

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOSE CLAUDEMIR SCHMITT

**MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHA UTILIZANDO A INTEGRAÇÃO DAS
FERRAMENTAS DMAIC, RCA, FTA E FMEA**

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ROBERTO CAMELLO LIMA

SANTA BÁRBARA D'OESTE
2013

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHA UTILIZANDO A INTEGRAÇÃO DAS
FERRAMENTAS DMAIC, RCA, FTA E FMEA**

JOSE CLAUDEMIR SCHMITT

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ROBERTO CAMELLO LIMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

**SANTA BÁRBARA D'OESTE
2013**

**MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHA UTILIZANDO A INTEGRAÇÃO DAS
FERRAMENTAS DMAIC, RCA, FTA E FMEA**

JOSE CLAUDEMIR SCHMITT

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 19 de fevereiro de 2013,
pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima (PPGEP/FEAU)

Prof. Dr. Fernando Celso de Campos (PPGEP/FEAU)

Prof. Dr. Fabiano Leal (UNIFEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Dr. Carlos Roberto Camello Lima e Dr. André Luis Helleno pelo auxílio prestado no desenvolvimento do trabalho e pelas colaborações feitas na banca de avaliação.

Agradeço também a colaboração da empresa onde se desenvolveu a parte aplicada do trabalho.

Agradeço em especial a CAPES, que me proporcionou a realização deste trabalho.

Dedico este trabalho a minha esposa, Elizangela, que fez todo o possível para me proporcionar sempre o melhor. A minha mãe, Euzete, e a todos os familiares e amigos que sempre me apoiaram e torceram muito para o meu sucesso.

Todas essas pessoas contribuíram muito para que essa vitória fosse alcançada.

SCHMITT, José Claudemir. ***Método de Análise de Falha utilizando a Integração das ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA***. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

As falhas representam não conformidades nas atividades produtivas, que comprometem a disponibilidade dos ativos, reduzindo a competitividade, de tal modo que pesquisas para seu controle e prevenção são, no mínimo, desejáveis. Diversas ferramentas de análise estão disponíveis e auxiliam no controle e prevenção de falhas. Cada uma das ferramentas disponíveis apresenta características específicas que favorecem sua aplicação em determinadas situações. Este trabalho propõe um método para a utilização integrada de algumas ferramentas, com o intuito de aumentar a confiabilidade dos ativos pelo uso combinado de práticas inerentes às ferramentas individuais. O trabalho se baseou em uma revisão bibliográfica sobre os temas relacionados, na busca dos conceitos centrais das ferramentas utilizadas, com uma abordagem metodológica de pesquisa-ação, testando e ajustando o método proposto em uma empresa do setor têxtil. O método utiliza o DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar) para conduzir e organizar todas as etapas do processo, o RCA (análise de causa raiz da falha), para investigar e identificar os fatores físicos, humanos e sistêmicos das falhas e, complementarmente, o FTA (análise da árvore de falhas) e o FMEA (análise dos modos e efeitos de falhas) para identificar as ações de melhoria da confiabilidade do ativo. Na aplicação do método de análise de falhas integrado, foi obtido um aproveitamento de 90% das 30 análises realizadas, as quais não voltaram a ocorrer mais, obtendo-se um ganho de mais de 10% de disponibilidade do ativo. Como resultado final, foi possível realizar melhorias no plano de manutenção, com consequente aumento de confiabilidade e disponibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de falhas; confiabilidade; DMAIC; RCA; FTA; FMEA

SCHMITT, José Claudemir. **Method for Failure Analysis Using the Integration of DMAIC, RCA, FTA and FMEA tools.** 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

Failures represent nonconformities in productive activities that compromise the availability of assets, reducing competitiveness, so that searches for its control and prevention are at least desirable. Several analysis tools are available and help to control and prevent failures. Each of the tools available has specific characteristics that favor its use in certain situations. This paper proposes a method for the integrated use of some tools, in order to increase reliability of assets by the combined use of practices inherent to individual tools. The work was based on a literature review on the related issues, in search of the central concepts of the tools used, with a methodological approach of action research, testing and adjusting the proposed method in a company in the textile sector. The method uses the DMAIC (define, measure, analyze, improve and control) to conduct and organize all stages of the process, the RCA (root cause analysis of the failure) to investigate and identify the physical, human and systemic failures and in addition an FTA (fault tree analysis) and FMEA (analysis of failure modes and effects) to identify actions to improve asset reliability. In implementing the method of analyzing faults integrated, was obtained a recovery of 90% from 30 analyzes, which no longer occur again, yielding a gain of over 10% availability of the asset. As a final result, it was possible to make improvements in the maintenance plan, resulting in increased reliability and availability.

KEYWORDS: Failure Analysis; reliability; DMAIC; RCA, FTA, FMEA

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	I
LISTA DE FIGURAS.....	II
LISTA DE TABELAS	III
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 JUSTIFICATIVA.....	2
1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	4
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MANUTENÇÃO	6
2.2 O QUE SÃO FALHAS E POR QUE ELAS OCORREM	9
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS	12
2.4 CONFIABILIDADE E A NATUREZA DAS FALHAS.....	14
2.5 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE FALHAS.....	26
2.5.1 DMAIC - DEFINIR, MEDIR, ANALISAR, MELHORAR E CONTROLAR.....	26
2.5.2 RCA - ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DA FALHA	30
2.5.3 FTA – ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS	43
2.5.4 FMEA - ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHAS	47
2.6 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO NÃOTECIDO	50
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS FERRAMENTAS DE ANALISE DE FALHAS.....	58
3 MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS INTEGRADO	62
3.1 INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS	63
3.2 ESTRUTURAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS	63
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO OU FALHA	66

3.2.2	DEFINIÇÃO DOS PASSOS DO MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS.....	67
3.3	DISCUSSÃO DO MÉTODO.....	73
4	APLICAÇÃO DO MÉTODO INTEGRADO	74
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO	74
4.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE RCA INTEGRADO.....	75
4.3	DISCUSSÃO DA APLICAÇÃO	89
5	CONCLUSÕES.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABINT – Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos

DMAIC - Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar

FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis* - Análise dos Modos e Efeitos de Falha

FTA- Análise da Árvore de Falhas

MASP - Método de Análise e Solução de Problemas

MTBF – *Mean Time Between Failures* – Tempo Médio Entre Falhas

PDCA – Planejar, Executar, Checar, Implementar

RCM – *Reliability Centered Maintenance* - Manutenção Centrada em Confiabilidade

RCA – *Root Cause Analysis* - Análise de Causa Raiz

TPM – *Total Productive Maintenance* - Manutenção Produtiva Total

TNT - Tecido Não Tecido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de falhas	13
Figura 2 – Relação entre esforço e resistência do equipamento	16
Figura 3 – Curva da Banheira	17
Figura 4 - Curva de taxa de falha x tempo para componentes eletrônicos	19
Figura 5: Curva taxa de falha x tempo de operação “A, B e C”	22
Figura 6: Curva de distribuição de freqüência de falha- Falha tipo “B”	23
Figura 7: Curva taxa de falha x tempo de operação D, E, F	24
Figura 8 – Ciclo PDCA de Controle de Processos	27
Figura9 - Etapas para a RCA	34
Figura 10 - Diagrama para investigação de falhas em equipamentos	36
Figura 11 - Exemplo da “Árvore dos Porquês” genérica	41
Figura 12 – RCA - Árvore dos porquês simplificada	42
Figura 13-FTA - Árvore de falha.....	44
Figura 14 – FTA - Árvore de falha genérica	47
Figura 15 - FMEA na forma de árvore de falha	50
Figura 16 - Fluxo de fabricação do nãotecido por hidroentrelaçamento	53
Figura 17 - Processo de Formação da Manta Via Carda	54
Figura 18 - Processo de Consolidação por Agulhagem	56
Figura 19– Agulhadeira para nãotecido	57
Figura 20 – Integração das Ferramentas	66
Figura 21 - Fluxograma de integração das ferramentas de análise de falhas..	67
Figura 22- Esquema de funcionamento do Compactador de Fibras	75
Figura 23 - Fotos da ocorrência do evento	78
Figura 24 – Gráfico de Produção	80
Figura 25 – Árvore dosPorquês – parte 1	82
Figura 26 - Árvore dosPorquês- parte 2(continuação)	83
Figura 27 – FMEA – Sensor indicação de porta fechada	86
Figura 28 – Árvore de falha do Sensor	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das etapas da curva da banheira	20
Tabela2 - Fases do DMAIC.....	29
Tabela 3 – Elementos da árvore dos porquês	40
Tabela 4 - Exemplo de um FMEA em máquinas agrícolas	49
Tabela 5 - Tipos de Fibras/Filamentos.....	52
Tabela 6 - Passos para a utilização do RCA.....	59
Tabela 7 – Passos do RCA resumido	60
Tabela 8 - Passos para a utilização do RCA.....	61
Tabela 9–Integração do RCA com o DMAIC	65
Tabela 10 – Passos do método integrado de análise de falhas	91

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordadas as considerações iniciais do trabalho, a motivação que leva o autor à realização do trabalho e o objetivo do trabalho. São apresentadas as justificativas do trabalho, enfatizando a confiabilidade dos ativos, a preocupação com a eliminação da ocorrência de falhas. A abordagem metodológica é definida como um trabalho de pesquisa-ação, na qual há interação do autor na resolução do problema. O capítulo é encerrado com a apresentação da estrutura do trabalho.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria nacional tem passado por grandes desafios como a globalização dos mercados, os grandes avanços tecnológicos dos países desenvolvidos, alta competitividade com baixo custo de produção dos países asiáticos, a oscilação do mercado europeu, segundo Abeleef *al.* (2008). Frente a estes desafios, a indústria nacional tem buscado otimizar seus recursos para o aumento do seu desempenho, na busca de zero defeito, alta eficiência dos operadores, maior disponibilidade de seus ativos, baixo custo de produção. Ser mais competitiva e manter uma posição de vanguarda, segundo a publicação da ABRAMAN (2011), Associação Brasileira de Manutenção, pode ser facilitado na implementação de ferramentas de gestão de ativos.

Para a busca de otimização em todas as áreas são necessárias ferramentas que possam medir e indicar a melhor direção. Para um melhor desempenho dos ativos em disponibilidade, a manutenção tem desempenhado um papel fundamental dentro da estratégia das organizações, sendo responsável por manter o ativo disponível para a produção sem falhas.

A falha leva a um alto custo de produção, baixa confiabilidade, baixa disponibilidade e tem um impacto direto no desempenho da empresa.

Com a evolução dos conceitos de manutenção, tem se desenvolvido ferramentas para a prevenção e identificação das causas das falhas dos ativos. Mediante este cenário surge à necessidade de se avaliar as ferramentas existentes, de maneira que possam ser utilizadas da melhor forma, identificando as suas vantagens e a possibilidade de aplicação conjunta.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é propor um método de análise de falhas integrado, utilizando as ferramentas RCA, FTA, FMEA e DMAIC, capaz de gerenciar todas as fases de identificação da causa raiz da falha e a execução das ações de melhorias identificadas na análise.

1.3 JUSTIFICATIVA

O tema abordado está ligado a um campo da manutenção que, ultimamente, vem ganhando bastante foco, que é a engenharia de confiabilidade, a qual determina o quanto o equipamento é confiável.

Baseado em um histórico de falhas, a engenharia de confiabilidade estabelece um intervalo de confiança para um determinado componente ou sistema. Este intervalo de confiança permite estabelecer um tempo de troca para os componentes críticos que estão sujeitos a falhas. Este intervalo de confiança é tão confiável quanto o número de análises realizadas no sistema, ou seja, quanto mais ensaios ou testes são realizados no sistema, mais confiável o intervalo será.

Com um intervalo de confiança estabelecido, são elaboradas as tarefas preventivas para o equipamento ou sistema; assim, quando a intervenção

ocorrer, será substituído o componente crítico, antes que venha a ocorrer uma falha.

A produção em larga escala de um determinado componente ou sistema torna a análise do intervalo de confiança mais viável com um custo acessível. A probabilidade de falha é bem pequena, o que torna o equipamento ou sistema de alto grau de confiabilidade.

Para um número pequeno de equipamentos ou, muitas vezes, apenas um, torna-se onerosa a realização de ensaios e testes para se determinar o intervalo de confiança. Além disso, o que mais dificulta é a complexidade e a inovação tecnológica de determinados equipamentos com um valor agregado muito alto.

A análise de falhas é uma das maneiras de se entender o comportamento do equipamento, por exemplo: como falhou, por que falhou, quando falhou, quanto tempo operou até a falha. Respondendo-se a estas perguntas, pode-se entender os fatores que levaram ao início da falha.

Mediante esta necessidade de se identificar o fator propulsor de uma falha, a utilização de ferramentas de análise de falha permite a identificação correta dos fatores que iniciaram a falha no equipamento. As ferramentas de análise de falhas buscam preencher, de uma maneira sutil, esta lacuna, com uma investigação precisa da ocorrência do evento, identificando o comportamento do equipamento diante de uma falha. As ferramentas para análise de falhas encontradas nas literaturas tornaram-se especialistas na resolução da falha e não em sua gestão.

A utilização conjunta de ferramentas de análise de falhas permite uma abordagem mais ampla, visto que as ferramentas possuem particularidades distintas, tornando o trabalho de análise mais robusto e com uma gestão efetiva da análise.

1.4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para a realização deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica sobre as ferramentas mais utilizadas em análise de falhas, a fim de se conhecer as diversas informações disponíveis que envolvem o tema e coletar as informações iniciais que irão compor o trabalho. Em seguida, foi realizado um estudo das informações adquiridas na etapa anterior para iniciar a definição dos conceitos que envolvem o tema, na integração das ferramentas mais utilizadas na análise de falhas.

Segundo a classificação proposta por Miguel (2007), este trabalho trata-se de uma pesquisa-ação, visto que se trata da resolução de um problema coletivo e na qual o pesquisador participa da solução, com abordagem qualitativa e objetivos descritivos. Segundo Coghlan e Coghlan (2002) e Oliveira (2005), a abordagem pode ser composta por três etapas:

Primeira etapa – entendendo o contexto do trabalho e o seu propósito;

Segunda etapa – composta de seis passos: coletar dados, avaliar os dados, analisar os dados, planejar as ações, implementar as ações e acompanhar a evolução das ações;

Terceira etapa – monitorar as ações implementadas.

O método aplicado do trabalho abordado pela pesquisa-ação está descrito no tópico estrutura do trabalho, o qual define a aplicação das etapas da pesquisa-ação.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, descritos nos parágrafos abaixo os quais estão vinculados a pesquisa-ação.

No primeiro capítulo, introdução, apresenta-se o problema e sua justificativa, definindo-se o objetivo, o propósito da dissertação e os métodos para seu desenvolvimento, a qual esta vinculada à etapa inicial da pesquisa-ação no entendimento do contexto e do propósito do trabalho.

No segundo capítulo, são apresentadas a definição e os tipos de manutenção, conceitos de falhas, porque as falhas ocorrem, classificação das falhas, as ferramentas de análise de falhas RCA, FTA, FMEA e DMAIC, e a contextualização do processo de fabricação de nanotecidos. O segundo capítulo dá início à segunda etapa da pesquisa-ação, compondo o primeiro passo - coleta de dados, e o segundo passo - avaliação de dados.

O terceiro capítulo apresenta a proposta do método de análise de falhas integrado, que compõem o terceiro passo - analisando os dados, da segunda etapa da pesquisa-ação.

No quarto capítulo, é apresentada a aplicação do método no objeto de pesquisa, que compõe o quarto passo, planejamento das ações e o quinto passo, implementação das ações, da segunda etapa da pesquisa-ação.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho realizado, esclarecendo-se as limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros. Encerrando a segunda etapa com o sexto passo - acompanhar a evolução das ações e a terceira etapa - monitorar, da pesquisa-ação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata da história da manutenção, da sua evolução e identifica a necessidade dos cuidados com os ativos. São abordados os conceitos de confiabilidade e de falha quanto a sua origem e classificação.

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MANUTENÇÃO

Com o passar dos anos a manutenção tem evoluído drasticamente, seus conceitos são alterados de forma a seguir a evolução dos ativos e nas novas tecnologias aplicadas. A história da manutenção é caracterizada em gerações bem definidas, segundo Moubrey (2001), Pinto e Xavier (2001), como é demonstrado a seguir.

Primeira Geração

A Primeira Geração caracteriza o período até a II Guerra Mundial, quando o setor industrial não era totalmente mecanizado, as paradas por falhas não eram vistas como fator primordial dentro da gestão, visto que os equipamentos eram simples e superdimensionados, o que os tornavam confiáveis e fáceis de manter, não sendo necessária uma manutenção mais acurada e sistemática.

Segunda Geração

Durante e principalmente após a II Guerra Mundial, a indústria mudou drasticamente, surge uma maior necessidade por bens de todos os tipos, a falta de mão de obra na fabricação e na busca por alternativa, surge à necessidade da mecanização e o aumento do número de equipamentos para

suprir a demanda. Com o aumento da complexidade dos equipamentos, teve início a dependência do homem pelas máquinas em suas atividades, surge a necessidade da mudança do foco, as falhas poderiam e deveriam ser evitadas. Por volta dos anos 1.960, surge o conceito de manutenção preventiva, com pequenas revisões em intervalos fixos; começa a se observar o aumento dos custos de manutenção, surge a necessidade de se planejar as atividades de manutenção e a preocupação em aumentar a vida útil dos equipamentos.

Terceira Geração

A partir dos anos 1.970, o processo de mudança se acelerou nas indústrias; a diminuição da produção com as paralisações por falhas inesperadas dos equipamentos gerou um aumento dos custos, afetando a qualidade dos produtos, tornando-se uma preocupação generalizada. Os efeitos foram se agravando com a paralisação, tinha-se uma tendência mundial com Just in Time, ao ponto de ocorrer paralisação de fábricas, por falta de produtos ocorrida pelas falhas inesperadas dos equipamentos, segundo (MOUBRAY, 2001).

Com o crescimento da automação e mecanização, os equipamentos passam a possuir mais sensoriamento e desenvolve nos equipamentos uma maior complexidade. Com a automação, as falhas começam a afetar os padrões de qualidade dos produtos. Há, ainda, uma necessidade de atender às expectativas de segurança e preservação ambiental, que surgem como uma tendência mundial.

Diante deste cenário, a manutenção teve um aumento significativo de seus custos, pois equipamentos cada vez mais automatizados e complexos exigiam uma mão de obra cada vez mais especializada e técnicas de manutenção mais específicas.

Segundo Mirshawka e Olmedo (1993), manutenção é o conjunto de ações e recursos aplicados aos ativos a fim de manter suas funções dentro de parâmetros adequados de disponibilidade, de qualidade, de prazos, de custos e de vida útil. Segundo Borba Prá (2010), o surgimento da palavra manutenção em aplicações na indústria ocorreu em 1950, nos Estados Unidos da América; no entanto, sua origem encontra-se no vocabulário militar e significava manter/suprir as unidades de combate.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, na norma NBR 5462 (1994, p.6), o termo manutenção é definido 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 desempenhar uma função requerida”. A terminologia “item”, na norma NBR 5462, pode ser entendida como “qualquer parte, conjunto, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente”. Alguns autores como Moubray (2001) e Pinto e Xavier (2001) substituem a palavra item por “ativo”.

A manutenção, levando-se em consideração todas as suas atribuições, apresenta alto grau de complexidade ao se manter a função do equipamento dentro dos parâmetros requeridos como disponibilidade, custo de reparo, vida útil do equipamento, qualidade, confiabilidade e evolução da tecnologia.

A utilização de ferramentas de análise de falhas para apoio a manutenção do equipamento é muito importante para deixá-lo apto em executar a sua função. Qual seja a manutenção é um recurso estratégico para melhoria dos resultados operacionais e financeiros, segundo (SOUZA *et al.*, 2010).

Tipos de manutenção

Segundo Pinto e Xavier (2001), a maneira pela qual é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os vários tipos de manutenção existentes:

- Manutenção Corretiva Não Planejada: é a correção da falha de maneira aleatória.
- Manutenção Corretiva Planejada: é a atuação para a correção da falha ou do desempenho menor do que o esperado.
- Manutenção Preventiva: é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo.
- Manutenção Preditiva: é a atuação realizada com base em modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.
- Manutenção Detectiva: é a atuação efetuada em sistemas de proteção, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.
- Engenharia de Manutenção: é a mudança de paradigma na manutenção. É deixar de ficar consertando continuamente para procurar as causas básicas, modificar situações de mau desempenho, deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver a manutenibilidade, tornando o equipamento mais confiável.

Na busca pela excelência em operação as empresas têm adotado estratégias mais competitivas, segundo Otani e Machado (2008), o desenvolvimento da gestão da manutenção, tem impacto direto no desempenho dos equipamentos, a evolução dos tipos de manutenção nas empresas é um dos fatores chaves na busca da excelência operacional.

2.2 O QUE SÃO FALHAS E POR QUE ELAS OCORREM

As falhas, segundo Moubrey (2001), Pinto e Xavier (2001), Lafraia (2001) e Siqueira (2009), consistem na interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar uma função requerida ou esperada a atender o seu

propósito específico. O estado de um item é a condição existente antes da ocorrência da falha e após a falha.

Segundo Takaiama (2008), os estados de um item podem ser classificados como estado de indisponibilidade ou estado de disponibilidade. O estado de indisponibilidade é caracterizado pela ocorrência de uma pane, incapacidade temporária ou permanente. Já o estado de disponibilidade é caracterizado pelo desempenho da função requerida, do funcionamento do equipamento.

A falha completa é resultado do desvio de características além dos limites especificados, causando perda total da função requerida do equipamento, enquanto que a falha parcial não causa a perda total da função requerida (PALLEROSI, 2007). De forma normatizada, falha é definida como o final da habilidade de um item desempenhar as funções para o qual ele foi projetado (HOYLAND e RAUSAND, 2004).

Desta maneira a falha caracteriza a perda da função de um componente. A perda da função ou a ocorrência da falha é devido a diversos fatores, denominado mecanismos de falha ou modos de falhas. Segundo Simões (2006), mecanismo de falha é um conjunto de processos físicos, químicos ou outros que conduzem a uma falha.

Segundo Salgado (2008), o termo modo de falha refere-se à forma como uma falha se manifesta. A identificação dos modos de falhas ou dos fatores é um trabalho que requer tempo e dedicação, uma das formas adotadas é a utilização da técnica FMEA, outra forma é a análise estrutural dos materiais dos componentes que falharam.

Segundo Zaions (2003), a causa da falha representa os eventos que geram (provocam, induzem) o aparecimento do tipo modo de falha, e pode ser detalhada em diferentes fatores para diferentes situações e segundo Sica e Oliveira (2010), as causas do modo de falha são os motivos que levaram o modo de falha a ocorrer, podem estar nos componentes da vizinhança, fatores ambientais, erros humanos, ou no próprio componente. Segundo Almeida e Fagundes (2005), o modo de falha pode ser definido como o efeito pelo qual uma

falha é observada em um item que falhou, ou seja, é como nós podemos observar o defeito.

Os modos de falhas podem ser identificados nas análises estruturais dos materiais(deflexão excessiva, fadiga, fratura dúctil e frágil, desgaste, escoamento, flambagem e fluência),ou em diferentes situações, segundo Afonso (2006), Castro e Meggiolato (2011) e Lafraia (2001), são induzidos por diversos fatores, os quais podem destacar os principais:

Falha de projeto: as falhas de projeto ocorrem quando o projetista não consegue identificar claramente as necessidades do cliente ou quando estas não estão adequadamente identificadas e não consegue aplicar os requisitos de engenharia corretos para a aplicação ou não possui sistema capaz de modelar o projeto;

Falha na Seleção de Materiais: embora o material para construção das peças das máquinas seja escolhido na fase do projeto, é citado separadamente em que pode ocorrer defeito em função da aplicação do equipamento. As falhas na seleção do material estão relacionadas à incompatibilidade dos materiais na aplicação, materiais que reagem com os agentes do processo;

Imperfeições no Material: as imperfeições no material são tanto internas como externas, as quais estão intimamente ligadas ao processo de fabricação, que podem levar a uma redução da resistência mecânica dos componentes, sendo um caminho preferencial a propagação de trinca nos componentes. Alguns processos são mais característicos de imperfeições como: peças fundidas (inclusões, gotas frias, vazios e porosidade); forjados (dobras, emendas e contração); laminados (dupla laminação e coesão linear);

Falha na fabricação: uma vez que o projeto tenha sido adequadamente abordado, a fase de fabricação do equipamento pode provocar falhas quando os processos utilizados na confecção dos componentes, como usinagem (tensões em entalhes), tratamento térmico (uso de temperaturas inadequadas

para têmpera e revenimento), soldagem (concentração de tensão na região da solda) e conformação a frio (altas tensões residuais);

Erros de montagem ou de instalação: erros de montagem ou instalação são eventos frequentes, muitas vezes ligados a erros humanos. É comum encontrar erros humanos em montagens de rolamentos (impactos, sujeiras), no ajuste de peças móveis, em parafusos frouxos, mancais e eixos montados desalinhados;

Falha na utilização ou manutenção inadequada: por último, o uso incorreto do equipamento em condições severas de velocidade, carga, temperatura e ataque químico, ou sem monitoração, inspeção e manutenção por falta de instrução do fabricante ou de treinamento do cliente na utilização.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS

As falhas de uma maneira geral, podem ser classificadas, segundo Siqueira (2009), sob vários aspectos:

Quanto à origem: as falhas podem ter origem primária, quando decorrem de deficiências próprias de um componente, provenientes do desgaste, do projeto, dentro dos limites normais de operação; origem secundária, quando se derivam de operação fora dos limites normais, tais como descarga atmosférica, sobrecargas; ou falhas de comando que se originam de ordens errôneas do operador ou uso inadequado pelo usuário, ocasionando cargas excessivas;

Quanto à extensão: de acordo com sua extensão as falhas podem ser parciais, quando resultam do desvio de alguma característica funcional do item, além dos limites especificados, mas sem perda total de sua funcionalidade; ou completas, quando provocam a perda total da função requerida do item;

Quanto à velocidade: as falhas podem ser graduais, devido a desgaste, quando podem ser percebidas ou previstas por uma inspeção antes que ocorram, ou falhas repentinas, em caso contrário;

Quanto à manifestação: pode ocorrer por degradação, quando ela ocorre simultaneamente de forma gradual ou parcial, podendo tornar-se completa ao longo do tempo, ao contrário das falhas catastróficas, que ocorrem simultaneamente de forma repentina e completa. E existem ainda as falhas intermitentes, que persiste por um tempo limitado, após o qual o item aparentemente se recupera sem qualquer ação externa;

Quanto à idade: podem ser prematuras, quando ocorrem durante o período inicial de vida do equipamento; ou aleatórias, quando ocorrem de maneira imprevisível, durante todo o período de vida útil do equipamento e ainda as falhas podem ser progressivas, ocorrem durante o período de vida útil como resultado de desgaste, deterioração e envelhecimento do item. A Figura 1 ilustra a classificação dos diversos tipos de falhas.

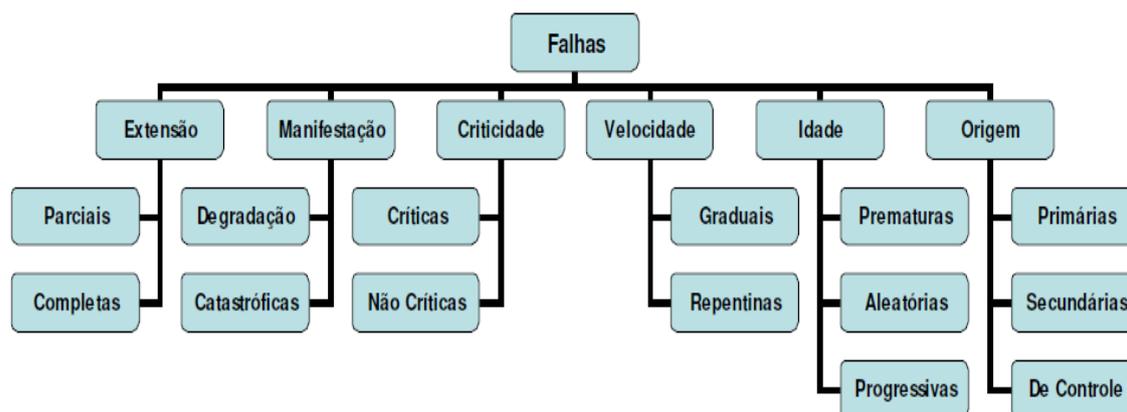


FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS

FONTE: ADAPTADO DE SIQUEIRA (2009)

A classificação da falha e o entendimento do modo de falha permitem uma análise mais detalhada do evento ocorrido com o equipamento. Alguns equipamentos, segundo Afonso (2006), em sua constituição são definidos com alguns componentes nos quais é estabelecido o fim de vida útil, ou seja, após um determinado período de uso o mesmo deve ser substituído, caso não seja o componente pode falhar a qualquer momento.

Segundo Moubray (2001), e Lucatelli e Ojeda (2001), o estudo realizado por Nowlan e Heap, em 1978, reconhece seis padrões de modos de falhas, os quais são apresentados seguindo um perfil de uma curva, na sua forma se assemelha ao formato de uma banheira, observado esta forma ao se analisar a taxa de falhas em função do tempo dos componentes.

Segundo Lafraia (2001), a curva da banheira apresenta, de maneira geral, as fases de vida de um componente, ou seja, uma das maneiras de obter os modos de falhas.

2.4 CONFIABILIDADE E A NATUREZA DAS FALHAS

A confiabilidade é uma característica historicamente buscada por projetistas e construtores de todos os tipos de sistemas. Popularmente, conceitos como confiança no equipamento, durabilidade, presteza em operar sem falhas são relacionados à ideia de confiabilidade, segundo Lafraia (2001).

Numa analogia à confiabilidade, o equipamento que não desempenhar a sua função coloca em questão a sua própria existência, em virtude da sua falta de confiabilidade. A existência de um equipamento é contida na realização de uma operação para a qual foi projetado, e que tem o propósito de ser bem sucedida, com ausência de falhas. Assim, a confiabilidade de um equipamento pode ser traduzida em uma operação bem sucedida e com ausência de falhas (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Segundo Moubray (2001) e Lafraia (2001), a confiabilidade de um item e ou equipamento corresponde à probabilidade em desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado tempo e sob as condições ambientais predeterminadas.

Na realização do propósito específico do equipamento, existe uma interação entre homem e sistema, interação esta traduzida como processo, no qual não estiver em perfeita harmonia causará uma falha no equipamento.

Segundo Iresson, Coombs e Moss (1996), processo pode ser definido como sendo uma sucessão de passos ou ações que levam a contribuições, soma de valor e satisfação do cliente, e alcança uma produção específica.

O equipamento que não apresenta falhas durante a realização de seu propósito específico, por um determinado tempo e sob as condições ambientais predeterminadas, permite afirmar que possui um alto grau de confiança, confiança esta vinculada ao projeto correto, operação adequada e reparo bem sucedido do equipamento.

A harmonia entre os fatores físicos, humanos e sistêmicos que interagem com o equipamento pode vir a sofrer alterações provenientes da solicitação ao equipamento, que leva determinados componentes a não resistirem aos esforços, ou aumentar significativamente o desgaste e, assim, vir a falhar durante a operação. Segundo Lafraia (2001), as falhas ocorrem quando as cargas atuantes num equipamento ou estrutura excedem a resistência dos materiais com os quais o equipamento foi projetado.

Segundo Moraes (2004), o aumento das cargas em um equipamento pode ser condicionado a fatores físicos, humanos e sistêmicos com o qual interage durante a realização do produto no processo produtivo no ambiente fabril. Pode-se observar, na Figura 2, a interação nas curvas de resistência (R) e esforço (E). A projeção das curvas no ponto "A" identifica um projeto adequado, existindo uma margem de segurança entre resistência e esforço ao equipamento ou componente, impossibilitando falhas em condições normais de operação. Os pontos "B, C e D" apresentam falhas em determinadas situações, sendo estas respectivamente associadas à falhas na concepção do projeto, na operação e no reparo do equipamento.

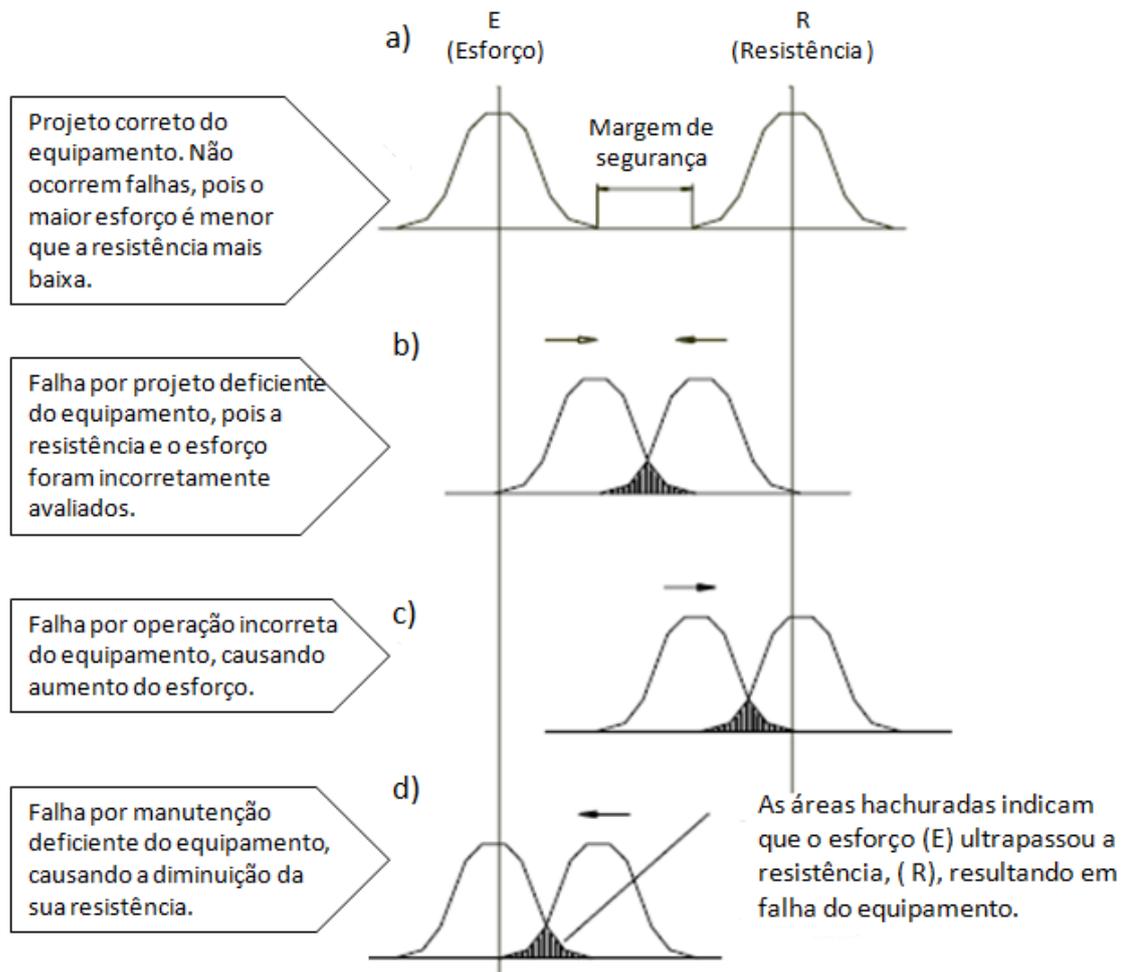


FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE ESFORÇO E RESISTÊNCIA DO EQUIPAMENTO

FONTE: MORAES(2004)

Segundo Afonso (2006), os componentes, ao serem projetados, são constituídos por diversos fatores: dimensão, material, limite de resistência, limite de vida útil, ambiente de trabalho, que caracterizam a sua função dentro do equipamento, ou seja, num projeto adequado, a distorção e a quebra são evitáveis pelo dimensionamento e operação correta, mas o desgaste e a obsolescência são inevitáveis. Tais fatores só podem ser retardados por manutenção apropriada (CASTRO e MEGGIOLATO, 2011).

Segundo Wuttke (2008), a análise do comportamento da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo pode ser representada por uma curva que

possui a forma de uma banheira, conhecida, portanto, como curva da banheira, apresentada na Figura 3.

Segundo Moraes (2004), Moreira (2010), Souza e Álvares (2008) e Lafraia (2001), de acordo com os conceitos da Engenharia de Confiabilidade, as frequências de ocorrência das falhas em um equipamento podem ser classificadas em decrescente, constante ou aleatória e crescente, e estão em geral associadas ao estágio do ciclo de vida do equipamento, explicado pelo formato da Figura 3.

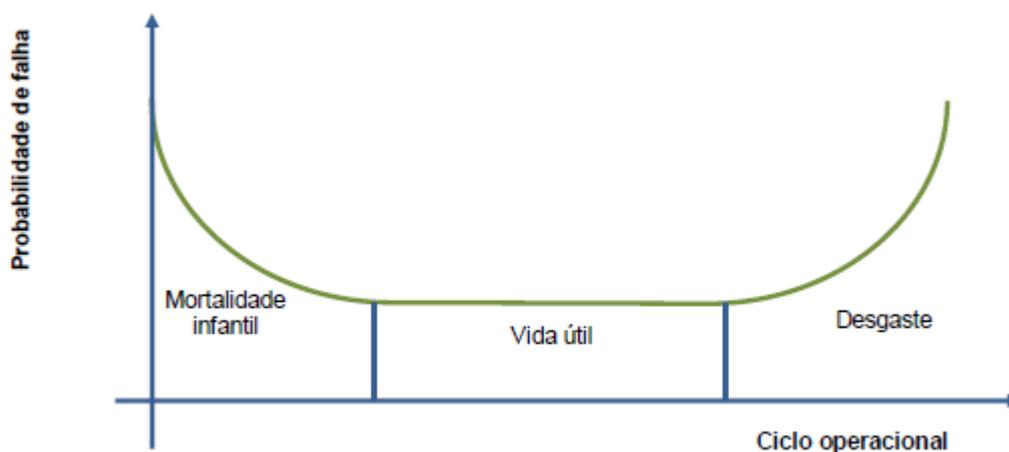


FIGURA 3 – CURVA DA BANHEIRA

FONTE: LAFRAIA (2001)

Segundo Lafraia (2001), Haviaras (2005), Wuttke (2008), Zaioms (2003), Lucatelli e Ojeda (2001), na curva da banheira, apresentada na Figura 3, pode-se perceber que um componente apresenta três períodos da vida característicos, a saber: mortalidade infantil (ou falha precoce), período de vida útil (ou falha aleatória) e período de desgaste (ou falha por desgaste).

O relativamente curto intervalo de tempo indicado por “Mortalidade Infantil” na Figura 3, é uma região de altas taxas de falha, que decrescem a partir de $t = 0$. Esta região é conhecida como falha precoce ou ainda em analogia com seres

humanos, de mortalidade infantil. Sob este parâmetro de comparação, as mortes neste período, são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas e, portanto a taxa de mortalidade decresce com o tempo. Normalmente, as falhas precoces ou prematuras estão relacionadas com problemas de fabricação, de montagem ou mesmo com o material empregado na fabricação do componente. Muitas vezes, a falha precoce é contornada por meio da especificação de um período de tempo durante o qual o equipamento realiza um pré-teste.

Durante este tempo o carregamento e utilização do produto são controlados de tal maneira que problemas são detectados e componentes são reparados. Estes problemas de falha precoce são não usuais, ou seja, ocorrem esporadicamente, muitas vezes por alguma razão não específica. No caso de montagem, é bastante comum a falha estar relacionada a algum erro humano do montador.

O intervalo de tempo intermediário da curva da banheira, indicado por “Vida Útil” na Figura 3, é caracterizado por constantes e menores taxas de falhas. É o período de vida útil, de operação do produto, e as falhas que ocorrem nesta fase são denominadas falhas aleatórias, normalmente originárias de carregamento inevitáveis e inesperados, sendo pouco frequentes as falhas devido a defeitos inerentes ao equipamento em si.

Fazendo-se uma analogia com a população humana, as mortes nesta parte da curva da banheira são decorrentes de acidentes ou doenças infecciosas. Nos equipamentos podem-se citar como exemplos de causa de falha aleatória os impactos mecânicos, flutuações de temperatura e de umidade.

No período de desgaste, indicado por desgaste Figura 3, observa-se que a taxa de falha é crescente, cuja origem é o próprio desgaste do equipamento, na fase final de sua vida útil. Nesta fase, as falhas tendem a ter defeitos cumulativos tais como desgaste por atrito, trincas de fadiga, corrosão, dentre outros. O aumento muito rápido da taxa de falha, normalmente fundamenta o critério de

quando peças devem ser substituídas e também determina a vida útil do produto ou sistema.

A curva da banheira pode ser considerada genérica, pois nem todos os tipos de componentes ou sistemas apresentam sempre todos os períodos, uma vez que cada um deles apresenta uma curva de falha característica.

Para equipamentos eletroeletrônicos, por exemplo, a curva de falha apresenta tipicamente as regiões “Mortalidade Infantil” e “Vida Útil”, ou seja, há a presença da falha precoce e durante a vida operacional os mesmos apresentam falhas aleatórias, sem as características de desgaste, segundo Lafraia (2001). A Figura 4 representa o comportamento da taxa de falhas dos componentes eletrônicos ao longo do tempo.

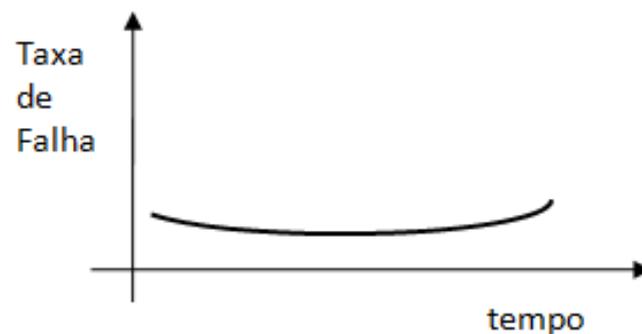


FIGURA 4 - CURVA DE TAXA DE FALHA X TEMPO PARA COMPONENTES ELETRÔNICOS
FONTE: LAFRAIA(2001)

Já para componentes mecânicos, pode-se afirmar que a curva da variação temporal da taxa de falha apresenta as regiões “Mortalidade Infantil” e “Desgaste”, nas quais a falha precoce está associada a problemas de fabricação, montagem ou de materiais, que induzem a falha no início da vida operacional. Durante o uso, os equipamentos mecânicos falham, normalmente, por desgaste, corrosão ou fadiga, que são mecanismos de falha nos quais o dano é cumulativo ao longo do tempo de operação, até que atinja um valor crítico, precipitando a falha. Deste modo, a probabilidade de falha do equipamento é crescente ao longo do tempo e, associada a esta, tem-se um

aumento da taxa de falha representando um envelhecimento ou desgaste do produto. Possíveis causas de falhas para cada fase da curva da banheira podem ser vistas na Tabela 1.

TABELA 1 – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA CURVA DA BANHEIRA
 FONTE – LAFRAIA(2001)

Falhas Prematuras	Falhas Casuais	Falhas por Desgaste
Processos da fabricação deficientes	Interferência indevida tensão /resistência	Envelhecimento
Controle de qualidade deficiente	Fator de segurança insuficiente	Desgaste/abrasão
Mão-de-obra desqualificada	Cargas aleatórias maiores que as esperadas	Degradação de resistência
Amaciamento insuficiente	Resistência menor que a esperada	Fadiga
Pré-teste insuficiente	Defeito abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios	Fluência
Debugging insuficiente	Erros humanos durante uso	Corrosão
Componentes não especificados	Abusos	Manutenção insuficiente ou deficiente
Componentes não testados	Falhas não detectáveis pelo melhor programa de manutenção preventiva	
Componentes que falharam devido estocagem/transporte indevido	Falhas não detectáveis durante o melhor <i>debugging</i>	
Sobrecarga no primeiro teste	Causas inexplicáveis	
Contaminação	Fenômenos naturais imprevisíveis	
Erro humano		
Instalação imprópria		

Baseado no conceito de confiabilidade, a determinação da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo, permite a identificação dos componentes que tem a maior probabilidade de falhar.

O intervalo de intervenção dos equipamentos, para tarefas preventivas, é baseado na identificação da taxa de falhas, segundo Lafraia (2001), e é a base para o plano de manutenção preventiva, buscando a otimização da disponibilidade dos equipamentos ao se planejar as intervenções. Contudo isto é correto para certos equipamentos simples e para alguns equipamentos complexos que apresentam modos de falha dominantes.

Entretanto, a complexidade crescente dos equipamentos tem levado á considerável mudança na natureza das falhas (LAFRAIA, 2001). Segundo Zaions (2003), os equipamentos podem apresentar padrões de falhas de acordo com a taxa de falha em relação à idade operacional do equipamento. Estudos realizados no âmbito da aviação civil, analisando a taxa de falhas de diversos componentes, evidenciaram diferentes comportamentos dos componentes em seu estágio de falha, apresentando padrões de falhas definidos que vão além do padrão definido pela curva da banheira (SOUZA e ALVARES, 2008). Baseado nestes estudos, Lucateli e Ojeda (2001) apresentam os diferentes padrões para o modo de falha de componentes de um sistema conhecido, que se resumem a seis padrões de falhas, associados às curvas A, B, C, D, E e F. A Figura 5 mostra as curvas de falha para os padrões A, B e C.

Segundo Lafraia (2001), os estudos feitos em aviões civis mostram que 4% dos itens comportam-se de acordo com o modo de falha da curva "A" da Figura 5, 2% com o modo de falha da curva "B", 5% com o modo de falha da curva "C", as quais de acordo com Souza (2008), apenas os três modos de falhas acima (A, B e C), apresentados beneficiam-se de um limite da idade de operação. Para os demais itens do estudo o comportamento é de 7% com o modo de falha da curva "D", 14% com o modo de falha da curva "E", e 68% para o modo de falha da curva "F", que serão apresentados na sequência.

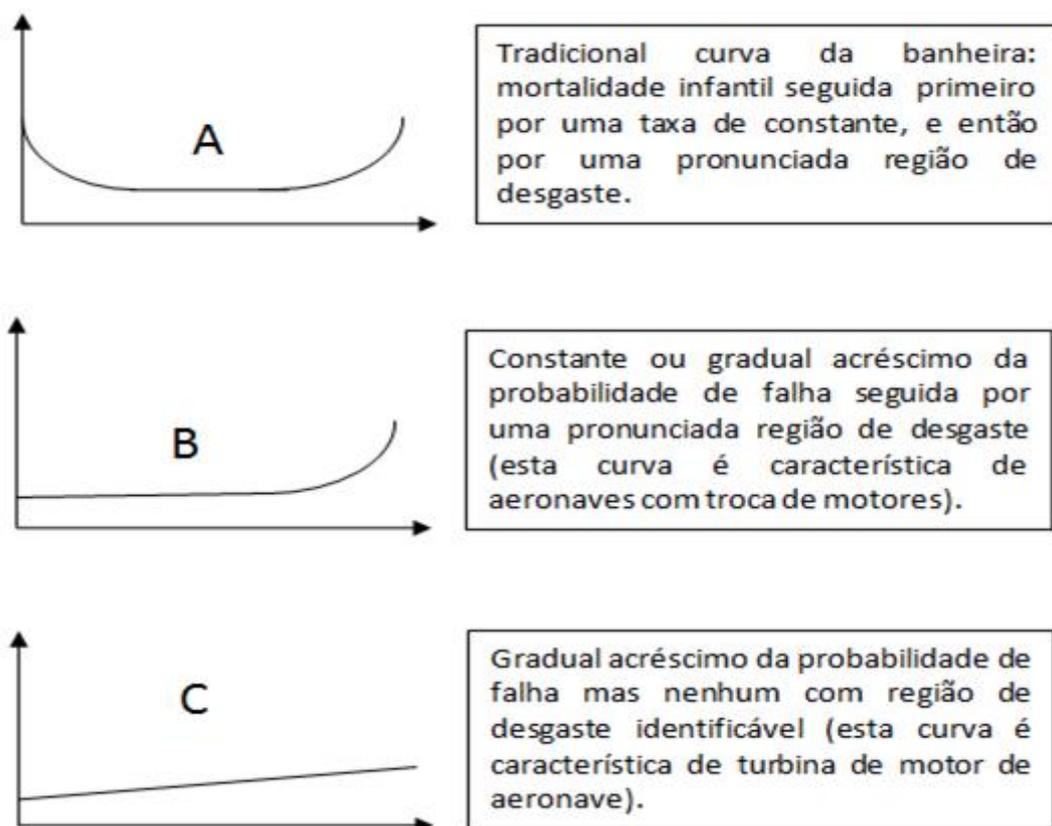


FIGURA 5: CURVA TAXA DE FALHA X TEMPO DE OPERAÇÃO “A, B E C”

FONTE: ADAPTADO DE LAFRAIA (2001)

O padrão “A” é a bem conhecida curva da banheira, assim designada ao seu formato característico. Nesse padrão, há uma elevada ocorrência de falhas no início de operação do equipamento (mortalidade infantil), seguido de uma frequência de falhas constante e, posteriormente, de um aumento na frequência, devido à degradação ou desgaste do equipamento. Esse padrão descreve falhas relacionadas à montagem do equipamento, bem como com a idade dos componentes.

O padrão “B” apresenta probabilidade constante de falha, seguida de uma zona de acentuado desgaste no fim da sua vida útil. Esse padrão descreve falhas relacionadas com a idade dos componentes. Componentes em equipamentos podem se comportar dessa maneira, principalmente, aqueles que deterioram naturalmente com o tempo, que estão sujeitos a esforços cíclicos e repetitivos

ou que entram em contato direto com a matéria prima ou produto final. A partir do gráfico da distribuição de frequência de falhas (Figura 6 - a) observa-se que com exceção de poucas falhas prematuras, a maioria dos componentes falharam em torno de um ponto médio seguindo uma distribuição normal. Assim conforme Lafraia (2001), para esse tipo de modo de falha o MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) tem pouca ou nenhuma utilidade no estabelecimento do prazo para manutenção programada. O período ideal é o da vida, ou seja, aquele em que a taxa de falhas (Figura 6 - b) começa a aumentar rapidamente.

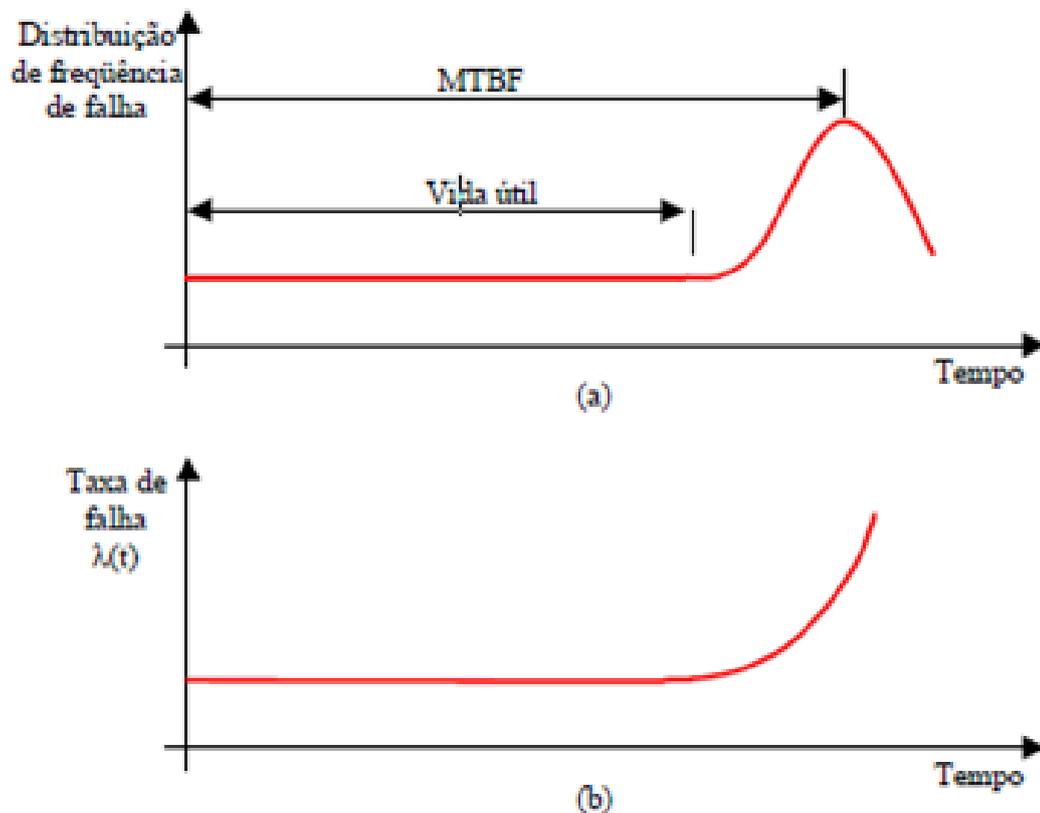


FIGURA 6: CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE FALHA- FALHA TIPO “B”

FONTE: ADAPTADO DE LAFRAIA (2001)

O padrão “C” apresenta um aumento lento e gradual da taxa da falha, porém sem uma zona definida de desgaste. Uma possível causa para a ocorrência de padrões de falha do tipo “C” é a fadiga.

Os padrões de falha D, E e F são apresentados na Figura 7. O padrão “D” mostra baixa taxa de falha quando o item é novo e sofre posteriormente um rápido aumento da taxa de falha para um nível constante.

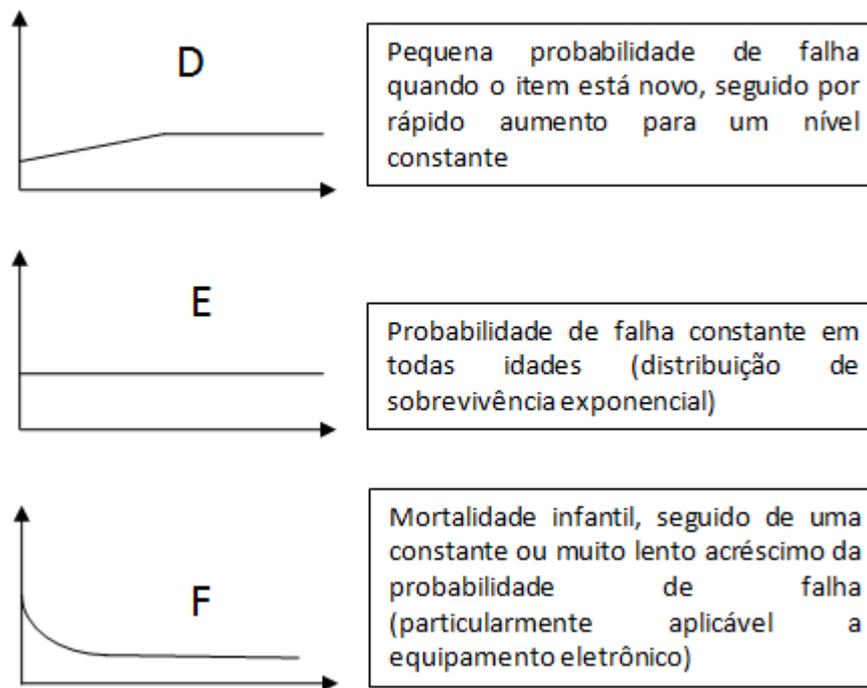


FIGURA 7: CURVA TAXA DE FALHA X TEMPO DE OPERAÇÃO D, E, F

FONTE: ADAPTADO DE LAFRAIA (2001)

O padrão “E” mostra baixa taxa de falha constante em qualquer período. Nesse padrão, a natureza das falhas é aleatória. Lafraia (2001) menciona que o MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) não deve ser utilizado nesse padrão como fim de vida útil, pois em nenhum período se verifica o aumento da taxa de falha.

A forma da curva do padrão “F” de falhas indica que uma maior probabilidade de falhas ocorre quando o componente é novo ou imediatamente após a restauração. O padrão “F” inicia com uma alta mortalidade infantil, que eventualmente cai para uma taxa de falha constante. Pode apresentar também um aumento lento e gradual em vez de probabilidade constante.

Segundo Lafraia (2001), pode-se concluir, pela análise dos parágrafos anteriores, que os padrões de falhas A, B, C, podem estar geralmente associados à fadiga e corrosão. Os padrões A e B são típicos de componentes ou peças de máquinas individuais e simples. Já os padrões D, E e F (89%), são típicos de itens mais complexos, não podendo beneficiar-se de um limite na idade de operação.

Segundo Moubray (2001), a associação da falha à idade do equipamento é uma prática inconsistente devido aos fatores:

i) complexidade dos equipamentos; ii) tamanho da amostra e evolução; e iii) histórico mal relatado da falha.

Complexidade dos equipamentos: muitos empreendimentos industriais consistem de centenas, senão milhares de itens diferentes. Eles são feitos de dezenas de componentes diferentes, que entre eles exibem todos os aspectos intermediários e extremos de confiabilidade de comportamento. Esta combinação de complexidade e diversidade significa que simplesmente não é possível desenvolver uma descrição analítica completa das características de confiabilidade de um empreendimento inteiro – ou mesmo de algum item principal dentro do empreendimento.

Mesmo no nível de falhas funcionais individuais, uma análise completa não é fácil. Isso porque muitas falhas funcionais são causadas não por uma, duas ou três, mas por duas ou três dúzias de modos de falhas.

Tamanho da amostra e evolução: grandes processos industriais normalmente possuem somente um ou dois equipamentos de cada tipo. Eles tendem a ser comprados em operação em série e não simultaneamente. Isso significa que os tamanhos das amostras tendem a ser bem pequenos para que os procedimentos estatísticos tenham validade.

Histórico mal relatado da falha: o problema de analisar os dados de falha é mais complicado pelas diferenças na política de relatar de uma organização para outra. Uma área de confusão é a distinção entre falhas funcionais e

potenciais. A um padrão de falha não pode ser associado simplesmente um histórico, pois este não será capaz de relatar uma realidade segura sobre as falhas do equipamento. Dentro de um padrão que se possa associar a uma das curvas de confiabilidade.

A taxa de falha é utilizada adequadamente para um equipamento que tenha poucos componentes. Para equipamentos muito complexo e sendo este uma linha de produção, as falhas são muito aleatórias e cada equipamento pode ter uma tempo médio entre falhas muito alto e para a linha de produção pode ser muito baixo pela alta quantidade de componentes que compõem a linha de produção.

2.5 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE FALHAS

Serão apresentadas as principais ferramentas utilizadas na análise de falhas e também suas principais características na análise de falhas.

2.5.1 DMAIC - DEFINIR, MEDIR, ANALISAR, MELHORAR E CONTROLAR

Segundo Aguiar (2002), o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Action*) para controle e melhoria de processos ou sistemas, criado por Edward Deming, estatístico e consultor norte-americano, é um método gerencial de tomada de decisões utilizado para garantir o alcance das metas necessárias à sobrevivência das empresas, podendo ser adaptado a outras áreas como sistemática para resolução de problemas. Segundo Campos (2002), o método PDCA consta de quatro etapas bem definidas, conforme mostrado na Figura 8.

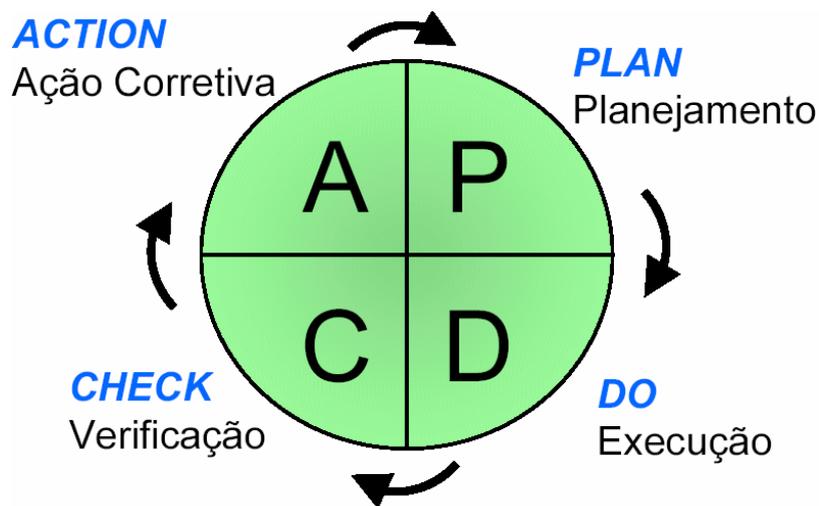


FIGURA 8 – CICLO PDCA DE CONTROLE DE PROCESSOS

FONTE: ADAPTADO DE CAMPOS (2002)

As etapas do PDCA são descritas a seguir:

Primeira etapa - Planejar (P): No planejamento do ciclo, são estabelecidos as metas e os métodos (planos de ação) que serão usados para alcançá-las.

Segunda etapa - Executar (D): Nesta fase tudo que foi planejado anteriormente é colocado em prática. Para execução dos planos de ação, é de suma importância a educação, o treinamento, a motivação e o comprometimento das pessoas envolvidas no processo. Em seguida, os dados são coletados para análise, tratamento e utilização na etapa seguinte para verificação do desempenho do processo.

Terceira etapa - Verificar (C): A partir dos dados coletados na etapa de execução os resultados obtidos são avaliados e comparados com as metas.

Quarta etapa - Atuar (A): Nesta etapa, a ação a ser realizada depende dos resultados obtidos, avaliados na etapa anterior. Existem duas formas de atuação possíveis:

a) Meta atingida: caso a meta tenha sido alcançada, é adotado como padrão o plano proposto;

b) Meta não atingida: caso a meta não tenha sido alcançada, inicia-se um novo giro no PDCA com o objetivo de se agir sobre as causas do não cumprimento da meta e de se encontrar meios que levem o processo a obter bons resultados.

O ciclo PDCA, não aborda claramente fases como coleta de dados qual seria a melhor forma de obter os dados, não coloca em evidência a tratativa na resolução do problema a partir destas oportunidades de melhoria surge uma nova ferramenta chamada de MASP (Método de Análise e Solução de Problemas).

O MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) consiste em uma sequência de etapas que levam a um planejamento participativo para a melhoria da qualidade de um produto ou serviço de determinado setor em uma organização. De acordo com Paris (2003), a ideia básica do MASP é pensar logicamente e usar evidências (dados) que apoiem a lógica; entender a relação entre as causas e os resultados; encontrar quais as causas que, no processo, são relevantes; eliminar as causas relevantes no processo; melhorar o resultado.

As várias técnicas usadas para cumprir cada etapa do MASP ajudam a desenvolver um ambiente de trabalho mais saudável, na medida em que as ideias e opiniões de todos os colaboradores são respeitadas e levadas em consideração (PARIS, 2003). Pinto e Xavier (2001) apresentam a utilização da ferramenta PDCA junto com o MASP como ferramenta para análise de falhas, entendendo o MASP como uma evolução do PDCA.

Segundo Barreto (2010), muitos “modelos de melhoria” têm sido aplicados a processos ao longo dos anos desde que o movimento da qualidade começou, como um todo, mesmo na execução de serviços. A maioria deles se baseia nos passos introduzidos por W. Edwards Deming (PDCA), que descreve a lógica

básica de melhoria de processos baseados em dados. Para Alves e Reis (2007), o método DMAIC é uma evolução do PDCA. Foi introduzido junto com a filosofia do *Six Sigma* na obtenção da melhoria da qualidade dos produtos. A ferramenta DMAIC, central na abordagem do “*Six Sigma*”, é utilizada como gestora da aplicação da metodologia, esta que segundo Barreto (2010), descreve como sendo um método altamente técnico utilizado por engenheiros e estatísticos para dar sintonia fina a produtos e processos, devido à sua exigência de 3,4 defeitos por milhão de itens produzidos. De acordo Rodrigues (2006apud BARRETO, 2010), a metodologia DMAIC: D (*Define* – Definir); M (*Measure* – Medir); (*Analyse* – Analisar); I (*Improve* – Melhorar) e C (*Control* – Controlar) é dividida em 5 fases, como ilustrado na Tabela 2.

TABELA2 - FASES DO DMAIC

FASES		DMAIC
Iniciação	D	Definir os processos críticos e os objetivos diante do negócio e das expectativas e necessidades dos clientes.
Planejamento	M	Medir o desempenho do processo e identificar os problemas e intensidades dos mesmos.
Execução	A	Analisar o desempenho e as causas dos problemas.
Finalização	I	Melhorar o processo eliminando os problemas, reduzindo os custos e agregando valores para o cliente.
Controle	C	Controlar o desempenho do processo.

O método DMAIC apoia-se em outras metodologias de qualidade, utilizando o Diagrama de Causa e Efeito, também conhecido como diagrama de espinha de peixe ou diagrama de Ishikawa, que consiste em um método que contribui para pesquisar raízes de problemas a partir de questões como: o que, onde, como e por que. Estas perguntas contribuem para sistematizar o problema e, considerando que muitas vezes a resposta fica explícita no diagrama (SLACK, CHAMBERSe JOHNSTON, 2002).

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2001), o método DMAIC é uma abordagem provada de resolver problemas que inclui um conjunto de ferramentas e um guia ou sequência para se utilizar estas ferramentas. É uma abordagem dirigida por dados para se melhorar o processo em uma maneira lógica e metódica. Suas cinco fases são designadas para conduzir um time através de um projeto de melhoria do processo, do início ao fim.

Al-Mishari e Suliman (2008) utilizaram o *Six Sigma* (DMAIC) integrado com o FMEA, RCM e TPM na identificação da causa raiz de uma falha em uma bomba de refrigeração de um sistema de refinamento de óleo. Descrevem que o DMAIC, contribui como uma excelente ferramenta para a obtenção dos dados e ordenação da execução da análise, podendo ser utilizado junto com outras ferramentas de gerenciamento na obtenção de um objetivo claramente definido.

Vantagens - DMAIC

O DMAIC consiste no conceito de estabelecer uma sistemática de controle em forma de um ciclo em todas as etapas de uma análise, projeto ou uma melhoria em sistema.

O DMAIC permite estabelecer as fases em cada passo na resolução de problemas.

As orientações da ferramenta DMAIC identifica os pontos a serem tratados como por exemplo coleta de dados como coletar e o que coletar.

2.5.2 RCA - ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DA FALHA

Segundo Sharma e Sharma (2010), RCA é uma terminologia encontrada na literatura de confiabilidade para evitar a ocorrência de futuras falhas, definindo as causas raízes dos eventos ocorridos.

Já segundo Rooney e Vanden Heuvel (2004), o RCA é uma ferramenta projetada para o uso investigativo na identificação da causa raiz de um evento, o qual pode ser com segurança, saúde, meio ambiente, qualidade e impactos na produção.

A investigação do evento utilizando a ferramenta RCA busca identificar não somente como o evento ocorreu, mais também porque ele aconteceu (ROONEY e VANDEN HEUVEL, 2004).

Márquez, Bona e Alija (2009), utiliza o RCA na determinação do evento responsável pela ocorrência de uma falha catastrófica em um sistema de exaustão em uma indústria petroquímica. Baseado no método RCA reconstitui a sequência do evento identificando o fator físico que iniciou a falha, baseado nas evidências encontradas no evento e nas informações levantadas nos históricos das intervenções.

De acordo com Fernandes (2010), Mobley (1999) e Ireson, Coombs e Moss (1995), RCA é composta de uma sequência de passos que guia o investigador do processo, no isolamento dos fatos que caracterizam um evento ou falha.

Quando o investigador for capaz de determinar o porquê de um evento e sustentar por meio de evidências a causa determinada, ele será capaz de especificar ações corretivas para prevenir futuras ocorrências (FERNANDES, 2010).

A sequência de passos na elaboração do RCA é abordada de diferentes maneiras de acordo com o autor. Será apresentado o resumo de quatro métodos na utilização da ferramenta de RCA, aos quais serão analisados os passos aos quais tem maior impacto na resolução da falha.

a) Primeiro Método

Método proposto por Rooney e Vanden Heuvel (2004), composto de quatro passos, que envolve o seguinte:

Primeiro passo: Coleta de dados

O primeiro passo na análise é coletar os dados. Sem informação completa e uma compreensão do evento, não podem ser identificadas os fatores causais e causas raiz associadas com o evento. A maior partedo tempo da análise é empenhada analisando o evento e juntando os dados.

Segundo passo: Quadro de fator causal

O quadro do fator causal provê de uma estrutura para que os investigadores possam organizar e analisar as informações coletadas durante a investigação e identificar aberturas e deficiências no conhecimento durante o progresso da investigação. O quadro de fator causal simplesmente é um diagrama de sucessão com testes de lógica que descrevem os eventos que conduzem até uma ocorrência, mais as condições que cercam estes eventos.

Terceiro passo: Identificação da causa raiz

Finalmente, os fatores causais foram identificados, os investigadores começam a identificar a causa de raiz. Este passo envolve o uso de um diagrama de decisão chamado Mapa de Causa Raiz e identificar a razão subjacente ou razões para cada fator causal. O mapa estrutura o processo de raciocínio dos investigadores, ajudando a responder perguntas sobre por que fatores causais particulares existem ou aconteceram. A identificação de causas raiz ajuda o investigador a determinar as razões pelas quais o evento aconteceu; assim, podem ser focalizados os problemas que cercam a ocorrência.

Quarto passo: Geração de recomendações e implementação

O próximo passo é a geração de recomendações. Identificado o fator causal físico da causa raiz, são então geradas as recomendações responsáveis por prevenir o seu retorno. O analista de causa raiz não é frequentemente responsável pela implementação de recomendações geradas

pela análise. Porém, se as recomendações não são implementadas, o esforço gasto executando a análise está perdido. Organizações precisam assegurar que as recomendações identificadas sejam concluídas.

b) Segundo Método

O RCA proposto por Ransom (2007) relata a utilização em uma aplicação de um caso prático. Apresenta um fluxo do RCA utilizado (Figura 9), no qual faz um agrupamento de forma simplificada do RCA em três etapas:

Primeira Etapa: Coleta de dados:

Coletar todas as informações sobre o evento, no momento em que ele ocorreu. Definir o evento de topo identificando a falha. Formar um time multidisciplinar definir claramente qual o problema que se quer investigar.

Segunda Etapa: Análise dos dados

Analisar as informações coletadas na primeira etapa, correlacionando-as com o evento. Estruturar as observações levantadas com os modos de falhas identificados e determinação das principais causas do evento.

Terceira Etapa – Solução-Identificação da causa raiz:

Após a identificação da causa raiz da falha, propor as ações preventivas ou corretivas para a eliminação da falha.

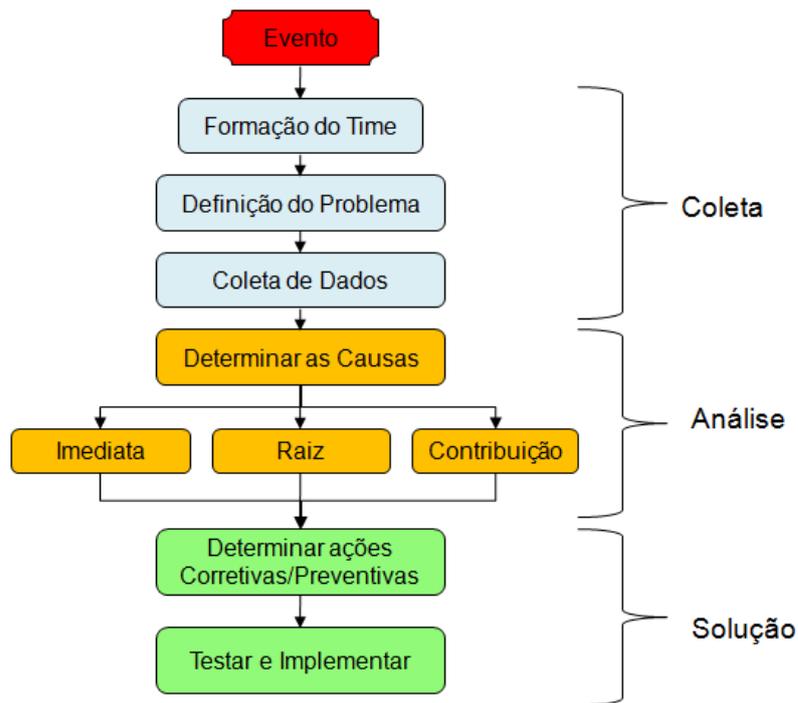


FIGURA9 - ETAPAS PARA A RCA

FONTE- RANSOM (2007)

Ransom (2007) relata em seu trabalho a análise de causa raiz da falha de um reator, na qual descreve não só a investigação, mas o fluxo da aplicação da metodologia RCA utilizada na resolução da falha.

Segundo Ransom (2007), os fatores que envolvem as falhas não são somente físicos e podem estar relacionados a fatores humanos e sistêmicos, por exemplo: na falta de treinamento na execução de uma operação e na falta de procedimento de operação de um equipamento.

O autor relata que o RCA é um processo para identificar a verdadeira causa raiz de uma falha em particular, ao validar as hipóteses, identificando o fator causador da falha na análise para fixar um curso para uma ação de correção ou prevenção. O autor não define claramente o processo utilizado para a identificação da causa raiz da falha.

c) Terceiro Método

O método de utilização do RCA, proposto por Balasubramanian (2009) e Mobley (1999), descreve os passos abordados utilizando o RCA, conforme apresentado:

Primeiro passo: Definição do problema

Inicialmente, deve ser relatado o problema. Onde ocorreu, em que hora, em que local e como ocorreu.

Segundo passo: Coletar os dados

O método RCA determina que, após a ocorrência do evento, o local deve ser preservado para que se possam coletar todas as evidências da falha. Os dados de máquinas como velocidade, temperatura, pressão devem ser coletados para ser analisados e comparados com o padrão de operação.

Terceiro passo: Identificando a causa raiz da falha

Com todas as informações e evidências, utiliza-se o fluxo idealizado por Mobley (1999), Figura 10, na condução do RCA, o qual relata parte do passo anterior. O fluxo não detalha o desenvolvimento da identificação da causa raiz da falha; sua abordagem é prover um confronto entre os tópicos abordados no fluxo com as evidências e os modos de falha do equipamento, assim colocando em *check* os pontos do fluxo, na intenção de identificar falhas.

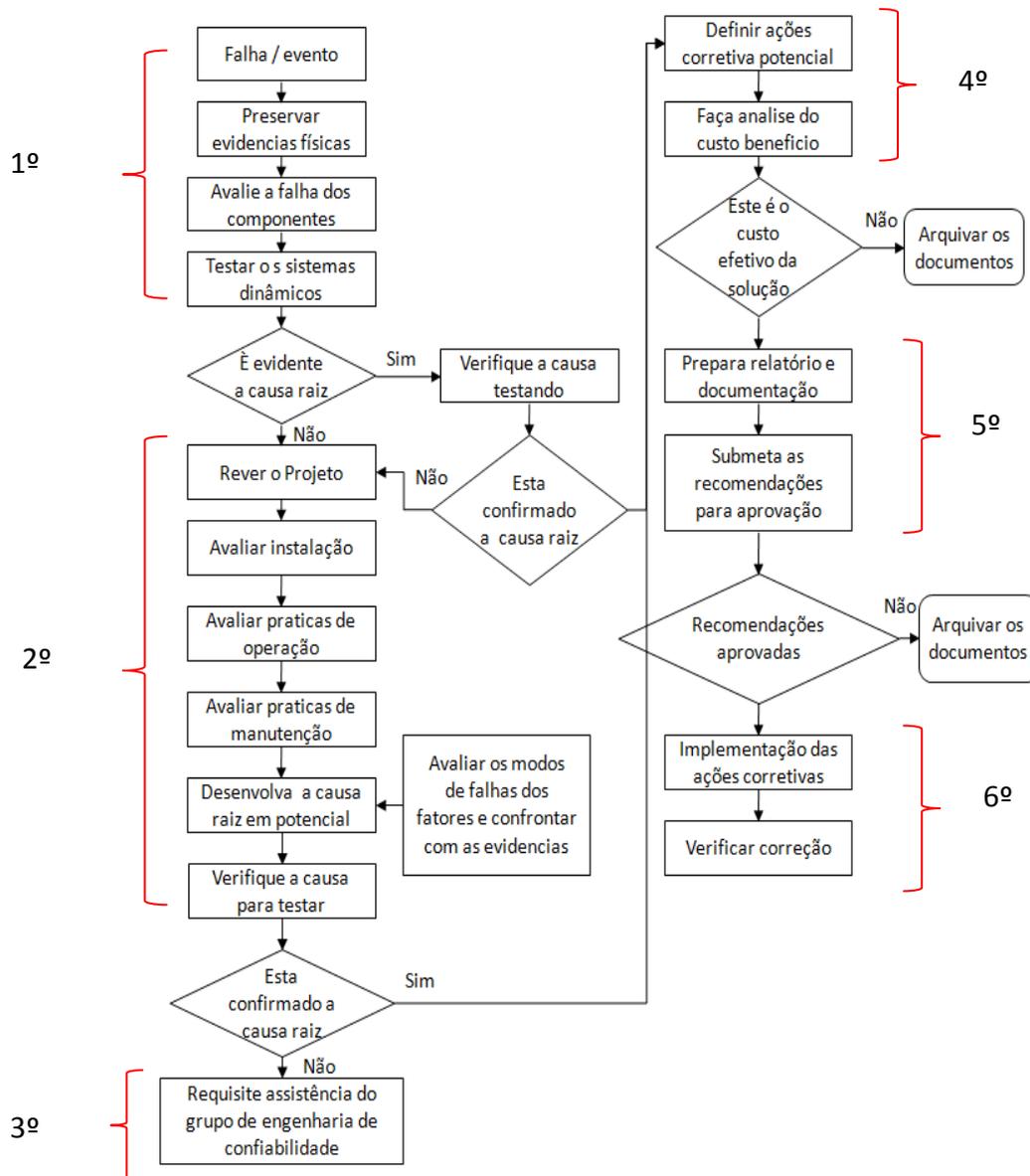


FIGURA 10 - DIAGRAMA PARA INVESTIGAÇÃO DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS

FONTE: ADAPTADO DE MOBLEY (1999)

Quarto passo: Definindo as ações para o fator que resolverá o incidente

Baseado na árvore dos porquês, os fatores físicos, humanos e sistêmicos são identificados; a esses fatores identificados, devem ser propostas ações que os elimine.

Quinto passo: Análise do custo x benefício das ações

Analisar o custo das ações para sua implementação e seu benefício.

Sexto passo: Verificação das ações corretivas

Verificar se as ações corretivas propostas foram implementadas e se estão assegurando que a falha não ocorra mais.

d) Quarto método

O método de utilização do RCA, proposto por Downing (2004), apresenta cinco passos para o RCA, e também apresenta a forma de utilizar a árvore dos porquês na identificação da causa raiz:

Primeiro passo: Montar time multidisciplinar

O primeiro elemento da RCA é para montar uma equipe de pessoas mais capacitadas para entender e analisar informações originadas das falhas. A equipe incluirá pessoas com técnicas e conhecimento prático.

Segundo passo: Definir a falha

Desenvolver uma definição comum para a falha a ser analisada. No caso de uma falha crônica, realizar um FMEA. No caso de uma falha esporádica, coletar o máximo de evidências do evento.

Terceiro passo: Definir se a falha é crônica ou esporádica

Uma vez que os modos de falhas determinados (falha crônica), desenvolver um gráfico de barras abordando o custo, baixa produção ou número de ocorrências, avaliar; a que apresentar um maior índice deve ser estudada, ou uma falha esporádica, se for a decisão do time.

Quarto passo: Análise da causa raiz

A análise do time em seguida é desenvolver a árvore dos porquês, o coração do processo RCA. A árvore dos porquês ajuda o time a identificar a causa raiz da falha. Usando o processo “porque”, o time tem as primeiras hipóteses em potencial da causa, aprovando umas e reprovando outras. Este processo sempre identifica a causa básica que pode ter levado ao evento, não deixando pedra sobre pedra.

Quinto passo: Propor ações para eliminar a causa raiz

O próximo passo é determinar a melhor ação, que será necessária para eliminar a causa raiz. A ação proposta deve ser implementada e auditada. Deve ser feita uma verificação da eficácia da ação após um período de implementação e a causa raiz eliminada.

É utilizada por Downing (2004) a árvore dos porquês na resolução do RCA proposto em seu método de análise, o qual é baseado em nove etapas:

Primeira – etapa: A montagem da árvore dos porquês deve estar baseada nas informações coletadas; o líder da análise deve levar a maior quantidade de informações disponíveis sobre a falha a primeira reunião.

Segunda – etapa: O líder deve prover de um exemplo genérico da árvore dos porquês para explicar para a equipe como é construída, no início da reunião.

Terceira – etapa: O líder deve escrever uma declaração que descreve o evento. Utilizar todo o tempo que seja necessário em discutir qual é a falha, para que todos os membros da equipe entendam e concordem.

Quarta – etapa: Listar todas as observações que tem sido coletada em folhas de “*flip-chart*”. Priorizar as observações de acordo com a sua provável conexão com a falha (esporádicas) ou a sua frequência (crônica). A priorização pode ser

feito com pontuação 0, 1, 3 e 5, de acordo com a provável conexão com o a falha, 5 para uma maior probabilidade de relação com o evento e assim sucessivamente.

Quinta – etapa: Selecione as observações com prioridade mais alta, e as que têm maior correlação com o evento, e colocá-las no topo da árvore dos porquês, conforme é apresentado na Figura 10.

Sexta – etapa: Começando pela mais alta prioridade, elaborar hipóteses a partir das observações levantadas, perguntando “Por que ... ou Como pode...”, ter causado a falha (hipótese). Também pode ser dito “causado por” quando esteja descendo na árvore de uma causa a outra.

Sétima – etapa: Verificar as hipóteses como verdadeiras ou não, depois priorizar as verdadeiras pela sua frequência ou probabilidade, para poder decidir com qual trabalhar primeiro. A validação das hipóteses deve ser sustentada com fatos comprovados, podendo estes ser relatório de análises, fatos do evento, etc.. Adicionar símbolos como seja apropriado (E, E/OU, OU), caso uma hipótese tenha mais de uma causa. Quando uma hipótese não for verdadeira, deve ser colocado um “X” sobre ela, mas não tirá-la da árvore, para mostrar que foi analisada e verificada.

Em determinados momentos, não se terá respostas para todas as perguntas. Por exemplo, o lubrificante é o adequado para aquela aplicação? Ao se chegar neste ponto, deve ser solicitada a ajuda de um especialista no assunto, um fabricante, uma empresa de análise estrutural, etc., sendo sugerida uma análise detalhada do componente que falhou na identificação do modo de falha (MOBLEY, 1999; IRESON, COOMBS e MOSS, 1995).

Em função do custo da ocorrência da falha, deve ser avaliada a necessidade do laudo de um especialista, dado que esta consulta representa custo (podendo onerar a análise). Ao se criar a árvore dos porquês nos níveis de falha física, humana e sistêmica, são encontrados os pontos que indicam a causa raiz da falha.

Oitava – etapa: Continuar este processo de geração, verificação e priorização de hipóteses, até chegar aos fatores físicos, humanos e sistêmicos. Se alguma informação não está disponível na sala, parar e validar a hipótese, ou mudar para outra linha da árvore, e validar mais tarde.

Nona – etapa: Parar quando chegar às causas raízes do sistema gerencial. A Figura 10 demonstra a forma de montar a árvore dosporquês.

A Tabela 3 ilustra os operadores lógicos utilizados na montagem da “Árvore dos Porquês” e o significado de cada componente da árvore.

TABELA 3 – ELEMENTOS DA ÁRVORE DOS PORQUÊS
 FONTE: ADAPTADO DOWNING (2004)

	Operador Lógico “E”: Ambos ou todos os eventos diretamente abaixo devem acontecer ao mesmo tempo para que o evento precedente aconteça.
	Elemento “OU”: Um evento diretamente abaixo deve acontecer para que o evento precedente aconteça.
	Elemento “OU” e “E”: Todos os eventos diretamente abaixo, podem acontecer, mas, pelo menos um deve acontecer para que o evento precedente aconteça.
	Usado para dar continuação à Árvore em outra página ou papel.
	Retângulo sólido: indicando uma falha, uma observação ou uma Causa Intermediária (comprovada e verificada).
	Hipótese (possível causa; ainda não explicado ou não verificado) Muda para um retângulo sólido quando é explicado ou verificado.
	Tem sido verificado, ou provado, que não é a causa do evento que está acima.
	Causa raiz ou Fator Chave

A Análise de Causa Raiz (RCA) é uma ferramenta que demonstra ser imprescindível para qualquer organização, especialmente para a manutenção industrial que necessita eliminar a reincidência de falhas para sair do modo reativo.

A utilização da árvore do porque no RCA torna a ferramenta mais prática na identificação da causa raiz da falha, devido a sua forma gráfica e seu método de validação das hipóteses (DOWNING, 2004; KATZEL, 1996).

Vantagens do RCA

A estruturação do evento em forma de árvore dos porquês é uma grande vantagem da RCA, para levantamento de hipóteses, mais prováveis que tenham levado ao evento de topo. O analista deve validar cada uma delas com dados técnicos ou relatórios de análises, comprovando se a hipótese é verdadeira e o quanto ela contribui para o evento.

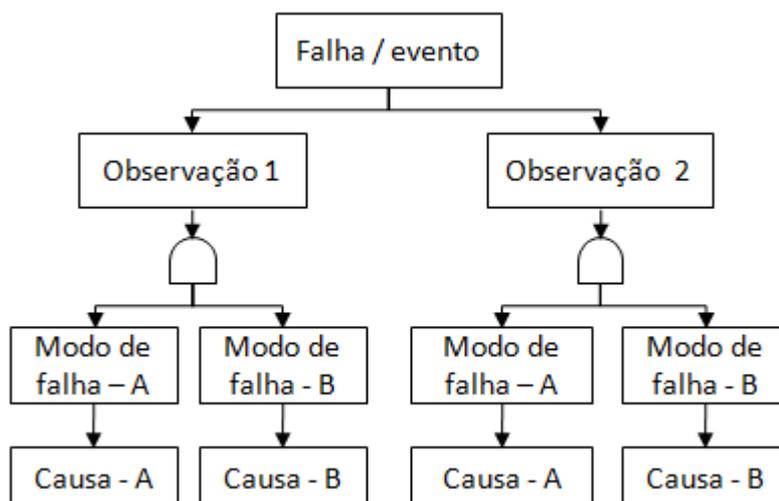


FIGURA 12 – RCA - ÁRVORE DOS PORQUÊS SIMPLIFICADA

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

No RCA, são coletadas todas as evidências do evento para análise. Na análise, são identificadas as observações com uma maior probabilidade da causa do

evento/falha. São propostos modos de falhas, caracterizados com hipóteses que são validadas com dados concretos, análise de relatórios, evidências do evento, etc..O RCA permite se aprofundar nos modos de falha ao nível do componente com maior probabilidade da causa do evento. Na sequência, são identificados os modos de falhas, os quais são caracterizados como fatores físicos, humanos e sistêmicos, com o mesmo procedimento de validação e níveis. São utilizadas as portas lógicas para ligar fatores comuns.

A grande vantagem do RCA é a validação das hipóteses comprovando que, realmente, o fator contribui com a falha;este sendo identificado, são propostas ações que permitam eliminá-lo ou a criação de sistemas que evitem que volte a ocorrer.

2.5.3 FTA – ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS

Segundo Borba Prá (2010) e Oliveira, Paiva e Almeida (2010), o Método da Análise da Árvore de Falhas, traduzido do inglês “*Fault Tree Analysis*” (FTA), é uma técnica gráfica dedutiva estruturada em termos de eventos ao invés de componentes.

Esta ferramenta permite a análise de sistemas, desde os mais simples, até os mais complexos e pode ser utilizada não apenas para a análise da confiabilidade e/ou melhorias e modificações, mas, de uma forma geral, na determinação das causas potenciais de um acidente ocorrer ou de um sistema complexo falhar, a exemplo de Li e Gao (2010), que utilizam o FTA na identificação de todos os componentes de um sistema de refrigeração de ar, na identificação da probabilidade de falha.

O FTA é utilizado na determinação de diagnósticos em equipamentos, utilizando sistemas computacionais, segundo Bo, Hong-Sheng e Yan (2011).

A montagem da árvore de falha inicia-se com a identificação do componente que falhou ou tem a maior probabilidade de falha, o qual deve ser colocado no

topo da árvore, e abaixo são listados os componentes que fazem parte do sistema e estão interligados com componente no topo da árvore. Aos componentes abaixo, são listados os modos de falhas aos quais estão suscetíveis. Sua ligação se dá por operadores lógicos e/ou montando a árvore de falha, como ilustrado na Figura 13.

Pode-se observar que, segundo Leal, Fagundes Almeida (2004), o método inicia com o “topo” (ou final) do evento e desenvolve uma árvore lógica, mostrando as causas do evento através do uso de operadores lógicos “e” e “ou”. Estes portões lógicos são utilizados no caso de se querer fazer a análise quantitativa, além da qualitativa, que podem ser utilizadas na determinação da confiabilidade dos sistemas, além de ilustrar a sequência lógica dos potenciais de falhas do evento de topo. Como salientado por Helman e Andery (1995), a impossibilidade de realização da análise quantitativa para determinar qual a probabilidade de falha do evento de topo não invalida a lógica inerente ao método, que permanece contida na determinação da relação funcional entre os eventos que conduzem ao evento de topo.

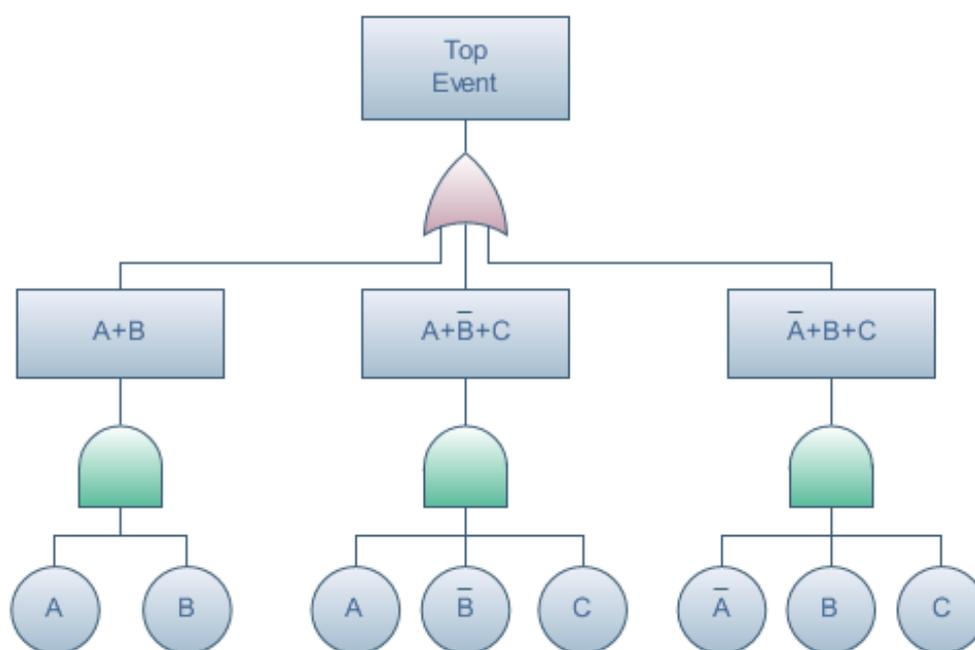


FIGURA 13-FTA - ÁRVORE DE FALHA

FONTE: BORBA PRÁ (2010)

Leal, Fagundes e Almeida (2004) apresentam um breve histórico do desenvolvimento da FTA. Segundo o trabalho dos autores, esta técnica foi criada e desenvolvida por H. A. Watson no início dos anos 1.960, nos laboratórios Bell, como parte de um contrato de pesquisa colaborativa com a Força Aérea dos Estados Unidos da América. Os autores citam que relatórios de árvore de falhas foram publicados subsequentemente pela Companhia Boeing e pela AVCO, em março de 1963 e janeiro de 1964, respectivamente. Em junho de 1965, a Companhia Boeing e a Universidade de Washington organizaram um simpósio de análise de segurança e de sistemas de segurança, em Seattle, USA, no qual um grande número de artigos foi apresentado por funcionários da Boeing. A partir deste acontecimento, muito tempo e esforço foram gastos na construção, uso, avaliação e aplicação da FTA para a elaboração de sistemas de computacionais da confiabilidade global de um amplo campo de sistemas complexos que incluem: sistemas elétricos, sistemas de processos químicos, estudos de segurança de reatores nucleares e segurança de produtos.

Segundo Araújo *et al.* (2000), as etapas para realização de uma FTA consistem em:

- Definir o evento de topo: o evento de topo se trata de um comportamento anormal do sistema. Para a sua definição, são necessários relatos de falhas ocorridas no campo, falhas potenciais, principalmente aquelas relacionadas com a segurança dos usuários.
- Entender o sistema: a análise da árvore de falhas exige o conhecimento da estrutura do sistema e de seu esquema de funcionamento, ou seja, é necessário um diagnóstico do objeto de estudo.
- Construir a árvore de falhas: esta etapa utiliza todo o conhecimento adquirido sobre o sistema. Todas as informações vão ser reunidas de forma a representar a inter-relação entre as partes que possam acarretar o evento de topo.

- Avaliar a árvore de falhas: etapa que tem por objetivo o cálculo da probabilidade de ocorrência do evento de topo, ou seja, realização da análise quantitativa.
- Implementar ações corretivas: na etapa anterior, são identificados os itens do sistema que possuem baixa confiabilidade e que, por este motivo, aumentam a probabilidade do evento de topo. Este último passo visa a programar ações corretivas para aumentar a confiabilidade destes itens.
- Dentre os símbolos necessários na construção da FTA, os mais utilizados são o círculo e o retângulo. O círculo denota um evento de falha básico ou a falha de um componente elementar. O retângulo denota um evento de falha que é o resultado de uma combinação lógica de eventos de falha.

Vantagens - FTA

A estruturação do evento sob a forma de uma árvore permite identificar todos os componentes que estão envolvidos no evento. A árvore de falha estruturada por todos os componentes permite uma análise quantitativa ou a avaliação da probabilidade de falha dos componentes.

O FTA trabalha com os modos de falha com uma análise quantitativa, seus modos de falha são fatores físicos que compõem o sistema analisado. É associada uma probabilidade de ocorrência de falha para os fatores físicos, podendo avaliar a probabilidade de ocorrência do evento de topo. As portas lógicas fazem interação entre os fatores, identificando a causa primária de acordo com o nível de análise.

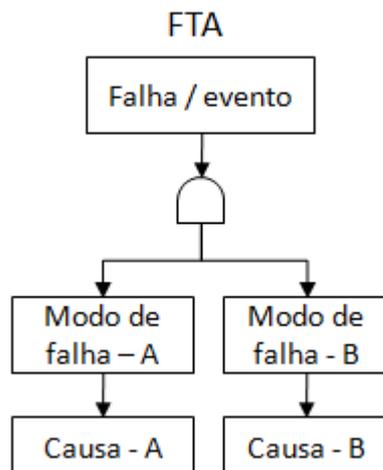


FIGURA 14 – FTA - ÁRVORE DE FALHA GENÉRICA

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A vantagem principal do FTA é a obtenção, de forma lógica, da interligação entre os componentes que falharam, permitindo uma visualização da probabilidade de falha entre os componentes e qual tem um maior impacto sobre o sistema analisado.

O FTA, quando elaborado, permite a identificação dos componentes que falharam, assim podendo analisar como aumentar a confiabilidade do sistema.

2.5.4 FMEA - ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHAS

Segundo Leal, Pinho e Almeida (2006), o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é uma ferramenta utilizada para definir, identificar e eliminar falhas conhecidas ou potenciais de sistemas, projetos, processos e/ou serviços, antes que estas atinjam o cliente. Ainda, segundo Puente *et al.* (2002), o FMEA basicamente consiste em dois estágios. Durante o primeiro estágio, possíveis modos de falhas de um produto ou processo e seus efeitos prejudiciais são identificados. Durante o segundo estágio, os times de engenheiros que trabalharam com o FMEA determinam o nível crítico (pontuação de risco) destas falhas e as colocam em ordem de prioridade. A falha mais crítica será a

primeira do *ranking* e será considerada prioritária para a aplicação de ações de melhoria. Há três fatores utilizados no FMEA que auxiliam na definição de prioridades de falhas. São eles: ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D), segundo Palafy (2004).

A ocorrência define a frequência da falha, enquanto a severidade corresponde à gravidade do efeito da falha. A detecção é a habilidade para detectar a falha antes que ela atinja o cliente.

O FMEA utiliza o RPN (Graus de Prioridade de Risco), para o processo decisório de priorização dos modos de falha de maior potencial. O qual é composto do produto dos três fatores do FMEA: D, O e S. Tendo obtido o RPN, as causas das falhas são priorizadas, direcionando a atuação do gestor. Na priorização do RPN em sistemas complexos, são utilizadas técnicas de priorização. Xiao *et al.* (2011), apresentam em seu trabalho um método para minimizar o número de priorização de sistemas complexos. A Tabela 4 mostra um exemplo de aplicação do FMEA, neste caso é utilizado para identificar e priorizar a causa com maior potencial de ocorrência e tomar ações preventiva para evitar a falha funcional do equipamento.

Segundo Palafy (2004), o FMEA tem como função principal a identificação da “Causa Potencial” pela qual o equipamento deixaria de executar a sua função, apresentando o “Modo de falha” identificado na elaboração do FMEA. Ao se definir o RPN para a Causa Potencial, é identificada a causa com maior potencial de falha baseado na análise em questão, assim é estabelecido ações de contenção para evitar a ocorrência da falha. A elaboração do FMEA considerando todos os modos de falhas e todas as causas potenciais seria quase impossível, sendo que, na interação do equipamento em seu meio de trabalho, as variáveis são inúmeras. Como seria possível prever, por exemplo, um vazamento de água de uma telha sobre um motor e este vir a falhar. O FMEA pode ser melhorado com a identificação destes modos de falha não triviais com a ajuda de outras ferramentas.

TABELA 4 - EXEMPLO DE UM FMEA EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Função	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial	Severidade	Causa Potencial	Ocorrência	Deteção	RPN	Ações Recomendadas (Plano de manutenção)
Transmitir movimento ao sistema de limpeza	Rompimento/esmagamento das buchas de borracha	Parada da maquina	8	Bucha sobdimensionada	10	5	400	Utilizar bucha com maior camada de borracha
	Folga no rolamento da rótula	Aumento dos esforços em outros componentes	8	Montagem inadequada	10	5	400	Verificar o processo de montagem
	Alongamento da corrente e quebra	Parada da maquina	8	Montagem inadequada	8	5	320	Evitar o rompimento dos anéis o' rings alinhando as engrenagens
	Desgaste do pino da corrente	Parada da maquina	8	Desalinhamento das engrenagens	9	4	288	Alterar forma de alinhamento das engrenagens
	Rompimento dos anéis o' rings	Perda de desempenho	7	Desalinhamento das engrenagens	9	4	252	Modificar processo de montagem e alinhamento das engrenagens
	Alto nivel de ruido da transmissão	Insatisfação do cliente	5	Desalinhamento das engrenagens	9	4	180	Alinhar as engrenagens

Vantagens do FMEA

A elaboração do FMEA ajuda a identificar de forma qualitativa, pontos em um sistema que tem maior probabilidade de falha que necessitam de uma ação preventiva, para evitar que a falha ocorra.

Fornecer ideias para testes incorporados ao projeto, reduz eventos não previstos durante o planejamento de um processo, fornece referência rápida para resolução de problemas e identifica as preocupações de segurança a serem abordadas.

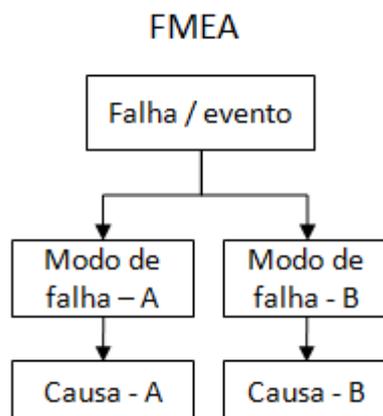


FIGURA 15 - FMEA NA FORMA DE ÁRVORE DE FALHA

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

O FMEA trabalha com os modos de falha com uma análise qualitativa, baseada num quantificador para os modos com maior potencial de acordo com o RPN (Graus de Prioridade de Risco). Sua montagem mais comum é na forma de uma planilha e não em forma de árvore, propondo recomendações para a contenção da causa potencial.

O FMEA tem como sua principal vantagem a identificação dos modos de falhas quando aplicado. Sua aplicação permite identificar pontos em potencial suscetíveis a falha, permitindo elaboração de ações para eliminá-los ou controlá-los.

2.6 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO NÃO TECIDO

O trabalho foi desenvolvido em uma empresa da indústria de “não tecidos”, localizada no interior do estado de São Paulo, a qual é constituída de dois processos de fabricação do não tecido: o agulhado e o hidroentrelaçamento.

Popularmente, o não tecido é chamado de “TNT” (Tecido Não Tecido), mas deve-se fazer uma distinção entre o que é um tecido e um não tecido. Conforme a norma NBR 12446 (ABINT, 2010), tecido é uma estrutura produzida pelo

entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro conjunto de trama, formando um ângulo de (ou próximo de) 90°.

Conforme a norma NBR-13370 (ABINT, 2002), não tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída devéu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes. O não tecido também é conhecido em outras línguas como *Nonwoven* (inglês), *Notejido* (espanhol), *Tessuto Nontessuto* (italiano), *Nontissé* (francês) e *Vliesstoffe* (alemão).

A origem da produção dos não tecidos surgiu sob pressões e circunstâncias comerciais como: necessidade de simplificar o processo têxtil; necessidade de desenvolver novos tipos de produtos têxteis; necessidade crescente de reciclagem de resíduos de fibras; aspectos econômicos; possibilidade de aplicação e desenvolvimento de outras áreas industriais, segundo ABINT (2010).

Pode-se dizer que a obtenção de tecidos se estendeu por milhares de anos sendo produzida apenas pelos processos de tecelagem e malharia. Nos últimos anos, uma nova classe de estrutura têxtil tem sido desenvolvida: têxteis não tecidos. O tecido têxtil obtido da tecelagem ou malharia comparado com o não tecido, embora diferentes em suas propriedades físicas, tem um fator em comum, isto é, todos usam fibras formadas a partir de polímeros (tais como polipropileno, polietileno, PET, entre outros) como componentes base em sua construção, segundo Hangel (2010).

O processo de consolidação por agulhagem data do final do século XVIII, quando a primeira agulhadeira foi produzida por William Bywater, na cidade de Leeds, Inglaterra, tornando-se conhecida somente a partir de 1.920, segundo Hangel (2010). O não tecido surgiu nas últimas décadas com uma maior intensidade, pois, na década de 1.950, surgiram as primeiras grandes fábricas na América do Norte, México e Europa. A técnica de costura desenvolvida no início de 1.945 ficou mais conhecida a partir de 1.959, quando surgiu o

equipamento fabricado na Alemanha Oriental, denominado Maliwatt, segundo Hangel (2010).

A década de 1.960 marca o lançamento do não tecido no mercado como matéria-prima industrial e como produto de consumo. Em 1.960, apareceram as primeiras patentes para a fabricação do não tecido de filamento contínuo através da fiação por fusão. A década de 1.970 encontra a Indústria de não tecidos em plena ascensão, com grandes desenvolvimentos e novas tecnologias de processos e matérias-primas, segundo Rewald (1988).

a) Matérias-primas utilizadas

Na maioria dos casos, as fibras/filamentos representam a principal matéria-prima dos não tecidos, sua proporção nos produtos finais varia de 30% a 100%. As propriedades das fibras/filamentos somadas às fornecidas pelo processo de fabricação definem as características finais dos Não tecidos. A Tabela 5 mostra os tipos de matérias primas utilizada no processo de fabricação do não tecido.

TABELA 5 - TIPOS DE FIBRAS/FILAMENTOS

Artificiais	Viscose, vidro, silicone, acetano;
Naturais	Lã, algodão, coco, sisal, cashmere, asbesto, metálicas (níquel-cromo, césio-cromo) e cerâmicas;
Sintéticas	Poliéster, polipropileno, poliamida, polietileno, policarbonato, acrílica.

FONTE: ABINT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃOTECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS (2010)

b) Formação da manta (*Web Forming*)

A manta, estrutura ainda não consolidada, é formada por uma ou mais camadas de véus de fibras ou filamentos, podendo ser obtido por um dos três processos distintos, segundo Edana (2003):

- Via Seca (*Dry Laid*)
- Via Úmida (*Wet Laid*).
- Via Fundida (*Molten Laid*)

A empresa na qual foi desenvolvida a dissertação trabalha com a Via Seca na formação do véu, não serão abordados os demais processo de formação do véu.

c) Via Seca: nãotecidos fabricados via cardagem

A fabricação do nãotecido via cardagem é constituída do fluxo da figura 16, a qual apresenta todas as fases do processo de formação do nãotecido via cardagem, composto pelo processo de hidroentrelaçamento.

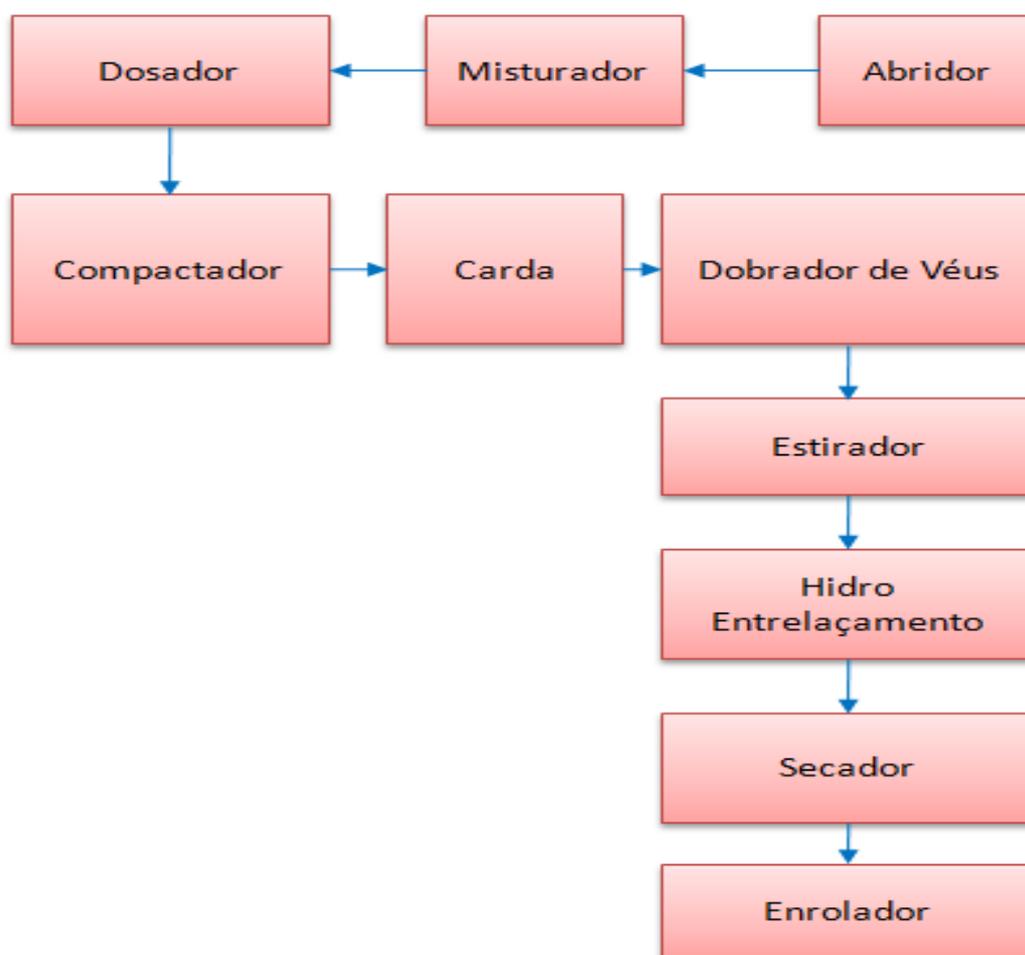


FIGURA 16 - FLUXO DE FABRICAÇÃO DO NÃOTECIDO POR HIDROENTRELAÇAMENTO

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

- Abridoras: abertura da fibra e pesagem conforme necessidade do processo.
- Misturadoras: mistura as fibras de diferentes composições.
- Dosador: Sistema de dosagem do material.
- Compactador de Fibra: é classificado como um compactador de fibra tem a função de formar um colchão de fibra com uma densidade uniforme, para o processo de cardagem.
- Carda: direciona as fibras e forma um véu com gramatura uniforme.
- Dobrador: formação do véu com largura e espessura solicitada.
- Estirador: estira o véu.
- Hidroentrelaçamento: fornece a energia para a formação do não-tecido dando as características mecânicas para o véu.
- Secador: secar o não-tecido.
- Enrolador: enrolar o material.

A figura 17 apresenta a obtenção do não-tecido, pelo processo de cardagem utilizando o processo de consolidação por impregnação.

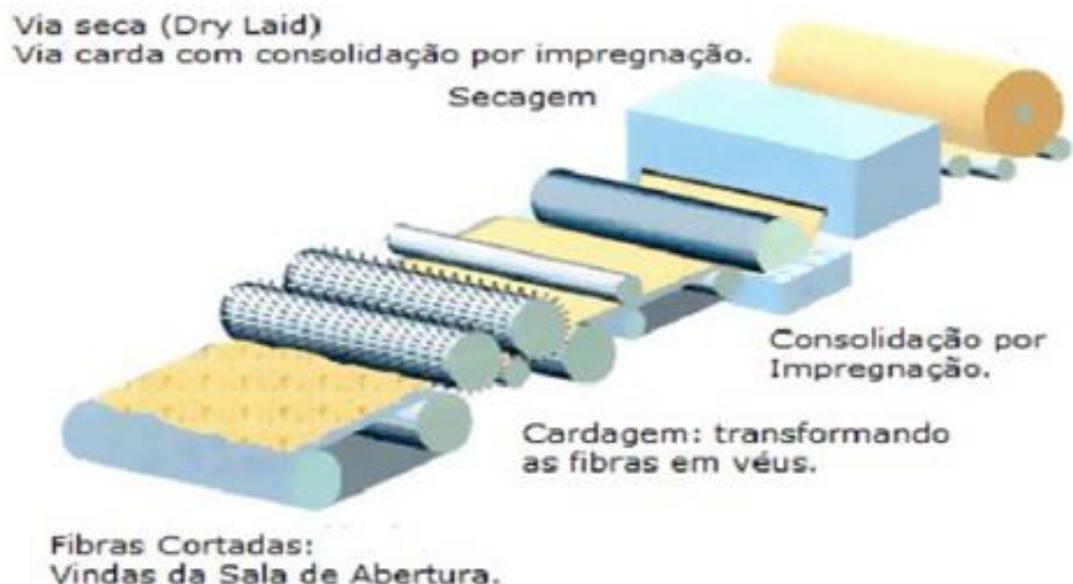


FIGURA 17 - PROCESSO DE FORMAÇÃO DA MANTA VIA CARDA

FONTE: EDANA (2003)

Após a formação do véu ou da manta, é necessário realizar a consolidação (união das fibras ou filamentos) que consiste de três métodos básicos, segundo Edana (2003):

- Mecânico (Fricção), que pode ser por:
 - Agulhagem (*Needlepunched*);
 - Hidroentrelaçamento (*spunlacedouhydroentanglement*)
 - Costura (*Stitchbonded*);
- Químico (Adesão), por resinagem (*ResinBonded*);
- Térmico (Coesão), que é termoligado (*Thermobonded*).

Em grande parte dos nãotecidos, os tipos de consolidação acima citados também consistem no acabamento necessário ao produto final.

Os métodos de consolidação química e térmica envolvem a adesão entre as fibras; portanto, pode-se defini-los como consolidação adesiva. O termo consolidação mecânica é dado para expressar a consolidação por forças friccionais e o entrelaçamento das fibras através de agulhagem, hidroentrelaçamento e consolidação coser-tricotar. Serão abordados, neste trabalho, apenas os processos de entrelaçamento das fibras através de agulhagem e hidroentrelaçamento, em função do objeto de estudo fazerem parte desta linha de produção.

d) Consolidação mecânica: Agulhagem e Hidroentrelaçamento

Consolidação por agulhagem

A técnica de agulhagem é definida como o entrelaçamento mecânico de fibras com a utilização de agulhas com farpas.

Estes nãotecidos agulhados são obtidos pelo entrelaçamento mecânico dos véus de fibras provenientes de uma carda, ou aerodinamicamente depositados, ou ainda véus de filamentos contínuos.

O processo de consolidação por agulhagem apresenta-se conforme a Figura 18, no qual o véu é composto de várias camadas é direcionado a agulhadeira e submetido ao entrelaçamento em função do movimento das agulhas e após passar pelo processo adquire várias propriedades mecânicas como espessura, resistência à tração, alongamento, que vão caracterizar o produto.

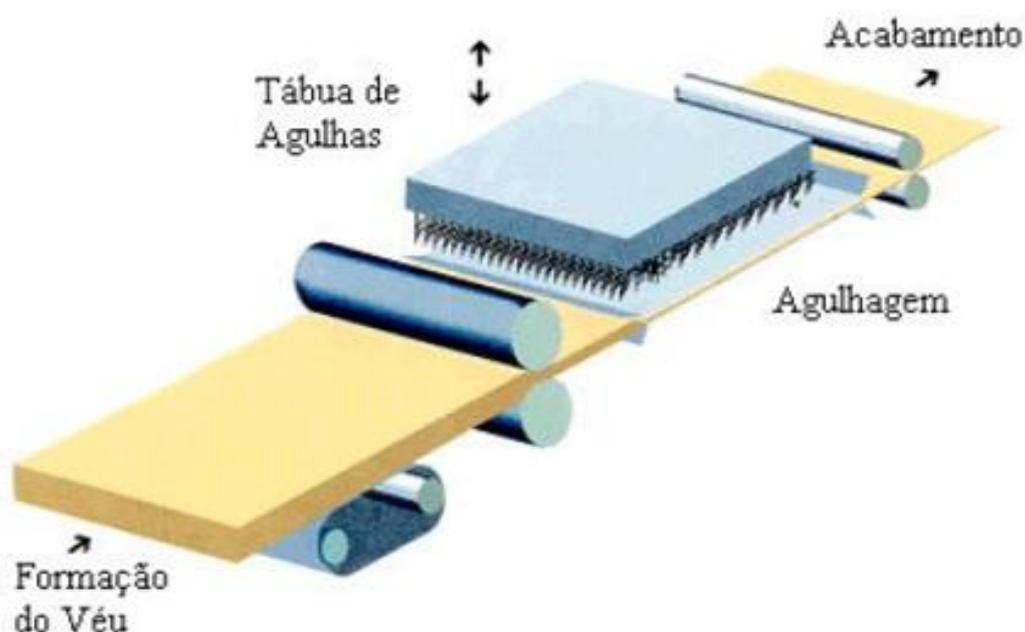


Figura 18 - Processo de Consolidação por Agulhagem

FONTE: EDANA (2003)

O conceito básico da agulhagem é aparentemente simples: o véu fica estendido entre duas esteiras estacionárias, a mesa inferior e o extrator. O véu é então perfurado por um grande número de agulhas (cerca de 4000 agulhas/m) em toda a agulhadeira, conforme Figura 19. As agulhas possuem geralmente um formato triangular e possuem saliências (farpas) nas pontas. Quando as agulhas penetram o véu, as farpas capturam algumas fibras e as puxam através de outras fibras. Quando a agulha sobe, o entrelaçamento formado pelas fibras se mantém, consolidando, assim o véu, segundo Edana (2003).



FIGURA 19– AGULHADEIRA PARA NÃOTECIDO

FONTE: NEUMAG (2012)

Consolidação por Hidroentrelaçamento

O processo de hidroentrelaçamento foi inventado como um meio de produzir um entrelaçamentosimilar ao da agulhadeira, porém, utilizando um véu mais leve. Como o próprio nome já diz, o processo de consolidação se dá com a aplicação de jatos d'água a pressões altíssimas (40 a 250 bar), por meio de orifícios de diâmetros muito pequenos. Um jato finíssimo desse gênero é responsável pela consolidação do não tecido, imitando a lâminadas agulhas. O véu passa continuamente sob estes jatos e sobre uma esteira perfurada por onde a água é removida. Não se sabe exatamente o que acontece com o véu sob a ação dos jatos, mas sabe-se que as fibras sofrem uma torção ou entrelaçamento por causa da turbulência da água fria após atingiro véu.

A técnica do hidroentrelaçamento pode ser aplicada nas mantas formadas pelos métodos via seca, via úmida e via fundida. Após o entrelaçamento a manta consolidada é transportada para um cilindro secador, sendo o responsável de eliminar o excesso de umidade.

Apesar destas máquinas de hidroentrelaçamento, possuem alta precisão em comparação com outros sistemas, e particularmente se comparada com as agulhadeiras, elas são muito custosas e utilizam muita energia. Outro problema considerável é o suprimento de água limpa aos jatos, com o pH correto e

atemperatura correta. Grande quantidade de água é necessária, sendo necessário um sistema de reciclagem da água.

Esta tecnologia confere ao não tecido um grau de pureza único, grande suavidade, resistência, baixíssimo desprendimento de partículas e alto poder de absorção.

O uso do não tecido consolidado hidromecanicamente apresenta grande porosidade, consequência dos orifícios presentes na esteira ou tambor, conferindo o seu alto poder de absorção.

Os Não tecidos consolidados hidromecanicamente são adequados para limpeza em geral de equipamentos e lugares onde é necessário um ambiente limpo e sem contaminantes, como a indústria alimentícia, farmacêutica e de cosméticos. Porém, a maior aceitação destes não tecidos encontra-se nos produtos médico-hospitalares descartáveis, base para forros sintéticos, entreteias e palmilhas para calçados (EDANA, 2003).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS

As ferramentas de análise de falhas FTA e FMEA são ferramentas com os passos definidos a sua utilização. Os métodos de utilização estão claros, não deixam dúvidas quais os passos a seguir em sua aplicação.

A consideração é quando aplicar, é abordada por autores que o FMEA, é utilizado para iniciar o plano de manutenção preventiva, sua técnica permite a identificação de potenciais modos de falhas.

O fato de ser utilizado no início da elaboração do plano de manutenção preventiva, não o restringe a ser utilizado somente neste ponto. Sua concepção o torna flexível a ponto de ser utilizado em qualquer momento que se julgue necessário.

O DMAIC é uma ferramenta de gestão para resolução problemas, tem como característica, ter suas fases de utilização claras, não deixando dúvidas em o que fazer e dados momentos. Não tem como característica identificar os causadores dos problemas propõe que sejam, utilizados métodos alternativos que possam ser aplicados na resolução dos problemas.

O RCA tem como propósito a identificação dos fatores causadores das falhas, seu método de utilização permite investigar todos os fatores que possam ter contribuído para a falha. Os métodos de utilização do RCA apresentados pelos autores na revisão bibliográfica não deixam claro a forma de identificar os fatores causadores das falhas. A Tabela 6 apresenta os passos utilizados pelos autores no RCA, os quais foram alocados na forma resumida por Ransom (2007), na primeira coluna, e nas demais os passos completos dos métodos dos demais autores. A partir da Tabela 6, podem-se identificar os pontos fortes dos métodos apresentados na identificação dos fatores causadores das falhas.

TABELA 6 - PASSOS PARA A UTILIZAÇÃO DO RCA

(1) Resumo	Rouney e Heuvel (2004)	Ransom (2007)	Mobley (1999) e Balasubramanian (2009)	Downing (2004)
Coleta	Coleta de dados	Formação do time	Definição do problema	Formação do time disciplinar
		Definição do problema	Coleta de dados	Definição do problema e coleta de dados
		Coleta de dados		Definir a falha crônica ou esporádica
Análise	Quadro de fator causal	Determinar as causas: imediatas, raiz e contribuição	Identificação da causa raiz da falha	Identificação da causa raiz da falha
	Mapa da causa raiz		Definindo as ações para o fator que resolvera o incidente	
Solução	Geração de recomendação e implementação	Determinar ações corretivas e preventivas	Análise do custo x benefício das ações	Propor ações para eliminar a causa raiz
		Testar e implementar	Verificação das ações corretivas	

Inicialmente, o RCA será resumido em coleta, análise e solução, conforme proposto por Ransom (2007), e observado uma leve tendência entre os demais autores nesta colocação. O RCA será subdividido em duas partes, a primeira parte tratará dos passos para a resolução da análise da causa raiz da falha, que conterá o método mais adequado para a identificação dos fatores causadores das falhas. A Tabela 7 apresenta o resumo dos principais passos para a identificação dos fatores causadores de falhas.

Com base na bibliografia podemos concluir a importância da coleta de dados na identificação dos fatores causadores de falhas, devido que o evento por si só nos indica o que causou a falha. A coleta das evidências do evento são super importantes, não só para a reconstituição, mas também para se analisar os componentes que falharam.

TABELA 7 – PASSOS DO RCA RESUMIDO

Análise de falhas	
Coleta	Coletar de dados: informações manuais, relatórios, dados do evento
Análise	Montagem da árvore do porque
Solução	Geração de ações para eliminação da causa raiz

Na análise para a identificação dos fatores que causaram a falha, uma das formas mais adequadas é a montagem da árvore dos porquês, devido a sua simplicidade e objetividade, a qual está baseada na validação das hipóteses, as quais são identificadas com base nas observações levantadas na coleta de dados. As outras formas de análise para a identificação dos fatores são sujeitas a uma enorme quantidade de modos de falhas, não se restringindo às observações. Os modos de falhas podem ser direcionados às observações, porém pode-se desviar o foco, pois podem ser sugeridos outros modos de falhas. Ao serem identificados os fatores, são geradas ações para a contenção da falha.

A segunda parte do RCA será listar os passos que vão compor a gestão da análise de falhas, diante de que somente a identificação dos fatores não assegurara por definitivo que o evento ou falha não ocorra mais. A Tabela 8 apresenta os passos que inicialmente vão compor o RCA.

TABELA 8 - PASSOS PARA A UTILIZAÇÃO DO RCA

RCA Resumido	Passos para aplicação da ferramenta RCA
Coleta	Coleta de dados
	Formação do time disciplinar
	Definição do problema (crônica ou esporádica)
Análise	Estrutura da análise
	Identificação da causa raiz da falha
Solução	Propor ações para eliminar a causa raiz
	Priorizar a ações corretivas e preventivas
	Planejar as ações corretivas e preventivas
	Verificação das ações corretivas
	Análise do custo x benefício das ações

A Tabela 8 apresenta os passos mínimos para se compor o RCA com uma gestão mais robusta. A analogia com as demais ferramentas de análise de falhas com o RCA será abordada no capítulo que tratara do “Método de análise de falhas integrado”, este tópico identifica a necessidade de uma gestão adequada, para a utilização das ferramentas de análise de falhas. Perante a sua importância dentro do cenário da indústria, devido ao fato das falhas serem pertinentes, e terem um grande impacto no desenvolvimento da indústria.

3 MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS INTEGRADO

A utilização de ferramentas para melhorias de processos, identificação de fatores que levaram a falha, medição de confiabilidade, são abordadas por diversos autores como, Pinto e Xavier (2001), Lafraia (2001), Moubray (1998), Helman e Andery (1995), e Neumam (2001). Estes autores apresentam abordagens da utilização das ferramentas de uma forma lógica e racional, que sucintamente, consiste em ordenar os fatos, analisar e propor ações. A maneira como é utilizada em cada fase é que determina a eficiência de cada ferramenta. Buscando uma melhor forma de utilização das ferramentas, propõe-se, neste trabalho, a integração, aglutinação, ou seja, a utilização em conjunto de ferramentas, utilizando-se o mais apropriado de cada uma delas.

O uso integrado de ferramentas é uma forma de se obter uma maior eficácia na utilização da ferramenta de análise de falhas, perante que as ferramentas de análise de falhas não são auto gerenciáveis. Segundo Oliveira, Paiva e Almeida (2010), o uso integrado das ferramentas proporciona uma visualização das atividades desenvolvidas durante a análise, o que assegura que todos os pontos serão abordados.

O estudo de integração de ferramentas esta baseado na observação das necessidades de se obter uma forma de análise mais clara e objetiva.

As ferramentas de análise de falhas possuem formas diferentes de serem utilizadas, a Tabela 6 identifica dentre as formas de utilização do RCA a falta de clareza na definição dos passos abordados no método de utilização.

O FMEA e o FTA são ferramentas extremamente eficazes quando aplicadas corretamente, na identificação dos modos de falhas.

3.1 INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS

Uma forma de promover uma maior sinergia do sistema produtivo tem se buscado operacionalizar o uso integrado de ferramentas de análise de falhas, como um requisito estratégico para a promoção do sistema produtivo promovendo assim um diferencial competitivo para as empresas, principalmente para aquelas que almejam a Classe Mundial, segundo Souza e Marçal (2009). Segundo Helman e Andrey (1995), Lima, Franz e Amaral (2006) e Oliveira, Paiva e Almeida (2010), a utilização de ferramentas conjuntas (integradas) é uma forma de análise que permite uma avaliação sistemática e padronizada de possíveis falhas, permitindo uma análise mais ampla da ocorrência da falha.

Segundo Fogliato e Ribeiro (2009), as técnicas FMEA e FTA revelam pontos fracos do sistema, podendo estes ter características físicas, humanas e sistêmicas, e, assim, fornecem subsídios para as atividades de melhoria contínua e ambas as técnicas possuem pontos em comum: buscam fazer um diagnóstico de falhas que podem surgir em produtos ou processo, o qual estamos relacionando a equipamentos e processos de sistemas de controles, o uso integrado pode complementar ou facilitar a análise.

Souza e Álvares (2008) demonstram, em seu estudo de caso, a aplicação das ferramentas FTA e FMEA utilizadas em conjuntos na avaliação das falhas, observando um grande aumento na confiabilidade do sistema analisado pela facilitação do entendimento de sua ocorrência.

3.2 ESTRUTURAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS

A estruturação do método de análise de falhas teve como base uma revisão bibliográfica das principais ferramentas de análise de falhas FTA, FMEA e RCA e observação das análises realizadas na empresa, as quais apresentam alguns os pontos de melhorias identificados.

A empresa objeto de estudo detinha um método de análise de falhas não estruturado, no qual os passos para a elaboração do RCA não estavam claros e, desta forma, as ações propostas não eram efetivas na resolução do problema.

Foram identificados pontos de dificuldades nas análises anteriores realizadas pela empresa, por falta de um método adequado, as quais serão apresentadas:

- Erro na definição da falha: a definição do evento ou falha é um fator primordial na análise, pois, mal definido, pode levar a análise a lugar nenhum, não atender à necessidade da empresa, podendo levar a uma análise inadequada e impossível de se concluir.
- A equipe de analistas não era treinada adequadamente nos passos para análise de falhas, o que dificultava a utilização do método, o qual também não estava estruturado de forma objetiva.
- Fases de execução do RCA não definidos claramente: o processo de ordenação em passos permite melhor utilização dos recursos (time multidisciplinar alocado para análise). Não é necessário que todo o time esteja sempre em reunião, o que iria demandar maior custo para a empresa. Os recursos sendo alocados com as tarefas claras e direcionadas faz com que a análise se torne mais eficaz.
- Dificuldades na gestão das ações (implementação, prazos, medição de eficácia): a priorização e medição das ações após a RCA são fatores que determinam a sua eficácia. Se as ações não forem implementadas, a RCA não tem valor.

Com base nos pontos de melhorias identificados, o RCA foi estruturado de forma a ser mais objetivo e específico na identificação dos fatores causadores de falhas. A Tabela 9 apresenta a integração do RCA com o DAMIC.

TABELA 9—INTEGRAÇÃO DO RCA COM O DMAIC

RCA		DMAIC
Coleta	Coleta de dados	D (Iniciação)
	Formação do time disciplinar	
	Definição do problema (crônica ou esporádica)	M (Planejamento)
Análise	Estrutura da análise	A (Execução)
	Identificação da causa raiz da falha	
Solução	Propor ações para eliminar a causa raiz	I (Finalização)
	Priorizar as ações corretivas e preventivas	
	Planejar as ações corretivas e preventivas	
	Verificação das ações corretivas	C (Controle)
	Análise do custo x benefício das ações	

A ordenação de análise de falhas por fases permite identificar, direcionar e administrar os recursos empregados. O DMAIC por ser considerado como uma evolução do ciclo de melhoria PDCA, tendo uma característica em particular de estabelecer a sequência de cada fase da análise.

É proposta a integração das ferramentas FMEA e FTA no RCA, para promover uma maior confiabilidade no fator físico identificado, mapeando os modos de falhas que podem estar ocultos na análise.

A Figura 20 apresenta a integração com do DMAIC com o RCA, FMEA e FTA, sendo o DMAIC o direcionador das fases de execução do RCA, e o FMEA e FTA assegurando que os modos de falhas não voltarão a ocorrer. A Figura 20 apresenta a integração, de forma simplificada, do método proposto.

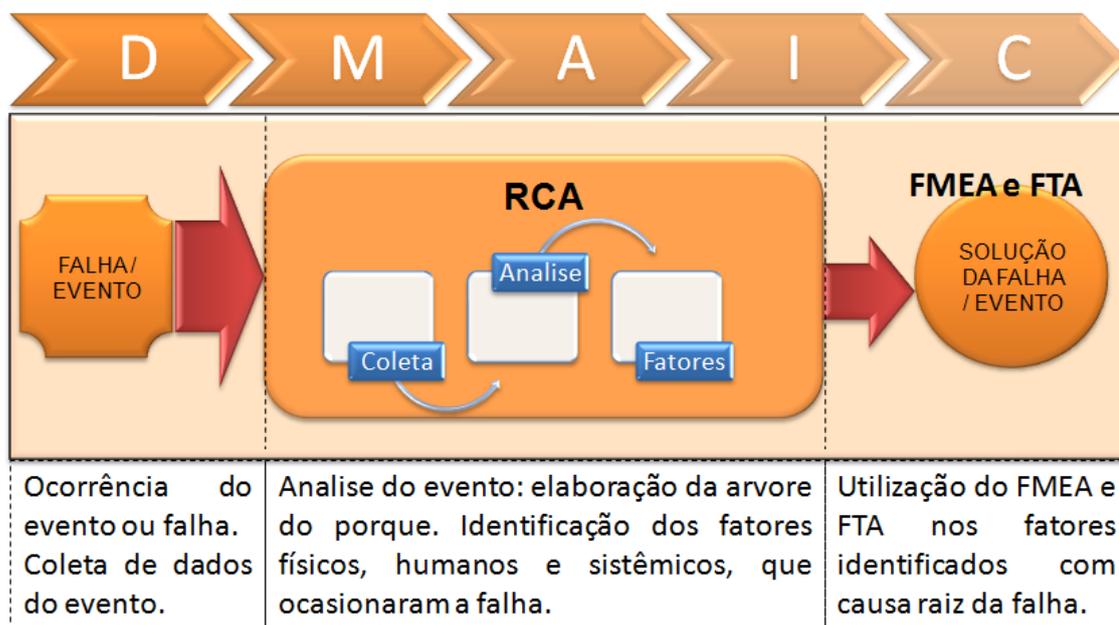


FIGURA 20 – INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO OU FALHA

Para se caracterizar uma falha ou evento, o analista deve verificar se a falha é esporádica ou crônica. As falhas esporádicas são situações que não são comuns de acontecer, por exemplo, quebra de uma carcaça de uma bomba, rompimento da hélice de um exaustor, entre outras. Nestes casos, o analista deve conduzir uma coleta de dados no instante em que ocorrer o evento.

As falhas caracterizadas como crônicas são falhas comuns de acontecer, como, por exemplo, rompimento de correias, sendo muito específicas da atividade desenvolvida. O analista deve montar um gráfico de Pareto, elencando a barra com o maior índice e iniciar a aplicação do método por este ponto.

3.2.2 DEFINIÇÃO DOS PASSOS DO MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS

O método foi traduzido na forma de um fluxograma, estabelecendo vários passos de sua aplicação. Na Figura 21, são apresentados todos os passos da utilização do método proposto na forma de um fluxograma. São apresentados todos os passos de forma detalhada, permitindo demonstrar, de forma clara e objetiva, cada passo do método proposto.

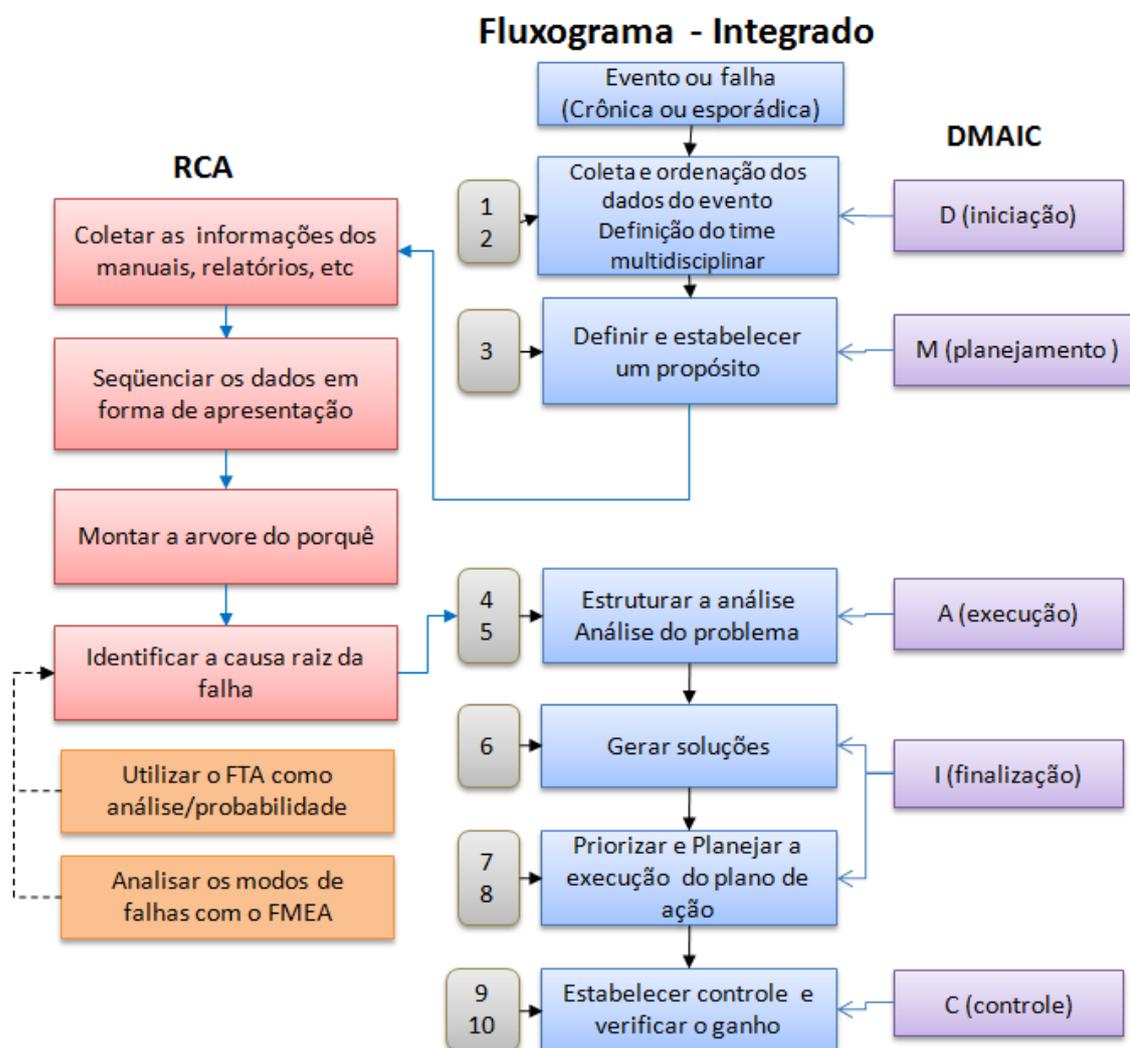


FIGURA 21 - FLUXOGRAMA DE INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

a) Primeiro Passo – Coleta e ordenação dos dados do evento

A coleta de dados ou informações da falha deve seguir conforme listado:

Coleta de dados

- Coletar todas as evidências, por exemplo, peças que quebraram, produto que estava no local, etc..
- Entrevistar os operadores, pedir suas opiniões, porque eles sabem das ocorrências diárias em seu local de trabalho e suas máquinas melhor do que ninguém.
- Tirar as dúvidas e relatar os comentários na primeira pessoa, anotações importantes para fazer parte da análise.
- Não deixar o local até que se tenha uma boa compreensão do que exatamente aconteceu e a sequência de eventos que levou à falha.
- Fazer uma investigação preliminar no local do evento, examinar as peças quebradas à procura de pistas.
- Não limpar as peças enquanto não correlacionar à sequência em que o evento ocorreu, porque a limpeza poderia lavar a informação vital.
- Documentar com precisão as condições e tirar fotografias a partir de uma variedade de ângulos de ambas as partes que falharam e nos arredores.
- Coletar dados de fundo, como quais são os projetos originais e as condições operacionais atuais.
- Ainda no local, determinar as condições de funcionamento, tempo, temperatura, intensidade, tensão, carga, umidade, pressão, lubrificantes, materiais, procedimentos operacionais, mudanças, corrosivos, vibração, etc..
- Comparar a diferença entre as condições reais de operação e as condições de projeto. Olhar para tudo o que poderia ter um efeito sobre o funcionamento da máquina.

Ordenação dos dados

A organização dos dados coletados facilita a sua compreensão e na hora de montar a Árvore dos Porquês. Uma das maneiras de ordenar os dados é pelo método apresentado abaixo:

- **Pessoas:** o que foi visto, sentido, cheirado e escutado; o que as pessoas estavam fazendo; condições ou aparência das pessoas relativas ao estado emocional, etc..
- **Registros:** dados históricos, reparos anteriores, como estavam as condições das operações, bases de dados, gráficos de processos, etc..
- **Orientação:** onde a equipe ou parte da equipe estava antes e depois da ocorrência da falha; posição de válvulas, instrumentos de medição, interruptores; ter certeza de capturar estas informações em filmes, desenhos, modelos no computador, etc..
- **Valores ou Crenças:** os paradigmas, enigmas ou atitudes que podem ter desempenhado um papel no incidente ou falha.
- **Equipamento:** condições do equipamento, estrutura das construções, partes danificadas.

b) Segundo Passo – Definição do time multidisciplinar

O time multidisciplinar deve ser composto de pessoas de diferentes áreas; por exemplo, se a falha for relativa à quebra de um equipamento, é necessário que tenha uma pessoa da operação, da manutenção, da qualidade, da engenharia ou do planejamento, sendo que o time de análise deve ter, pelo menos, cinco integrantes. A quantidade de pessoas ajuda a melhorar a qualidade da elaboração da árvore dos porquês, pois evita que seja tendenciosa, dado que, para a análise do evento, pelo menos um dos integrantes deve ter conhecimento da aplicação do método RCA.

c) Terceiro Passo – Definir e estabelecer um propósito

A definição do problema deve iniciar na identificação do tipo de falha, se ela é crônica ou esporádica. Deve ser estabelecido um propósito para análise, delimitando a extensão da análise, por exemplo:

Propósito: identificar a causa raiz da quebra dos pinos no cilindro de desfibramento e estabelecer um plano de ação para eliminação destas quebras.

De maneira que: as ações identificadas para correção das falhas sejam efetivas e este problema possa ser definitivamente eliminado.

Para que: os custos com compra dos pinos sejam reduzidos, haja mais disponibilidade de máquina para produção e a empresa possa atender seus compromissos com os clientes.

- **Falha esporádica:** o evento ou falha esporádica é caracterizado como sendo algo que não é comum de ocorrer, por exemplo, quebra de um eixo de uma bomba, quebra de um rotor.

- **Falha crônica:** o evento ou falha crônica é caracterizado quando passou a ser algo comum de acontecer, já faz parte da cultura de operação do equipamento, por exemplo, toda partida de máquina é comum se ter falha na alimentação do sistema pneumático.

Para análise das falhas crônicas, deve ser realizado um gráfico identificando qual se apresenta com o maior número de ocorrências. Ao ser identificada a falha crônica com maior número de ocorrências, aplicar o método, utilizando todos os passos.

Para falhas esporádicas, seguir todos os passos do método, atentando-se para a coleta de dados no local no momento da ocorrência da falha.

d) Quarto Passo – Estruturar a Análise

Arquivar todas as informações de maneira que seja de fácil acesso, por exemplo, em um editor de apresentação, para expor ao time multidisciplinar. Pode ser montado em folhas de “*Flip-Chart*”, e após o término, deve ser alocado em um banco de dados, para consultas futuras. A sequência de montagem pode ser a mesma que é proposta no fluxograma da figura 14.

e) Quinto Passo - Análise do problema – Montagem da árvore dos porquês

N análise do problema ou falha na qual se identifica os fatores físicos, humanos e sistêmicos, deve ser utilizado o método proposto por Downing (2004), que sugere a utilização da árvore dos porquês, a qual, comparada com os demais métodos, é a mais objetiva e simples de ser utilizada. Esta tem seus passos de utilização definidos no trabalho.

f) Sexto Passo - Gerar soluções

No final de cada árvore dos porquês, são identificados os fatores físicos, humanos e sistêmicos que contribuíram para a ocorrência da falha.

Para cada fator, deve ser proposta uma solução; após identificar as soluções, elaborar o plano de ação para executar as ações.

Com as soluções encontradas, deve ser feito um FMEA para identificar as ações para serem aderidas ao plano de manutenção preventiva.

Com a utilização do método FTA (árvore de falha), elaborar uma árvore de falha com o fator físico, com o propósito de verificar a probabilidade de falha do item; caso tenha uma probabilidade alta de falha, deve ser avaliado o projeto.

g) Sétimo Passo - Priorização das soluções

A priorização das ações deve ocorrer caso haja várias ações a serem implementadas. O analista deve identificar o grau de dificuldade de implementação da ação e o impacto que pode causar.

h) Oitavo Passo - Planejamento de teste e execução da Solução

Com a apresentação dos fatores físicos da causa raiz, identificar a necessidade de realização de testes. Por exemplo, identificar o torque necessário para fixar um componente com um prisioneiro fora de padrão, deve ser solicitado teste com o prisioneiro na definição do torque correto para fixação do componente.

i) Nono Passo – Estabelecer metas de controle

Para estabelecer um controle devem ser avaliados as ações a serem implementadas, as quais podem sugerir que seja estabelecido um controle de uma eventual variável no processo e estabelecido limites mínimo e máximo. A verificação da eficácia das ações implementadas será realizadas a partir da definição de um intervalo de verificação após a implementação.

j) Décimo Passo – Identificar ganhos com a implementação

Os ganhos obtidos com o resultado da implementação das ações devem ser quantificados. Por exemplo, quantificar o tempo de máquina parada para reparo, o custo pelos componentes novos, entre outros fatores e comparar com as medidas “antigas”.

3.3 DISCUSSÃO DO MÉTODO

O fluxograma apresenta uma forma clara e objetiva de ser executado o RCA, mantendo o analista em sintonia com as fases do DMAIC, sem perde o foco da análise, sendo este um dos pontos fortes do fluxo em comparação com os demais apresentados.

Pode-se destacar a árvore dos porquês, sendo esta a forma de encontrar os fatores que causaram a falha, um dos pontos fortes do método.

Uma das grandes dificuldades de um analista é como identificar os fatores que podem causar as falhas, de uma forma simples e objetiva; a árvore dos porquês tem esta facilidade, não é complexa e nem requer um treinamento intensivo, apenas deve dispor de tempo para a validação das hipóteses.

O analista deve prever que os integrantes do grupo de análise sejam treinados no método de análise integrado, para que seja difundido entre os demais setores da empresa.

O método será demonstrado em uma aplicação na empresa objeto de estudo do trabalho, a qual permitiu que o trabalho fosse elaborado e aplicado em uma falha.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO INTEGRADO

Este capítulo trata da aplicação da ferramenta proposta, o método integrado de análise de falhas em uma empresa da indústria de não tecidos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Neste trabalho, será abordado como objeto de estudo o seguinte equipamento: um sistema chamado Compactador de Fibras, que tem a função de compactar a fibra para formar uma manta com densidade uniforme.

Equipamento – Compactador de Fibras

O equipamento de objeto de estudo, Compactador de Fibras, tem como função principal homogeneizar o material a ser utilizado no processo seguinte. Sua estrutura é composta de um silo com três exaustores pequenos, três cilindros de abertura e um duto principal de saída do material, com um sistema de transmissão com corrente e correias.

Seu funcionamento básico consiste na abertura do material e equalização da dosagem, de maneira contínua e homogênea, sem alteração de densidade. Para que o material preparado passe para o processo seguinte, tem que passar por duto retangular, de forma a compor uma manta na saída, a qual é transportada por uma esteira para a próxima etapa do processo.

O Compactador de Fibras é um equipamento crítico dentro do processo, pois, se ele parar, a produção da área também para completamente. É um equipamento que também afeta diretamente a qualidade do produto, pois é determinante para a dosagem do material e formação da manta.

4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE RCA INTEGRADO

De acordo com o método proposto no trabalho, será analisada uma falha que ocorreu em um equipamento que pertence à linha de produção do não-tecido, conformado por hidroentrelaçamento. O Compactador de Fibras, esquematizado na Figura 22, tem a função de compactar a fibra de maneira uniforme e equalizar a distribuição da fibra, de maneira que a densidade seja uniforme.

A falha ocasionou perda significativa pelo tempo de máquina parada e um alto custo de reparo do equipamento. Para a pesquisa-ação abordada na pesquisa, foi utilizada esta falha para aplicação do método.

A falha, ocorrida em 28/07/2011 no equipamento Compactador de Fibras, causou o rompimento das Dogas (régua metálica fixada no cilindro por meio de parafusos, com pinos fixados ao longo do comprimento da régua), que desprendem e direcionam o material do cilindro de dosagem para a formação da manta homogênea e uniforme para a entrada da carda.

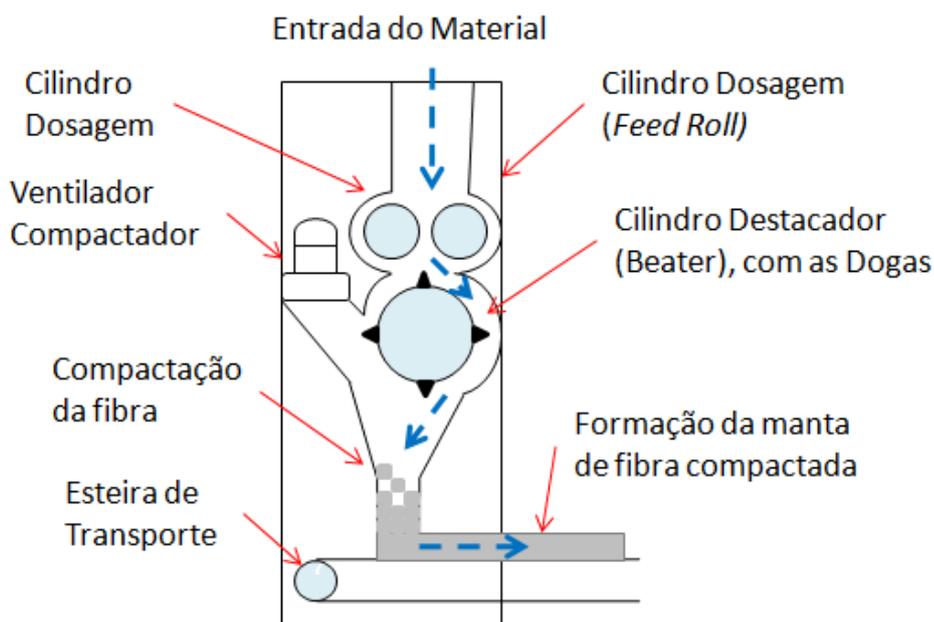


FIGURA 22- ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO COMPACTADOR DE FIBRAS
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

a) Primeiro Passo: Coleta e ordenação dos dados do evento

Coleta de evidências no local da falha:

- O local foi totalmente isolado, autorizada a entrada apenas a pessoas que pudessem contribuir para o relato do ocorrido sem interferências, o ambiente foi fotografado considerando todas as evidências da falha que se encontravam no local.
- Após as fotos tiradas do local, iniciou-se a desmontagem do equipamento por completo. Na desmontagem, foi retirado o restante das Dogas que estavam presas no cilindro e caídas sobre o cilindro.
- Todas as evidências do evento foram recolhidas em um local isolado para serem analisadas posteriormente.

Entrevista com os operadores e mecânicos:

- No local, foi entrevistado o operador presente que operava o equipamento no momento da ocorrência da falha.
- Foi entrevistado o mecânico que estava presente no turno no momento da ocorrência da falha.

Registros de produção e condições de operação do equipamento:

- As entrevistas resultaram em relatório com o registro das condições de operação que o equipamento apresentava no momento da falha.

Pesquisa nos manuais, desenhos, intervenções anteriores realizadas no equipamento:

- Coletaram-se os registros de intervenções e manutenção que ocorreram no equipamento antes da ocorrência da falha.

- Os manuais e desenho do equipamento foram levados para análise, na identificação de alterações e análise da adequação nas condições de operações segundo os padrões do equipamento.

Os dados e as evidências coletadas foram ordenados da seguinte maneira:

Equipamento

- Carenagem do cilindro “*Beater*” do lado esquerdo aberto (Figura 23, fotoA).
- Parafusos de fixação das Dogas com graus de dureza diferentes (8.8 e 12.9) e com comprimentos diferentes, entre 16 e 20mm.
- O sistema trabalha na compactação da fibra trabalho pressurizado pelos ventiladores com a função de dar uma densidade à manta formada.
- Pino de segurança do “*FeedRoll*” intacto (Figura 23, fotoE), lado direito.
- Trinco da trava da carenagem solto do lado esquerdo.
- Aumento da densidade do material na Alimentação.
- As Dogas utilizadas são nacionais (densidade do material das 8,3 Kg/dm³).
- Folga da carenagem e cilindro “*Beater*” de ± 10 mm
- Não foram encontrados no detector de metais, corpos estranhos junto com a fibra exceto casquilhos de massa plástica provenientes de reparo e material não identificado (sendo possível ser pedra) com aproximadamente 8 x 3 x 3 mm, cabeça de parafusos e pinos das Dogas quebrados.
- Inspeção feita debaixo da carda I; não encontrado material diferente da Doga.
- A pressão de trabalho não se mantinha constante, entre 0,8 a 6,0 mbar.
- Parafusos não fixados (frouxos).
- Doga entre o cilindro a carenagem (Figura 23, fotoD).
- Peça de Doga preso entre o cilindro e a proteção, um pedaço sobre a carenagem da carda I, um pedaço de Doga próximo ao Dobrador Véus.

- Pedaco de Doga no piso lado esquerda da Carda I, um pedaco de Doga no piso logo abaixo da escada da carda do lado direito.



FIGURA 23 - FOTOS DA OCORRÊNCIA DO EVENTO

- Canto da carenagem danificada (Figura 23, foto C).
- Parafusos sem trava química (Figura 23, foto B).
- Aproximadamente metade dos parafusos com a cabeça quebrada.

- Cabeça de parafuso quebrada com sinais de trinca, oxidação ate a metade (Figura 23, foto B).
- Encontrado massa plástica entre fibras retiradas do Compactador de fibras.
- Quebra de 80 a 90% dos pinos das Dogas (Figura 23, foto F).
- Face de apoio da Doga em contato com o cilindro Destacador não estava totalmente em contato (sujeira / fibra).

Pessoas:

- Barulho intenso (“rotativo”) no Compactador de fibras.
- No processo de parada da máquina, foi apertado o botão de reset e em seguida o de emergência.
- A carenagem do Compactador de Fibras possui posição correta da abertura, caso contrário choca com as Dogas.
- Carenagem danificada com marcas dos pinos somente na parte inferior.
- Condições normais de operação da máquina.
- Rotação de trabalho do cilindro “*Beater*” 1080 rpm.
- Não encontrado buchas / embuchamento no Compactador de fibras.
- TMS-01 trabalhando com 80%; se colocado 100% o mesmo esta desarmando o exaustor.
- Estava ocorrendo uma variação de pressão no Compactador de fibras e dependendo da fibra demorava a estabilizar.
- A porcentagem de velocidade de trabalho do rolo alimentação é de 10% com alimentação continua. O rolo alimentador quando solicita material sua velocidade chega a 70 %, quase vindo a embuchar fazendo um barulho muito alto no cilindro destacador.
- O volume de produção do produto que estava rodando era 39% maior que o volume médio de produtos, desde a última intervenção.

Registros:

- Última intervenção em 11/07, com troca do pino de segurança.
- Última parada para limpeza.
- Produção da carda com 620 Kg/hora.
- O gráfico da Figura 24 demonstra um aumento da produção nos últimos dias antes da ocorrência da falha em 39% (MCD índice de produção em Kg/horas).

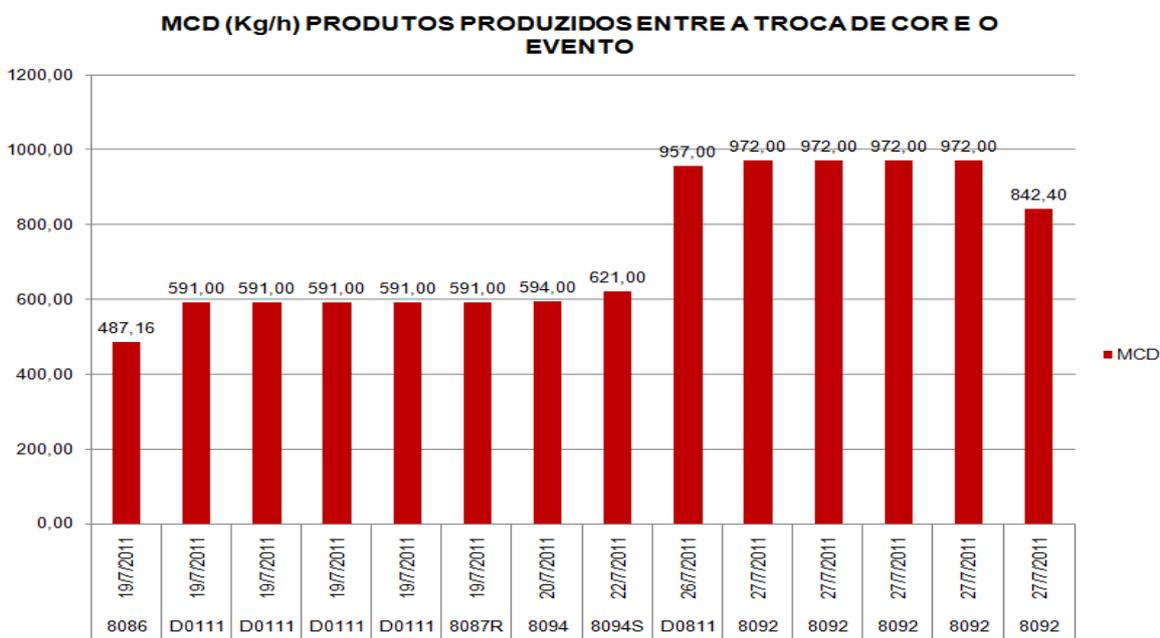


FIGURA 24 – GRÁFICO DE PRODUÇÃO

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

b) Segundo Passo: Definição do time multidisciplinar

Após a coleta dos dados e ordenação dos fatos, foi criada a equipe multidisciplinar para dar sequência na RCA. A equipe foi formada: um operador do equipamento, líder da área, um representante da engenharia, um representante do processo, um representante da manutenção e o mecânico do turno.

c) Terceiro Passo: Definir e estabelecer um propósito

Na definição do problema, deve ser entendido qual é a falha ou problema a ser estudada, quando o problema ocorreu, qual sua extensão e qual seu impacto.

Declaração do problema: quebra das Dogas no Compactador de Fibras, que ocorreu no dia 28/07/2011, em condições normais de operação; este problema tem impactado em perda de tempo de máquina parada e custo com substituição das Dogas de R\$ 31.100,00.

d) Quarto Passo: Estruturar a análise

Todas as informações identificadas e analisadas foram arquivadas em um sistema que permitisse sua recuperação para consulta futura. O analista deve promover uma apresentação para o time multidisciplinar, após a ordenação dos fatos, para ser estruturada a “Árvore dos Porquês”.

e) Quinto Passo: Análise do problema – Montagem da árvore dos porquês

A descrição da falha foi elencada no topo da árvore dos porquês, abaixo da descrição do evento foram colocadas as observações com maior correlação com o evento, de acordo com os dados coletados e organizados.

O time multidisciplinar identificou as hipóteses para cada observação, as hipóteses, são consideradas os modos de falha para as observações. Para cada hipótese identificada foi validada por meio de evidências (relatórios, fotos e outras fontes de dados coletada), que comprovaram a sua autenticidade com relação à causa do evento, seguindo o método de montagem da árvore dos porquês, até identificar os fatores físicos, humanos e sistêmicos. A Figura 25 e 26 demonstra a montagem da Árvore dos Porquês com todas as observações e hipóteses da análise da causa raiz da falha “Quebra das Dogas no Compactador”.

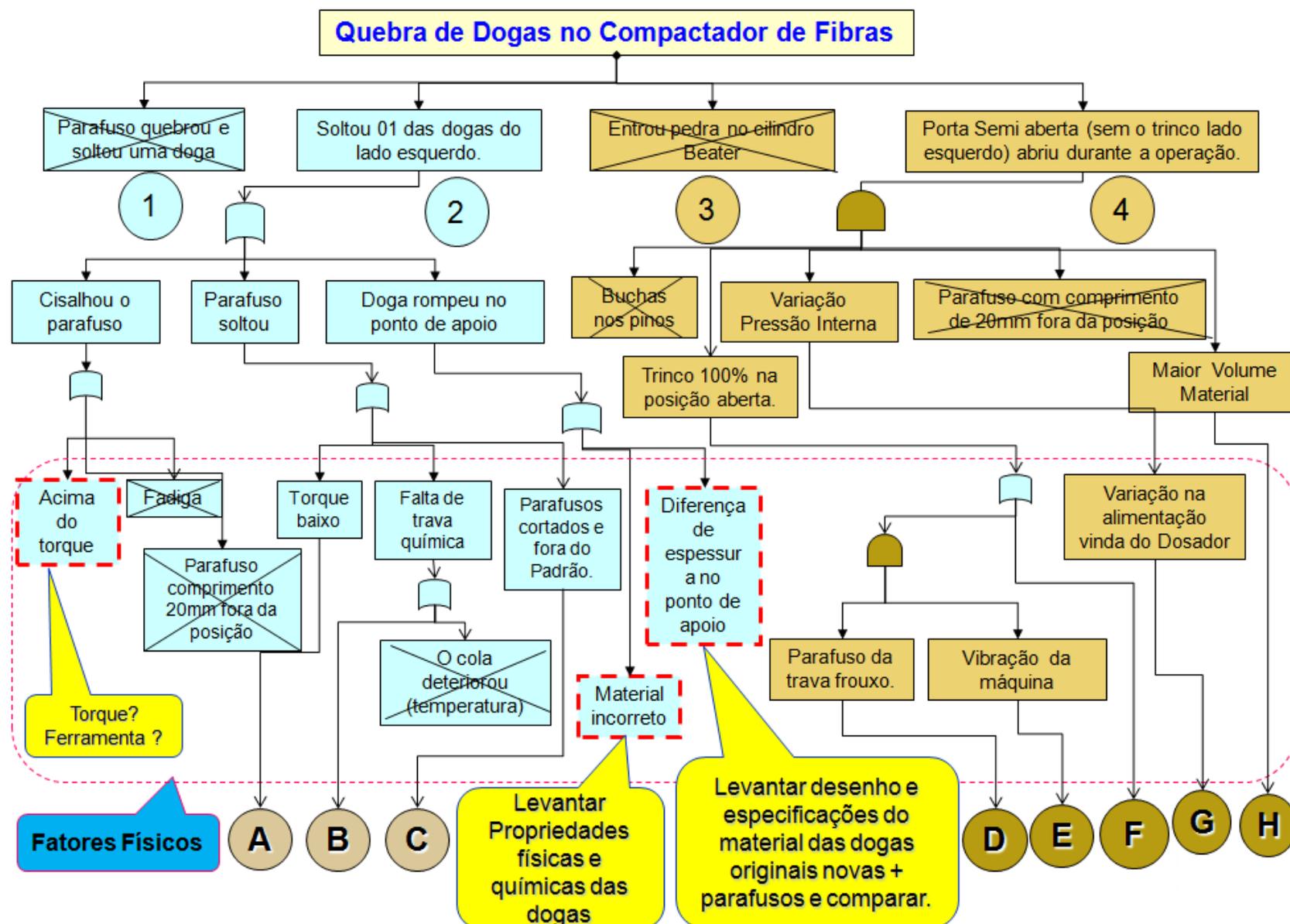


FIGURA 25 – ÁRVORE DOSPORQUÊS – PARTE 1

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

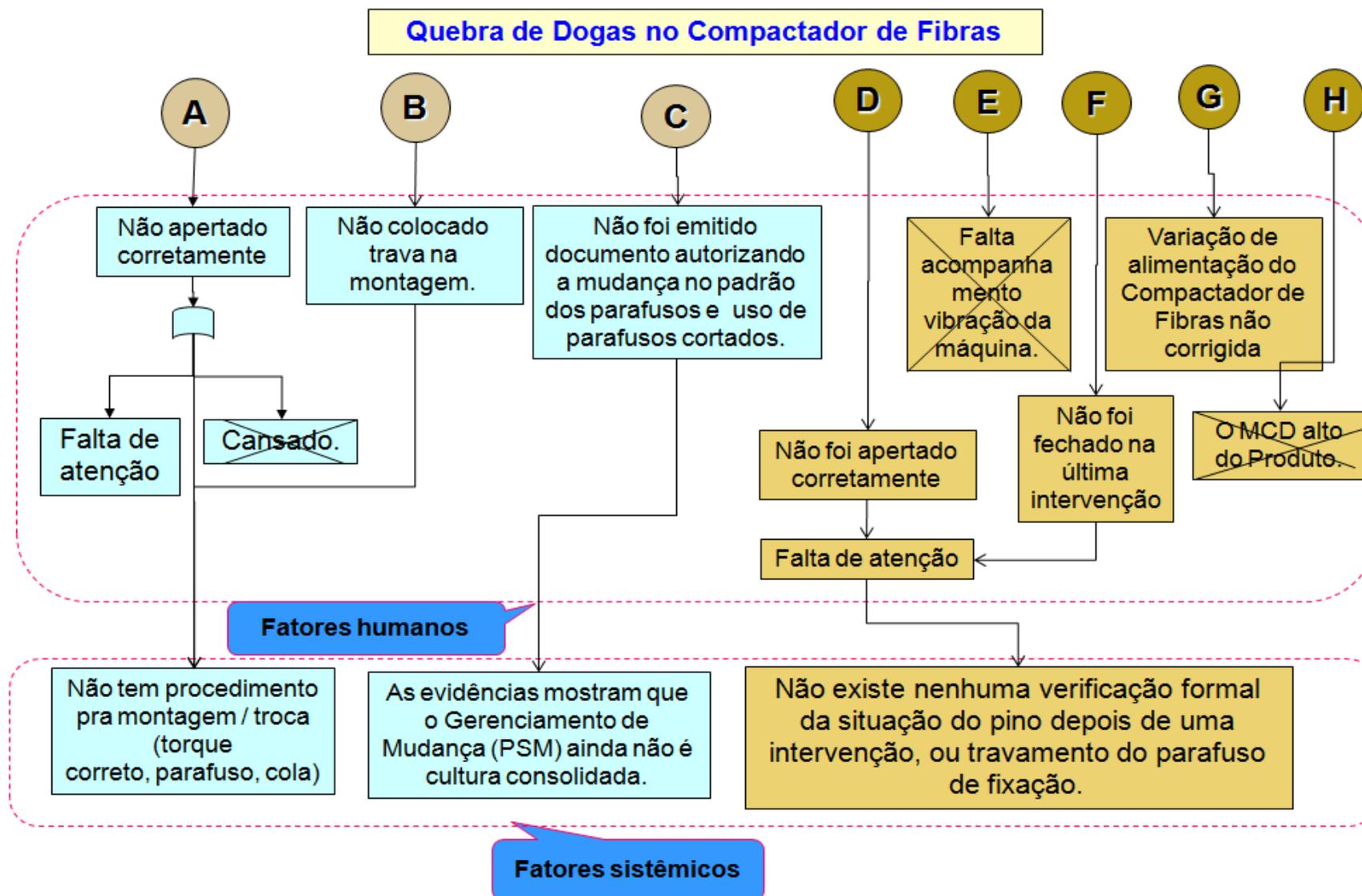


FIGURA 26 - ÁRVORE DOSPORQUÊS- PARTE 2(CONTINUAÇÃO)

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

A invalidação de hipóteses pode ocorrer dentro do processo de RCA, em função de não terem nenhuma probabilidade de terem contribuído como falha. Pode ocorrer invalidação de hipóteses elencada no início da árvore dos porquês, como também em fatores (físicos, humanos e sistêmicos) já identificados na árvore dos porquês, por não ter evidências que provem estes fatores.

Invalidação das Hipóteses da Árvore dos Porquês:

Hipótese 1: Parafuso se soltou e quebrou uma Doga. Não foram encontradas evidências suficientes que valide esta hipótese, não foi encontrado no cilindro evidências de rompimento que comprovassem que a cabeça de parafuso com sinais de trinca pudesse ter soltado e desencadeando a quebra das dogas.

Hipótese 3: Entrou pedra no cilindro destacador. O fragmento encontrado e identificado como parte de uma pedra ou material sinterizado é muito pequeno e não parece ser parte de um fragmento maior; além disso, não é material duro o suficiente para quebrar uma Doga.

Invalidação de Fatores Físicos

Fator físico 1 - Fadiga: não constatadas evidências de fadiga nos parafusos.

Fator físico 2 - Parafuso com comprimento de 20mm fora da posição: não foi evidenciado parafuso fora da posição.

Fator físico 3 - Cola deteriorou devido à temperatura: consultada, no fabricante e catálogo, a temperatura máxima de operação da cola, foi verificado que a temperatura de trabalho do sistema é abaixo da temperatura máxima da cola.

Invalidação de Fatores Humanos

Fator humano 1 - Mecânico Cansado: não foi evidenciado junto ao líder que o mecânico se encontrava cansado.

Fator humano 2 - A máquina não apresenta vibração além do normal: a hipótese da porta ter sido aberta pela combinação deste fator, com o fato do parafuso trava do trinco estar frouxo é quase nula em função do esforço que atualmente é exigido para se movimentar o trinco quando a porta está travada.

Fator humano 3 - O indicador de produção MCD (Kg/h) do produto, que estava rodando no dia do evento estava mais elevado, porém dentro dos limites de operação do equipamento.

Causa mais provável sem a qual o evento não teria ocorrido

A identificação da causa mais provável do evento esta na identificação dos fatores físico, humanos e sistêmicos, que foram identificados na RCA.

A carenagem basculante do Compactador de Fibras não foi fechada e travada corretamente. Com a entrada de produtos com MCD (Kg/h) mais elevado e variação de pressão ou quebra na fixação de um dos elementos do Compactador de Fibras, a mesma veio a se movimentar no sentido de abertura, fazendo com que os pinos das Dogas se chocassem contra ela. Como consequência, os pinos das Dogas foram quebrados, parafusos foram cisalhados e as Dogas vieram a se quebrar. Como o cilindro destacador não para de imediato ao se acionar emergência, algumas partes das Dogas acabaram sendo projetadas para fora do equipamento.

f) Sexto Passo: Gerar soluções

Soluções identificadas:

As seguintes soluções foram geradas para o processo em estudo:

- Colocar *interlock* no sistema de fechamento do Compactador de Fibras, de maneira que o sistema só ligue mediante o acionamento do sensor.
- Criar rotina para inspeção no trinco após uma intervenção ou uma intervenção para limpeza
- Elaborar um procedimento com a sistemática correta para troca das Dogas.
- Elaboração do FMEA e FTA do sensor de identificação de porta de limpeza aberta (Figura 27).

FMEA - SENSOR COM INDICAÇÃO DE PORTA FECHADA								
Função	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial	Severidade	Causa Potencial	Ocorrência	Deteção	RPN	Ações Recomendadas (Plano de manutenção)
Assegurar que a porta de limpeza do cilindro destacador esteja fechada com a máquina ligada	Rompimento do cabo do sensor	Porta de limpeza aberta	8	Quebra das dogas	10	5	400	Inspeccionar o cabo periodicamente
	Sensor com defeito (indicando que esta atuado)	Porta de limpeza aberta	9	Quebra das dogas	7	6	378	Definir o numero de atuações do sensor e trocar periodicamente
	Cabo do sensor com defeito indicando porta fechada	Porta de limpeza aberta	8	Quebra das dogas	10	4	320	Medir periodicamente a continuidade do cabo

FIGURA 27 – FMEA – SENSOR INDICAÇÃO DE PORTA FECHADA

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Com a elaboração do FMEA (Figura 27), as ações recomendadas foram incluídas no plano de manutenção preventiva.

Com a elaboração da árvore de falha (Figura 28), observou-se a condição de funcionamento do sensor e quem seria responsável pela sua atuação. O sensor vai ser atuado pelo trinco da porta que, no momento da falha, se encontrava apenas em um dos lados da porta.

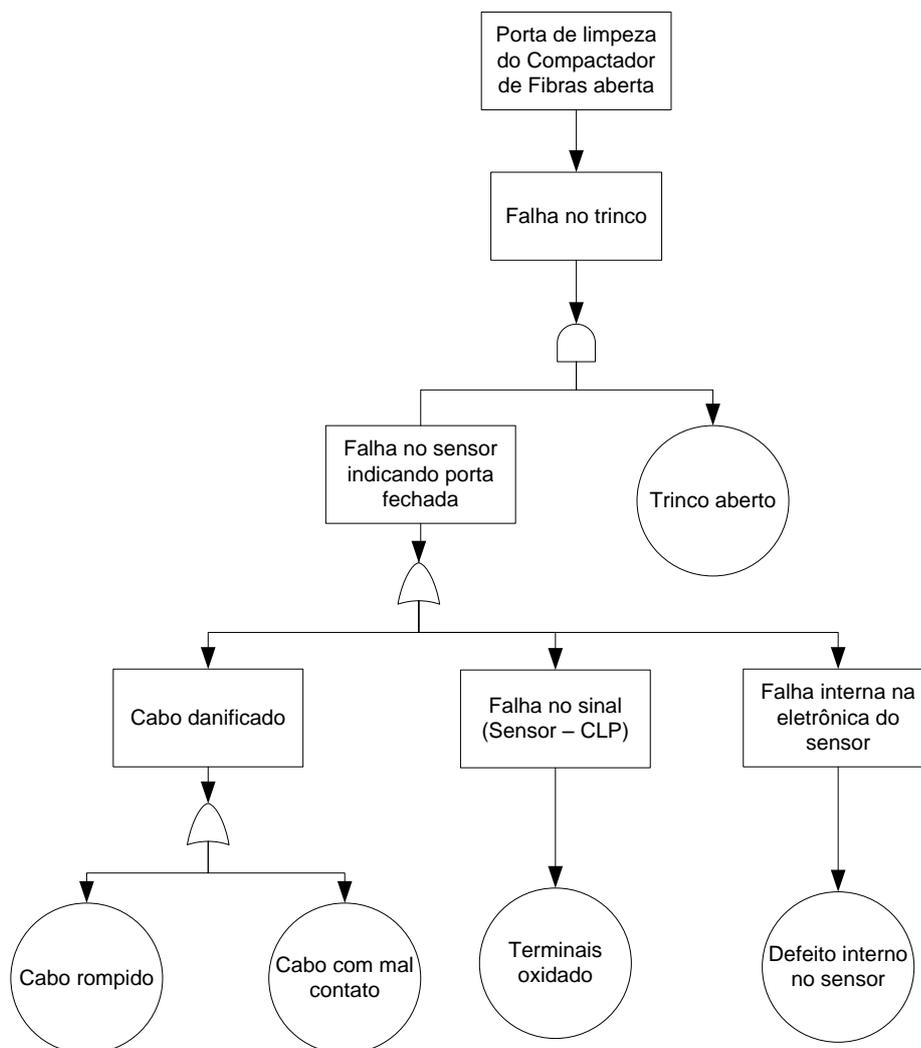


FIGURA 28 – ÁRVORE DE FALHA DO SENSOR

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Plano de Ação:

O seguinte Plano de Ação foi definido para as soluções apresentadas:

- Implementar uma inspeção periódica para assegurar que o trinco da porta esteja sempre fechado até que a instalação do sensor esteja concluída.
- Criar uma sistemática que assegure que o pino seja completamente fechado após uma intervenção (incluir *check list* pré-partida de máquina, sinal quando não devidamente fechado).
- Analisar o material das Dogas nacionais e importadas.
- Corrigir variação na alimentação do Compactador de Fibras.
- Criar um procedimento para troca e manutenção das Dogas no Compactador de Fibras, Misturador 1 e 2, Abridor 1, 2 e 3.
- Incluir no plano de preventiva as tarefas abordadas no FMEA e no FTA

g) Sétimo Passo - Priorização das soluções

Foi determinada pela direção da empresa a implementação de todas as ações do Plano de Ação.

h) Oitavo Passo - Planejamento de Teste e execução da Solução

A execução de teste seria necessária se os parafusos que fixam a Dogas não possuísem trava química em sua instalação. O teste a ser realizado seria a identificação do torque ideal para aperto das Dogas sem comprometer o sistema.

i) Nono Passo –Estabelecer metas de controle

Incluído “*check list*” de partida de máquina, que é composto de itens que são verificados após uma intervenção para a partida linha. O item aborda a verificação de que a porta do Compactador de Fibras está totalmente fechada.

A determinação da empresa é que será verificada a implementação de todas as ações após um período de quatro meses.

j) Décimo Passo – Identificar ganhos com a implementação

Com a identificação dos fatores principais da causa da falha, foi computado o ganho com a ocorrência, sendo esta evitada em: Horas de máquina parada, Dogas importadas, custo da mão de obra para instalar as Dogas, que, somados, constituem um ganho de aproximadamente R\$ 50.000,00.

4.3 DISCUSSÃO DA APLICAÇÃO

A aplicação do método de análise de falhas integrado mostrou-se de grande objetividade na resolução da falha apresentada no trabalho. Observou-se que, no decorrer da análise, não houve dúvidas de quais passos deveriam ser seguidos.

O analista deve ter em mente que deve disponibilizar grande parte do tempo da análise na coleta de dados e na definição do problema, ficando claro o objetivo da análise.

O uso das evidências coletadas no ato do evento é primordial na análise inicial, para levantar as observações que estão relacionadas com o evento.

Como se pode observar na análise abordada no trabalho, a preservação do local do evento permitiu que fosse fotografada a proteção, que estava aberta em uma das extremidades, a qual não possuía o sensor indicando que a proteção estava fechada.

Durante a análise, foi questionado se o trinco estava aberto ou fechado. Analisando a foto e verificando o local, foi possível assegurar que o trinco

estava aberto, assim intensificando a necessidade da preservação do local e das evidências do evento.

O analista não deve permitir que as evidências do local do evento sejam destruídas antes de serem catalogadas e fotografadas. Em certos casos, é necessário que as evidências sejam enviadas para uma análise mais minuciosa, por exemplo, uma análise metalográfica em um eixo de uma bomba que se rompeu durante a operação.

Deve-se dispor do tempo necessário para coletar as evidências que comprovem as hipóteses levantadas. Se a hipótese não for possível de ser validada, o analista deve deixá-la e trabalhar com outra.

Todas as evidências devem ser preservadas até o final da análise; pode ser necessário resgatá-las, para serem apresentadas novamente.

O analista deve assegurar que as ações e recomendações sejam executadas, mesmo não sendo responsável pela execução.

O método desenvolvido busca a identificação dos fatores que contribuíram para a falha e validando as hipóteses ou modos de falhas identificados mediante as observações levantadas na coleta de dados.

A validação da hipótese ou modo de falha é considerada um grande ganho de uma análise, à medida que se prova algo com evidências, tornando a análise mais robusta.

À medida que se caminha na investigação, com as hipóteses validadas, assegura-se que a análise identificará os fatores da causa raiz da falha com maior contribuição para a ocorrência do evento.

A Tabela 10 apresenta os passos identificados como primordiais na execução do método integrado.

TABELA 10 – PASSOS DO MÉTODO INTEGRADO DE ANÁLISE DE FALHAS

D (Iniciação)	Primeiro passo- Coleta e ordenação dos dados do evento Segundo passo - Definição do time multidisciplinar	DMAIC e RCA
M (Planejamento)	Terceiro passo – Definir e estabelecer um propósito	DMAIC e RCA
A (Execução)	Quarto passo – Estrutura do evento Quinto Passo - Análise da falha - aplicação da árvore do porque	RCA
I (Finalização)	Sexto passo - Gerar soluções Sétimo passo - Priorização das soluções Oitavo passo - Planejamento de teste e execução da solução	FMEA e FTA
C (Controle)	Nono passo – Estabelecer metas de controle Décimo Passo – Identificar ganhos com a implementação	DMAIC

5 CONCLUSÕES

Na busca de equipamentos mais confiáveis, com maior disponibilidade, na ciência de que as falhas podem ser eliminadas, o uso de ferramentas eficazes na identificação da causa raiz da falha é essencial para evitar a reincidência da mesma para a elaboração das ações preventivas.

As ferramentas de análise de falhas utilizadas, em geral, são eficazes na aplicação específica, nem sempre assegura que todos os passos estejam integrados na resolução das falhas.

Retomando ao objetivo do trabalho em propor um método de análise de falhas integrado utilizando as ferramentas RCA, FTA, FMEA e DMAIC, demonstrou-se que os passos propostos no fluxo do método são de fácil aplicação e com objetivos claramente definidos, proporcionando fácil entendimento do método.

A integração das ferramentas de análise de falhas ocorre no fato da identificação do momento exato da aplicação da ferramenta, ou seja, o uso da ferramenta certa no momento certo, o que proporciona ao método mais simplicidade de execução e clareza nos passos de utilização.

De maneira geral o método de análise de falhas integrado, desenvolvido neste trabalho aplicado em uma pesquisa-ação, demonstrou ser mais eficaz na identificação dos fatores físicos, humanos e sistêmicos da causa raiz da falha, bem como conduzir o processo de implementação e na elaboração das ações preventivas.

O método desenvolvido assegura que, quando analisada a falha com todos os passos, pode-se identificar os fatores físicos, humanos e sistêmicos, com maior contribuição para a ocorrência da falha.

A identificação dos fatores físicos, humanos e sistêmicos causadores da falha são primordiais em uma análise de falha, sendo identificados são propostas

ações preventivas que podem ser executadas evitando que a falha volte a ocorrer.

As ações providas para a contenção da reincidência da falha devem ser migradas para o plano de manutenção preventiva, visto que o método identifica as tarefas a serem realizadas para a prevenção da reincidência da falha, em função da aplicação da ferramenta FMEA.

Os programas de manutenção contêm informações dos equipamentos que, quando são consistentes no quesito frequência, componente e procedimento, proporcionam o atendimento do objetivo do programa, que é retornar o equipamento às condições originais de funcionamento.

Para trabalhos futuros, com base no método integrado, propõem-se estudos para a criação de programas de computador que sejam capazes de sistematizar o método, condicionando, em um único banco de dados, todo o sistema, possibilitando avaliar o equipamento quanto a sua confiabilidade de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELE, E., MEYER, T., NÄHER, U., STRUBE, G., SYKES, R.; Global Production – A Handbook for Strategy and Implementation, 1sted., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

ABRAMAN, Associação Brasileira de Manutenção. A situação da manutenção no Brasil – Documento Nacional – 2011.

ABINT, *Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos*. Coletânea de Normas de Não tecidos. São Paulo, 2010. 210p.

AFFONSO, L. O. A.; *Equipamentos Mecânicos: Análise de Falhas e Solução de Problema*. 2^a ed., Rio de Janeiro:Qualitymark, 2006.

AGUIAR, S. Integração das Ferramentas da Qualidade ao PDCA e ao Seis Sigma. Belo Horizonte, MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2002. 234 p.: il.

ALMEIDA, D. A., OLIVEIRA, U. R.; PAIVA, E. J. 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*, v. 20, n. 1, p. 77-91, 2010.

ALMEIDA, D. A. e FAGUNDES, L. D. Aplicação da Gestão de Conhecimento no Mapeamento de Falhas em Concessionárias do Setor Elétrico. *Revista Produto e Produção*, v8, p.63-79, 2005.

AL-MISHARI, S. T.; SULIMAN, S. Integrating Six-Sigma with other Reliability Improvement Methods in Equipment Reliability and Maintenance Applications. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 14, n.1, p. 59-70, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: *Confiabilidade e Manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994.

BALASUBRAMANIAN, P. Root Cause Analysis-Based Approach for Improving Preventive /Corrective Maintenance of an Automated Prescription-Filling System. New York: Master of Science in Industrial and Systems Engineering. The Graduate School of Binghamton University, 2009.

BARRETO, R. M. *Análise dos fatores de mudança na DHL Global Forwarding pelo Lean Seis Sigma*. 2010 218f. Dissertação (Mestrado: Gestão em Negócios) Universidade Católica de Santos, Santos, 2010.

BO, G.; SHENG, D. H.; YAN, Y. *Failure Knowledge Diagnosis Model Based on the Integration of FMEA and FTA*. International Conference on Control, Instrumentation and Automation, 2011.

BORBA PRÁ, E. A. *Manutenção Industrial sob a Perspectiva da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) em uma Empresa da Área de Compressores Herméticos*. 2010. Dissertação (Mestrado: Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville - SC, 2010.

CAMPOS, V.F. *Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia*. BeloHorizonte, MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2002,278 p.

CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLATO, M. A.; *Fadiga:Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço*. 1ª.ed., Estados Unidos da América, Ed. CreateSpace, 2011, 578 p.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action research for operations management.*International Journal of Operations& Production Management*, v. 22, n.2, p.220-240, 2002.

DOWNING, M. W.*Root-Cause Failure Analysis: Maintenance and Reliability Best Practice*. Plant Engineering. Dupont, 2004.

EDANA. International Nonwovens Symposium, EDANA- European Disposables and Nonwovens Association, Roma, 4 a 5 de julho, 2003.

FERNANDES, C. G., *Metodologia para Melhorar a Confiabilidade de Subsistemas Através de Análise de Falhas e Testes Acelerados*. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Produção, 2010. (Dissertação: Mestrado em Engenharia Produção).

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*.2ªed., Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2009.

HAGEL, R., *Estudo de Sistemas Filtrantes de ar de Processo Industrial, na Fabricação de Não tecidos*. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFRGS, 2010 (Dissertação: Mestrado em Engenharia Química).

HAVIARAS, G. J. *Metodologia para análise de confiabilidade de pneus em frotas de caminhões de longa distância*.Poli, USP, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Automotiva, 2005. (Dissertação: Mestrado em Engenharia Automotiva).

HELMAN, H.; ANDERY, P. R.P.; *Análise de Falhas – Aplicação dos Métodos de FMEA e FTA*. Belo Horizonte: Editora Fundação Cristiano Ottoni, 1995.

HEUVEL, L. N. V. e ROONEY, j. j., *Root Cause Analysis for Beginners* Quality Progress, July 2004.

KATZEL, J., Root-Cause Failure Analysis: An Often-Overlooked Key to Improving Equipment Performance. *Plant Engineering*, v.50, p.138, 1996.

LAFRAIA, J. R. B.; Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEAL, F., FAGUNDES, L. D. e ALMEIDA, D. A., Metodologia de gestão de falhas para empresas do setor elétrico. XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Florianópolis, SC, Brasil, 03 a 05 de novembro de 2004.

LEAL, F.; PINHO, A.F.; ALMEIDA, D.A. Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da teoria Grey. *Revista Gestão Industrial*, Ponta Grossa, PR, v.2, n.1, p.79-88, 2006.

Li, D.; GAO, J. Study and application of Reliability-centered Maintenance considering Radical Maintenance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.23, n.5, p. 622-629, 2010.

LIMA, P. F. A.; FRANZ, L.A.S.; AMARAL, F.G. Proposta de Utilização do FTA como Ferramenta de Apoio ao FMEA em uma Empresa do Ramo Automotivo. Anais do XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 06 a 08 de novembro de 2006.

LUCATELLI, M. V.; OJEDA, R. G. Proposta de Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde. Memórias II Congresso Latinoamericano de Ingenieria Biomédica - Habana, Cuba, 23 a 25 de Maio de 2001.

MÁRQUEZ, A., DE BONA, J., ALIJA, A. Failure analysis of a blower fan at a petrochemical plant. *Engineering Failure Analysis*, v.16, n.7, p. 2417-2426, 2009.

MIGUEL, P. A. C.; Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Revista Produção*, v.17, n. 1, p.216-229, 2007.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N.L.; Manutenção: Combate aos Custos da Não-Eficácia a Vez do Brasil. Makron Books, 1993.

MOBLEY, R. K. Root Cause Failure Analysis. Butterworth-Heinemann, 1999, 325p.

MORAES, P. H. A., Manutenção Produtiva Total: Estudo de Caso em uma Empresa Automobilística. Taubaté: Programa de Pós-Graduação em Gestão e Desenvolvimento Regional do Departamento de Economia, Contabilidade e Administração, 2004. (Dissertação: Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional).

MOREIRA, L. A. C. F., Aplicação Veicular da Manutenção Centrada em Confiabilidade. São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Automotiva, POLI, USP, 2010 (Dissertação: Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva).

MOUBRAY, J. Reliability-Centred Maintenance. 2nd.Ed, Butterworth-Heinemann Ltd, 1998, 448p.

OLIVEIRA, L. L.; Pesquisa-ação: uma introdução metodológica. *Revista Educação e Pesquisa* – SP, v.31, n.3, p.443-466, 2005.

OTANI, M. e MACHADO, W. V.; A Proposta de Desenvolvimento de Gestão da Manutenção Industrial na Busca da Excelência ou Classe Mundial. *Revista Gestão Industrial*, v. 04, n. 02, p. 01-16, 2008.

PALAFY, P. FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. Instituto IMAM, 2004.

PALLEROSI, C., Confiabilidade, A quarta dimensão da qualidade. Vol. I Manutenibilidade e Disponibilidade. ReliaSoft Brasil, 2007.

PANDE, P.; NEUMAN, R.; CAVANAGH, R. Estratégia Six Sigma: como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando o seu desempenho. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PARIS, W. S. Proposta de uma Metodologia para Identificação de Causa Raiz e Solução de Problemas Complexos em Processos Industriais: Um Estudo de Caso. Curitiba: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2003 (Dissertação: Mestrado em Engenharia de Produção).

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. *Manutenção – Função Estratégica*. 2ed. - Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; LA FUENTE, D. de. A Decision Support System for Applying Failure Mode and Effects Analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.19, n.2, p.137-150, 2002.

RANSOM, D. L.; A practical guideline for a successful root cause failure analysis. Proceedings of the Thirty-Sixth Turbomachinery Symposium, p.149-155, 2007.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. 2ª Ed., New York: John Wiley & Sons, 2004, 636p.

REIS, M. E. P. e ALVES, J. M.; Proposta de um método de utilização do DMAIC para se diminuir o tempo de Setup. In Anais do 4º. COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Pedro-SP, 15 a 18/04, 2007.

REWALD, F.G., Tecnologia NT. São Paulo, 1988. 63p.

ROONEY, J. J.; VANDEN HEUVEL, L. N. Root Cause Analysis For Beginners. *Quality Progress*, v.37, n.7, p. 45-53, 2004.

SALGADO, M. F. P.; Aplicação de Técnicas de Otimização à Engenharia de Confiabilidade. 2008. Dissertação (Engenharia de Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.

SHARMA, R. K. e SHARMA, P.; Methodology and Theory System Failure Behavior and Maintenance Decision Making Using RCA, FMEA and FM. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. v.16, n. 1, p. 64-88, 2010.

SICA, O.; OLIVEIRA, B. S. Modelagem da Confiabilidade a Partir de Informações Qualitativas e Obtidas Junto à Equipe de FMAE. Anais do XXX ENEGEP – São Paulo, SP, Brasil, 12 a 15 de outubro de 2010.

SIMÕES, S. F.; Análise de Árvore de Falhas Considerando Incertezas na definição dos Eventos Básicos. Rio de Janeiro: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2006 (Tese: Doutorado em Engenharia Civil).

SIQUEIRA, I. P.; Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação. Editora QualityMark. 1ª ed., 2009.

SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON, R. Administração da Produção. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SOUZA, J. B.; MARÇAL, R. F. M. Reliability Centered Maintenance (RCM) e Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): uma reflexão teórico-analítica. Anais do XVI SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 08 a 10 de novembro de 2009.

SOUZA, P. F.; CHAVES, S. G.; CRUZ, R. A. R.; LIMA, E. E. e SILVA, V. R. Uso de Manutenção Produtiva Total para Redução de Percas no Processo

Produtivo. Anais do XVIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 08 a 10 de novembro de 2010.

SOUZA, R. D. Análise da Gestão da Manutenção Focando a Manutenção Centrada na Confiabilidade: Estudo de Caso MRS Logística. Juiz de Fora: Graduação em Engenharia Produção, 2008. (Monografia: Graduação em Engenharia de Produção).

SOUZA, R. Q.; ALVARES, A. J.; FMEA and FTA Analysis for Application of the Reliability Centered Maintenance Methodology: Case Study on Hydraulic Turbines. ABCM Symposium Series in Mechatronics, v.03, p.803-812, 2008.

TAKAIAMA, M. A. S. Análise de Falhas Aplicada ao Planejamento Estratégico da Manutenção. 2008. 57f. Dissertação (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.

XIAO, N.; HUANG, H.Z.; LI, Y.; HE, L.; JIN, T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, v.18, n.4, p.1162-1170, 2011.

WUTTKE, R. A. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Revista Produção On Line* - ISSN 1676 - 1901 / v. VIII, n. IV, 2008 - RS.

ZAIONS, D. R. Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma Planta de Celulose e Papel. Porto Alegre: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2003 (Dissertação: Mestrado em Engenharia de Produção).