saída da peneira	7	Todos
Substituir fornecedor para marca X	8	Mecânica
Criar procedimento para troca e ajuste da contra-faca	9	Mecânica
Lubrificar o cabo de aço com óleo penetrante	10	Mecânica
Criar cartão T para troca das correntes semestralmente	11	Mecânica
Criar cartão T para troca de cabos semestralmente	12	Mecânica
Incluir cabo de aço no plano de lubrificação	13	Mecânica
Criar cartão T para inspeção de rolamentos	14	Mecânica
Comprar novo gabarito	15	Eletroeletrônica
Criar cartão T semestral de limpeza e inspeção da cunha	16	Operação
Criar cartão T de inspeção da chapa do rotor e guia	17	Operação

Fonte: Autoria própria (2012)

FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CONSEQÜÊNCIAS DA FALHA				
			Descrição	H	S	MA	O
I Seccionar resíduos de matéria-prima da serraria, transformando-os em cavacos, com um tamanho e formato padrão, para venda e gerando serragem para alimentar a caldeira	A Não gerar cavacos e serragem	1 Não há geração de cavacos na saída do picador	Parada na alimentação da caldeira de biomassa da unidade, impactando em toda a unidade fabril, além de não geração dos cavacos, e parada de toda a planta da manufatura	N	N	N	S
		A. Falha nas facas					
A1. Ajuste de afiação inadequado							
A1.1 Ajuste inadequado do gabarito							
A1.2 Falha no procedimento de ajuste							
A2. Fixação da contra-faca							
A3. Falha no detector de metais		Permite a entrada de metais no picador, diminuindo a vida útil das facas / Pode ocasionar parada do picador e consequentemente parada da planta.					
B. Falha na peneira oscilatória		Parada de máquina, não havendo classificação dos cavacos e alimentação de serragem para a caldeira, ocasionando parada na planta de manufatura.					
B1. Quebra do cabo de aço							
B2. Duto de saída do picador entupido							
B3. Desgaste no eixo							
C. Falha nas correntes		Não há pressão suficiente para fixar os resíduos que serão seccionados pelas facas, podendo não ocorrer a geração de cavacos ou cortes irregulares					
C1. Corrente mal especificada							
C2. Quebra das correntes							
C3. Má lubrificação nas correntes							
D. Falha nos rolos	N	N	N	S			
D1. Rolamentos mau lubrificados							
D2. Falta de vedação							
D3. Eixo desgastado							
D4. Rolos com aberturas inadequadas							
B Gerar cavacos com tamanho e formato irregulares	2	Cavaco com formatos irregular	Geração de cavacos fora do tamanho e formato padrão, gerando claim dos clientes	N	N	N	S
		A. Falha nas facas					
		A1. Ajuste de afiação inadequado					
		A1.1 Ajuste inadequado do gabarito					
		A1.2 Falha no procedimento de ajuste					
		A2. Fixação da contra-faca					
		B. Falha na peneira					
B1. Quebra do cabo de aço							
B2. Duto de saída do picador entupido							
B3. Desgaste no eixo							

Figura 38: Planilha do esquema decisional MCC do Picador
Fonte: Autoria própria (2012)

DIAGRAMA DECISIONAL MCC			Processo: Serraria				Nº.:	Coordenador:	Data: 08/05/2012
			Linha: Geração de cavacos e finos						
			Equipamento: Picador				Rev.:	Equipe: RCM PICADOR	Folha: 1/1
			Conjunto: Picador e Peneira Oscilatória						
REFERÊNCIA DA INFORMAÇÃO			FILTRO/TAREFA				TAREFA PROPOSTA	FREQUÊNCIA DA TAREFA	RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO
			DETECTIVA	PREDITIVA	PREVENTIVA	REPROJETO			
F	FF	MF							
1	A	1A1	N	N	S	N	Limpeza e inspeção do sistema preventivamente	Semestral	Manutenção Mecânica
		1A1.1	N	N	S	N	Adquirir novo gabarito para ajuste	Única	Planejamento
		1A1.2	N	N	S	N	Criar procedimento para troca e ajuste do contra-faca	Única	Manutenção Mecânica
		1A2	S	N	N	N	Criar procedimento de inspeção	Única	Manutenção Mecânica
		1A3	S	N	N	N	Instalação de detector tipo túnel	Única	Manut. Eletroeletrônica
	B	1B1	N	N	S	N	Programar troca periódica dos cabos	Semestral	Planejamento / Mecânica
		1B2	N	N	S	S	Procedimento para acionamento do picador	Única	Autônoma
							Instalar defletor de resíduos	Única	Manutenção Mecânica
		1B3	N	N	S	N	Procedimento para inspeção e lubrificação com óleo penetrante	Semestral	Manutenção Mecânica
	C	1C1	N	N	S	N	Substituir fornecedor da corrente	Única	Planejamento / Mecânica
		1C2	N	N	S	N	Criar procedimento para troca das correntes	Semestral	Manutenção Mecânica
		1C3	N	N	S	N	Lubrificar o cabo de aço com óleo penetrante (viscolite)	Semestral	Manutenção Mecânica
	D	1D1	N	N	S	N	Procedimento para inspeção e lubrificação com óleo penetrante	Semestral	Manutenção Mecânica
		1D2	N	N	S	N	Reposicional mancal dos rolos craveados	Única	Manutenção Mecânica
		1D3	N	N	S	N	Substituir rolamento autocompensador de rolos, dupla carreira (22216K)	Única	Manutenção Mecânica
		1D4	N	N	S	N	Reposicional mancal dos rolos craveados	Única	Manut. Mecânica
2	A	1A1	N	N	S	N	Limpeza e inspeção do sistema preventivamente	Semestral	Manutenção Mecânica
		1A1.1	N	N	S	N	Adquirir novo gabarito para ajuste	Única	Planejamento
		1A1.2	N	N	S	N	Criar procedimento para troca e ajuste do contra-faca	Única	Manutenção Mecânica
		1A2	S	N	N	N	Criar procedimento de inspeção	Única	Manutenção Mecânica
		1A3	S	N	N	N	Instalação de detector tipo túnel	Única	Manut. Eletroeletrônica
	B	1B1	N	N	S	N	Incluir cabos no plano de lubrificação	Semestral	Planejamento / Mecânica
		1B2	N	N	S	S	Procedimento para acionamento do picador	Única	Autônoma
							Instalar defletor de resíduos	Única	Manutenção Mecânica
		1B3	N	S	S	N	Procedimento para inspeção e lubrificação com óleo penetrante	Semestral	Manutenção Mecânica

Figura 39: Planilha do diagrama decisional do MCC
Fonte: Autoria própria (2012)

5.3.7 Melhoria contínua

Da mesma forma que o estudo de caso anterior, durante o processo de análise e após a sua conclusão foi formada uma equipe de auditores internos, para a avaliação dos resultados iniciais obtidos e diagnosticar possíveis atualizações e/ou correções de falhas das etapas de implantação.

Com os primeiros resultados como referência, a MCC pode necessitar de ajustes periódicos, em função não somente de possíveis falhas no processo de implantação, mas também de alterações no sistema/planta.

Todo o conhecimento adquirido no processo de implantação da MCC no sistema selecionado pode auxiliar na revalidação dos resultados.

5.3.8 Conclusão

No sistema analisado, devido a inexistência de um plano de manutenção, eram realizadas apenas tarefas de caráter corretivo ou atividades preventivas de oportunidade, as quais não garantiam a confiabilidade do sistema e implicavam em trocas e tarefas desnecessárias e onerosas para a empresa.

A utilização do modelo MCC focou as tarefas de manutenção na preservação da função do sistema, conduzindo a atividades pró-ativas, que não implicaram em custos significantes de manutenção, sendo em grande parte, atividades de inspeção e lubrificação.

O objetivo desta análise MCC era identificar as funções e as falhas funcionais, bem como os modos de falhas dos sistemas, e, conseqüentemente, gerar um plano de manutenção bem definido. Neste sentido, conclui-se que o modelo atingiu o proposto, através da aplicação da metodologia para que fossem gerados planos de manutenção baseados nas atividades associadas às causas das falhas.

Como visto anteriormente, 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. Contudo, para a avaliação quantitativa dos resultados, as falhas referentes ao sistema do picador serão monitoradas continuamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manutenção afeta claramente a confiabilidade dos componentes e do sistema: se pouco é realizado, pode gerar um número excessivo de falhas dispendiosas e mau desempenho do sistema e, portanto, a confiabilidade é degradada; se realizada muitas vezes, a confiabilidade pode melhorar, mas o custo da manutenção irá aumentar drasticamente. Em relação ao custo-benefício, os dois gastos devem ser equilibrados.

A implementação de programas MCC representa um passo significativo na direção de "tirar o máximo de proveito" do equipamento instalado. No entanto, a abordagem ainda é heurística, e sua aplicação requer experiência. Além disso, pode-se levar um longo tempo antes que os dados que são coletados sejam suficientes para a tomada de tais decisões. Por esta razão, vários modelos matemáticos têm sido propostos para auxiliar a engenharia de manutenção. A literatura sobre modelos de manutenção tem se tornado bastante extensa.

Avaliando os resultados do presente trabalho, com relação ao 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), que consolidaram a aplicação da MCC como processo de documentação na análise das funções, falhas e identificação das ações de manutenção.

Para o primeiro estudo de caso, a metodologia foi aplicada em um sistema que já possuía um plano de manutenção definido. Conclui-se que o mesmo não estava sendo eficaz, pois em um período de 9 meses, de todas as falhas da linha de

produção (laminação), 5,18% eram provenientes do sistema de geração de ozônio. Isso representava 99 ocorrências que resultaram ou não em falhas funcionais.

Para as etapas de implantação da metodologia (Figura 19), ainda na fase da preparação do estudo, observou-se que este sistema já possuía a documentação referente à geração de ozônio, o que ajudou muito no detalhamento do sistema. Conseqüentemente, a etapa de seleção do sistema, com detalhes da descrição funcional, textual, lógica, etc. foram facilitadas, bem como a análise das funções e falhas do sistema. Em função da quantidade elevada de subsistemas e de componentes críticos, um ponto importante foi a utilização da regra “80/20” (Diagrama de Pareto). Essa ferramenta propõe que 80% das conseqüências vem de 20% das causas. Foram levados em conta parâmetros de criticidade, como segurança, qualidade, MTBF, MTTR, custo de reparo, entre outros. Isso auxiliou na seleção dos elementos mais críticos para o sistema. Nesta etapa também levou-se em conta o RPN (*Risk Priority Number*) onde, para os componentes com o RPN mais baixo (risco insignificante), utilizou-se o diagrama de decisão RPN para a seleção da atividade de manutenção adequada.

Para a escolha das atividades de manutenção o diagrama decisional (Figura 19) se mostrou uma ferramenta simples e adequada para a análise. Já para a periodicidade das tarefas de manutenção levou-se em conta a experiência dos analistas envolvidos, bem como dos técnicos em manutenção, o que caracterizou uma análise qualitativa desses parâmetros.

Após a aplicação da metodologia MCC proposta neste trabalho, num período de 3 meses o sistema teve apenas 5 ocorrências, das quais apenas 3 resultaram em falhas funcionais. Desta forma, dentre as falhas originadas na linha de laminação, houve uma queda de 5,18% para 1,036% de falhas originadas a partir do sistema de geração de ozônio. Isso representa uma redução de 80%. Conclui-se que o modelo da MCC proposto é eficaz ao ser empregado como ferramenta para o aumento da confiabilidade em sistemas industriais que já possuem uma política de manutenção definida, como meio de ajustar e/ou otimizar as políticas adotadas.

No segundo estudo de caso a metodologia proposta da MCC foi implementada em um sistema de refinação de madeira (ciclone primário e transportador secundário), que já possuía um plano de manutenção definido. Todavia, o mesmo estava desatualizado, sem referências da sua aplicabilidade, nem histórico e/ou acompanhamento das atividades. As atividades de manutenção eram

realizadas de acordo com os planos de manutenção criados ainda no *start up* da planta (2007) e nenhum acompanhamento foi realizado até então. Os planos de manutenção eram gerados automaticamente no software ERP da empresa. Na aplicação da metodologia MCC proposta neste trabalho buscou-se a redução de falhas e a criação de um novo plano de manutenção. Como trata-se de um sistema complexo, caracterizado como processo contínuo, a documentação acessível (dados do processo, dados técnicos, de manutenção) foi importante para as etapas iniciais da implantação. Outra questão importante é com relação à quantidade de equipamentos do sistema; como eram poucos, optou-se pela análise de todos e, conseqüentemente, todos os modos de falhas foram utilizados para a criação do plano de manutenção.

Para a periodicidade das tarefas, ajudou muito o fato da existência de informações acessíveis para as decisões. A experiência da equipe, manuais de operação, documentação técnica, foram extremamente importantes para a definição das tarefas. Em função disso, todas foram consideradas aplicáveis e viáveis.

Conclui-se que a aplicação da MCC neste sistema atingiu o objetivo de atualizar os planos de manutenção, que se mostraram desatualizados, com redundâncias desnecessárias e tarefas que dispendiam tempo e eram dispensáveis. A avaliação do resultado deverá ser contínua, com a monitoração das falhas e das ocorrências relacionadas ao ciclone primário e ao alimentador secundário. A MCC é um processo de melhoria contínua, e seu processo de aplicação deve ser revisado conforme acúmulo da experiência operacional e de manutenção desses sistemas.

Por fim, no terceiro estudo de caso, o sistema escolhido para a aplicação da metodologia MCC foi o de picagem de madeiras, em uma indústria de molduras aplicadas na construção civil. Caracteriza-se por ser um sistema simples, porém crítico para a planta, pois possui interface com vários sistemas do processo de fabricação. O sistema em questão não possuía um plano de manutenção definido, e as tarefas de manutenção se limitavam à intervenções corretivas ou intervenções preventivas de oportunidade. Isso não garantia a confiabilidade dos equipamentos e despendia tempo para a equipe de manutenção, além de gastos desnecessários.

Para as primeiras etapas de implantação houveram dificuldades pela falta de documentação técnica e informações do processo e dos equipamentos. Além disso, a empresa possui um elevado índice de rotatividade de mão de obra técnica, o que impacta na falta de profissionais com experiência. Isso também acarretou em

dificuldades para a seleção das atividades de manutenção, que concentrou-se em apenas algumas pessoas em função do grau de conhecimento técnico que as mesmas possuem. Assim, optou-se em um primeiro momento pelo foco nas tarefas de manutenção na preservação da função do sistema, conduzindo a atividades pró-ativas, que não implicaram em custos significantes de manutenção, sendo em grande parte, atividades de inspeção e lubrificação.

Como o sistema possuía poucos equipamentos, sendo em sua grande maioria componentes de natureza mecânica, e como ainda não apresentava nenhum plano de manutenção, optou-se por realizar a análise MCC em todo o sistema.

Conclui-se que a aplicação da MCC no terceiro estudo de caso atingiu os objetivos, pois foram identificadas as funções e as falhas funcionais, bem como os modos de falhas dos sistemas. Foram gerados planos de manutenção baseados nas atividades associadas às causas das falhas. Contudo, para a avaliação quantitativa dos resultados, as falhas referentes ao sistema do picador deverão ser monitoradas continuamente.

A MCC é um processo contínuo e a sua aplicação deve ser revista de acordo com o acúmulo da experiência operacional e de manutenção desses sistemas. O processo de melhoria contínua viabiliza o monitoramento do processo de implantação, durante as etapas de análise, possibilitando a correção do mesmo e contribuindo de maneira significativa para o resultado final. 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 pode sofrer alterações, como mudanças de projetos, inclusão de equipamentos, mudanças técnicas ou operacionais, que inferem no resultado da análise;
- O conhecimento adquirido durante o processo de análise e implantação pode ser útil na revalidação dos resultados.

Na aplicação da metodologia MCC proposta, contribui-se com 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. Além disso, 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.

Durante as análises algumas dificuldades foram observadas, como a necessidade de treinamento para a equipe de analistas na metodologia MCC e no 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. Contudo, 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.

Com essas ferramentas as informações seriam mais confiáveis e teríamos condições para resolver não todos, mas uma boa parte dos problemas relacionados à gestão de manutenção, nas questões técnicas, ambientais, de segurança e econômicas.

REFERÊNCIAS

ALMANNAI, B., GREENOUGH, R., KAY, J. **A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of Manufacturing Automation Technologies.** Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 24, 501-507, 2008.

ALSYOUF, I. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal of Production Economic**, 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, F. **Managing the Introduction of Reliability-Centred Maintenance, RCM – RCM as a method of working within hydropower organisations.** 2003. 317 f. Thesys (Doctoral) – Department of Business Administration and Social Sciences – Division of Quality and Environmental Management, Lulea University of Technology. Lulea, 2003.

BASSETTO, S.; SIADAT, A. e 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.** 3^a. ed. Burlington: Elsevier Inc., v. 3, 2005.

BLOOM, N. **Reliability Centered Maintenance (RCM): implementation made simple.** 1^a. 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.

CUNHA, J. B. F. **Raciocínio baseado em caso: uma aplicação em manutenção de máquinas e equipamentos.** 2002. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia – UFRG. Porto Alegre, 2002.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. **Application of RCM to a medium scale industry**. Reliability Engineering e System Safety, v. 77, n. 1, p. 31-43, 2002.

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.

ENDRENYI, J. et al. **The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability**. IEEE Transactions on Power Systems, v.16, n.4, p.885-895, November 2001.

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

FILHO, G. B. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. 1ª. 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**. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUTIÉRREZ, A. M. **Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios: enfoque sistémico kantiano**. 1ª. 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 e 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 e 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...**: IEEEXplore Digital Library, 2009. p. 81-85. Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=earnumber=5359954eisnumber=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.

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

KHAN, M. R. R.; DARRAB, I. A. **Development of analytical relation between maintenance, quality and productivity**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. v. 16 n. 4, 2010. p. 341-353

KIM, J. H.; JEONG, H. Y. e 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.

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. 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. e 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**. 1^a. ed. Califórnia: Dolby Access Press, 1978.

OLIVEIRA, U. R.; PAIVA, E. J. e 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 e 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**. 2^a. ed. New Jersey: John Wiley e Sons, 2004.

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.

SALONEN, A.; DELERYD, M. **Cost of poor maintenance: A concept for maintenance performance improvement.** Journal of Quality in Maintenance Engineering. v. 17, n. 1, 2011. p. 63-73.

SAMET, S.; CHELBI, A. **Optimal availability of failure-prone systems under imperfect maintenance actions.** Journal of Quality in Maintenance Engineering. v. 16, n. 4, 2010. p. 395-412.

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 e Francis Ltd, 2005.

SILVA, Edna L. e 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: 5th International Conference on FACTORY. 2-4 abr., 2000. **Anais...**: IEEEExplore Digital Library, p. 131-138.

SULLIVAN, G. P. et al. **Operations e 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.

TAKAHASHI, Y.; OSADA, T. TPM/MPT: **Manutenção Produtiva Total**. 3. ed. São Paulo: IMAM, 2002.

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.

TSAROUHAS, P. H. **A comparative study of performance evaluation based on field failure data for food production lines**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. v. 17, n. 1, 2011. p. 26-39.

TURAN, O.; LAZAKIS, I.; JUDAH; S e 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.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM – Planejamento e Controle de Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

WANG, Cheng-Hua e 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. e 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**. 1ª. 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.