

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

DOUGLAS MURILO FORNAZARI

**MANUTENÇÃO INDUSTRIAL – ANÁLISE E CONSTRUÇÃO DA
ÁRVORE DE FALHAS (FTA) DE UM COMPRESSOR GA 75 W ATLAS
COPCO APLICADO NA INDÚSTRIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

DOUGLAS MURILO FORNAZARI

**MANUTENÇÃO INDUSTRIAL – ANÁLISE E CONSTRUÇÃO DA
ÁRVORE DE FALHAS (FTA) DE UM COMPRESSOR GA 75 W ATLAS
COPCO APLICADO NA INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do Departamento
de Mecânica, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo
Vasconcelos de Carvalho

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE E CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS (FTA) DE UM
COMPRESSOR GA 75 W ATLAS COPCO APLICADO NA INDÚSTRIA**

por

DOUGLAS MURILO FORNAZARI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 14 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Orientador

Prof. Dr. Davi Fusão
Membro Titular

Prof. Me. Francisco Emílio Dusi
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

RESUMO

FORNAZARI, Douglas Murilo. **Manutenção Industrial – Análise e construção da árvore de falhas (FTA) de um compressor GA 75 W Atlas Copco aplicado na indústria.** 2018. 81. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2018.

Este trabalho consiste no desenvolvimento e construção da Árvore de Falhas de um compressor industrial de grande porte, utilizando literaturas da área de manutenção, manuais da máquina, experiência de profissionais *in loco* e o software *lucidchart* que permite desenvolver o diagrama lógico das falhas. Esta é uma ferramenta de gestão da confiabilidade para garantir disponibilidade e melhorar a manutenibilidade, proporcionando melhores indicadores de custos e performance da manutenção.

Palavras-chave: Manutenção. Compressor. Árvore de Falhas. *Lucidchart*

ABSTRACT

FORNAZARI, Douglas Murilo. Industrial Maintenance - Fault tree analysis and construction (FTA) of a GA 75 W Atlas Copco compressor applied in the industry. 2018. 81. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Federal Technology University – Paraná. Ponta Grossa, 2018.

This work consists of the development and construction of Fault Tree of a large industrial compressor, using literature from the maintenance area, machine manuals, experience of professionals in loco and software lucidchart that allows developing the logical diagram of the failures. This is a reliability management tool to ensure availability and improve maintainability, providing better cost indicators and maintenance performance.

Keywords: Maintenance. Compressor. Fault Tree. Lucidchart

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Compressor industrial.....	13
Figura 2 – Compressores em paralelo.....	13
Figura 3 – Manutenção corretiva não planejada.....	21
Figura 4 – Curva do tempo médio de falha	23
Figura 5 – Desempenho esperado com a manutenção preventiva.....	24
Figura 6 – Desempenho esperado com a manutenção preditiva.....	26
Figura 7 – Manutenção detectiva.....	27
Figura 8 – Tipos de manutenção	29
Figura 9 – Resultado x Tipos de manutenção	29
Figura 10 – MBT x MBC	31
Figura 11 – Casa da manutenção produtiva total	32
Figura 12 – Gestão estratégica.....	36
Figura 13 – Ferramentas gestão estratégica	37
Figura 14 – Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade	38
Figura 15 – Diagrama de processo RCM.....	41
Figura 16 – Formulário de análise de causas raízes de falha	45
Figura 17 – Principais passos RCA	46
Figura 18 – Aplicação FTA sistema de abastecimento de água.....	47
Figura 19 – Formulário FMEA	51
Figura 20 – Modos de falha	49
Figura 21 – Compressor GA 75 W	53
Figura 22 – Evento topo	55
Figura 23 – Subsistemas	55
Figura 24 – Diagrama de blocos	56
Figura 25 – Simbologia FTA	57
Figura 26 – Simbologia FTA utilizada	58
Figura 27 – Árvore de falhas incompleta	58
Figura 28 – Elementos de transferência e portas lógicas	59
Figura 29 – Diagrama lógico	60
Figura 30 – Níveis	61
Figura 31 - <i>Cutset</i>	61

Figura 32 – Janela típica do <i>Software lucidchart</i>	62
Figura 33 – Árvore de falhas completa do Compressor GA 75 W	63
Figura 34 – Níveis do sistema	64
Figura 35 – Evento topo da árvore	64
Figura 36 – Subsistemas do sistema	65
Figura 37 – Terceiro nível do elemento compressor	66
Figura 38 – <i>Cutset</i> elemento compressor completo	67
Figura 39 – Terceiro nível da lubrificação	68
Figura 40 – <i>Cutset</i> lubrificação completo	68
Figura 41 – Terceiro nível do condicionamento de ar	69
Figura 42 – <i>Cutset</i> condicionamento de ar completo	70
Figura 43 – Terceiro nível quadro de comandos elétricos	71
Figura 44 - <i>Cutset</i> quadro de comandos elétricos completo	71
Figura 45 – Terceiro nível instrumentação	73
Figura 46 – <i>Cutset</i> instrumentação completo	73
Figura 47 – Terceiro nível do sistema de segurança	74
Figura 48 – <i>Cutset</i> sistema de segurança completo	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução da manutenção	19
Tabela 2: Implatação da TPM	33
Tabela 3: Manutenção tradicional x MCC.	40
Tabela 4: Passos RCA	43
Tabela 5: Porquês Análise de causa raíz	44
Tabela 6: Comparação FTA x FMEA 1	52
Tabela 7: Comparação FTA x FMEA 2	52
Tabela 8: classificação das funções	56
Tabela 9: Simbologia utilizada no elemento compressor.....	67
Tabela 10: Simbologia utilizada na lubrificação	68
Tabela 11: Simbologia utilizada no condicionamento de ar	70
Tabela 12: Simbologia utilizada no quadro de comandos elétricos	72
Tabela 13: Simbologia utilizada na instrumentação	74
Tabela 14: Simbologia utilizada no sistema de segurança	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise do Tipo e Efeito da Falha)
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> (Análise da Árvore de Falhas)
RCFA	<i>Root Cause Failure Analysis</i> (Análise da Causa Raiz da Falha)
RCM	<i>Local Area Network</i>
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
TPM	<i>Time Based Maintenance</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	15
2.1.1 Premissas iniciais.....	15
2.1.2 Evolução da manutenção.....	17
2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO E TENDÊNCIAS.....	20
2.2.1 Manutenção corretiva.....	20
2.2.2 Manutenção preventiva	22
2.2.3 Manutenção preditiva	25
2.2.4 Manutenção detectiva	27
2.2.5 Engenharia de manutenção	28
2.3 GESTÃO DA MANUTENÇÃO.....	30
2.3.1 Manutenção produtiva total ou Total Productive Maintenance (TPM)....	31
2.3.2 Pessoas e equipes. O fator humano na manutenção	34
2.3.3 Planejamento estratégico	35
2.4 CONFIABILIDADE	37
2.4.1 Análise de Causa Raíz (RCA).....	42
2.4.2 Análise da Árvore de Falhas (AAF) ou Failure Tree Analysis (FTA)	46
2.4.3 Análise de Modos de Falhas e Efeitos ou Failure Mode And Effect Analysis (FMEA).....	49
2.4.4 A Relação entre A FTA e a FMEA	51
3 METODOLOGIA	53
3.1 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA).....	54
4 RESULTADOS	63
4.1 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA).....	64
4.1.1 Elemento compressor	66
4.1.2 Lubrificação.....	68
4.1.3 Condicionamento do ar.....	69
4.1.4 Quadro de comandos elétricos	71

4.1.5 Instrumentação	72
4.1.6 Sistema de segurança	74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A – Ar Comprimido Utilidades - FTA Compressor GA 75 W Atlas Copco	81

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de um país está atrelado à indústria. A manutenção industrial é fundamental no planejamento estratégico para o êxito de uma companhia em qualquer área de atuação. A manutenção tem sido envolvida para melhorar a eficiência do setor produtivo através do treinamento, como ferramentas de apoio e transferência de tecnologia. Assim, políticas e o desenvolvimento de melhores práticas de manutenção precisam ser formuladas.

O setor da manutenção é um dos responsáveis diretos pelo desempenho da produção, considerando que se as máquinas, pelas quais são realizados os processos produtivos, não estiverem em condições de funcionamento contínuo e constante, não há como programar as atividades da empresa nem prever seus indicadores e resultados, evidenciando que é mais viável economicamente manter determinada máquina funcionando do que parar a produção ou o processo aonde haja manutenção envolvida.

O custo anual de manutenção pode chegar até 15% do faturamento para empresas de manufatura, 20% a 30% para a indústria química e 40% para indústrias de ferro e aço, mostrando a importância diante dos valores significativos. A manutenção deve ser observada com seriedade, diante da gama de variáveis e ativos englobados (BANERJEE & FLYNN, 1987).

Com o tempo a atividade de manutenção avançou muito, tecnologicamente. Com a indústria da aviação começaram a surgir técnicas avançadas de manutenção para aprimorar cada vez o produto e adequar as exigências. O desenvolvimento de novas tecnologias de manutenção e a organização de programas adequados têm se tornado cada vez mais importantes para aumentar a produção e a eficiência econômica.

A Manutenção Centrada na Confiabilidade conta com ferramentas como a Árvore de Falhas. Neste caminho, em uma máquina, é possível entender e prever falhas que ainda não ocorreram, ou falhas em potencial, podendo agir na eminência da falha previamente, obtendo muitos benefícios e melhorias decorrentes disso na indústria em geral.

A Análise e construção da Árvore de Falhas foi desenvolvida e aplicada em um compressor de ar de grande porte, instalado no ambiente industrial, em uma indústria de embalagens dos campos gerais. Na figura 1, um exemplo de compressor industrial, semelhante ao utilizado no trabalho.



Figura 1 – Compressor industrial.
Fonte: Autoria Própria.

Na figura 2, um conjunto de compressores instalados para funcionar em paralelo, como é normalmente utilizado em instalações industriais que possuem dois ou mais compressores



Figura 2 – Compressores em paralelo.
Fonte: Autoria Própria.

1.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar a ferramenta FTA em um compressor industrial. Elaborar, através de um *software* o diagrama que representa a Árvore de Falhas do equipamento para auxiliar equipes de manutenção nas intervenções necessárias em compressores, para melhorar os indicadores e o desempenho da área.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Analisar o compressor e o cenário de operação determinando os parâmetros necessários;
- Entender a simbologia e os sinais utilizados para construir a FTA do compressor em um diagrama lógico;
- Utilizar o *software* e construir a Árvore de falhas definitiva;
- Imprimir a FTA em um quadro instalado junto à máquina;
- Disseminar o aprendizado com material de base para treinamento de equipes de manutenção desta área.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para uma compreensão mais profunda do papel dos ativos no mundo dos negócios, é preciso pensar que qualquer ativo físico é colocado em serviço porque alguém quer que ele execute alguma função devido a sua grande importância no cenário da cadeia de produção. A produção de ar comprimido utilizado em processos industriais está presente em boa parte das indústrias de todas as áreas e tem muitos custos envolvidos. A proposta deste trabalho vem de encontro à essa necessidade, aplicando uma ferramenta de confiabilidade no compressor que mapeia suas falhas prevendo e evitando paradas de produção, aumentando a disponibilidade para melhorar os indicadores de manutenção e custos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho. As fontes e citações utilizadas aqui servirão de base para a análise e conseqüentemente construção da Árvore de falhas do compressor GA 75 W, foco do desenvolvimento deste trabalho.

O referencial teórico aqui descrito, será desenvolvido em três pilares. O primeiro deles descreve a parte técnica. O segundo pilar trata a parte gerencial da manutenção industrial e por fim no terceiro pilar que discorre sobre confiabilidade e suas aplicações para melhores práticas de manutenção e melhoria de indicadores e disponibilidade.

2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

As organizações industriais consideram ações de manutenção como uma das suas atividades mais relevantes, evidenciando a crescente importância desta área para o sucesso e a permanência dos negócios (ENEGEP, 2010). A manutenção tem sido um fator crítico para o sucesso e competitividade das organizações, embora a gestão inteligente considere o todo, tem uma visão panorâmica que pensa nos efeitos das atividades do seu setor nos outros setores e não somente na manutenibilidade. Prolongar a vida útil das máquinas e equipamentos com disponibilidade e confiabilidade pode representar uma poderosa estratégia para bons resultados.

2.1.1 Premissas iniciais

Segundo a ABNT (NBR 5462/1994), o conceito de manutenção: O conjunto de ações técnicas e administrativas que procede para o bom e correto funcionamento de algo. Destina manter a conformidade o funcionamento do maquinário, equipamentos, instalações de determinado setor, através de correções corretas e oportunas. O principal intuito é reparar ou repor algo que não funciona adequadamente por estar estragado ou com alguma não

conformidade, consertando para que então desenvolva novamente a função requerida no projeto.

O termo manutenção também pode estar relacionado com a conservação periódica, em outras palavras, com os cuidados, reparos, consertos, análises que são feitos em determinados períodos de tempo e que garantem a preservação pelo máximo período de tempo. De forma mais ampla, a manutenção industrial de máquinas e equipamentos é um conjunto de ações necessárias para que a vida útil dos produtos seja mais longínqua, fazendo os mesmos operarem com confiabilidade, diminuindo a possibilidade de possíveis paradas (planejadas e não planejadas) na linha de produção de fábricas.

Conforme mostra a estatística da Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN) do ano de 2011, em média, as empresas investiram 3,95% do faturamento bruto em manutenção. A referida pesquisa nos mostra a importância diante do valor, que é bastante significativo e impactante dentro das empresas, comprovando que a manutenção deve ser observada com seriedade, diante da gama de variáveis e ativos que englobam o setor

Nos últimos anos, a atividade ou setor de manutenção vem passando por mudanças (KARDEC & NASCIF, 2009). Essas alterações são decorrentes principalmente de:

- Aumento, bastante rápido, do número e da diversidade dos itens físicos (instalações, equipamentos, edificações) que tem de ser mantidos;
- Projetos muito mais complexos;
- Novas técnicas de manutenção;
- Novos enfoques sobre a organização da manutenção e suas responsabilidades;
- Importância da manutenção como função estratégica para melhoria dos resultados do negócio e aumento da competitividade das organizações.

Empresas que alcançam o êxito, que permanecem no mercado e alcançam melhoras constantes nos resultados, são empresas que inovam, que são competitivas, e tem nos profissionais da manutenção a habilidade de reagir rápido a mudanças e tendências. Essas habilidades entram no âmbito técnico,

em relação a novas falhas, novas ferramentas de controle, análise, novas tecnologias e também no sentido de uma maior conscientização da relação da manutenção com a eficiência do processo e qualidade do produto. Essa cobrança para alcançar maior disponibilidade com confiabilidade, precisar ser feita pensando na redução dos custos e com consciência às exigências ambientais, normas técnicas de excelência em qualidade e segurança em primeiro lugar (KARDEC & NASCIF, 2009).

2.1.2 Evolução da manutenção

De maneira geral, podemos dividir a manutenção em quatro grandes períodos distintos ou quatro gerações (MOUBRAY, 1997) e (KARDEC & NASCIF, 2009).

Primeiro Período – Abrange o período anterior a 2ª guerra mundial, denominado como manutenção de primeira geração aonde a disponibilidade dos equipamentos e a preocupação pela prevenção das falhas não eram prioridade. O perfil econômico da época não priorizava a produtividade, conseqüentemente não havia a necessidade de uma manutenção sistematizada. Os equipamentos eram superdimensionados, os projetos eram simples e o seu reparo de fácil execução sendo, portanto, mais confiáveis. A limpeza e a lubrificação eram suficientes e a competência que se buscava era a habilidade para execução ao realizar o reparo seja qual fosse.

Segundo período – denominado manutenção da 2ª geração, ocorreu entre os anos 50 e 70. O período de guerra e o pós-guerra aumentaram bastante a demanda de tipos de produto, maior diversidade, inovação ao mesmo tempo que o contingente de mão de obra industrial diminuía bastante. A crescente demanda por produtos nesta época impulsiona a mecanização das indústrias, com máquinas numerosas e complexas. Começa a evidenciar a necessidade de disponibilidade e confiabilidade surgindo planos de manutenção preventiva, passando a existir a preocupação com os tempos de parada dos equipamentos produtivos. Surge então o conceito de manutenção preventiva, embora fosse feita em intervalos fixos, aparecendo também a consideração de que as falhas nos equipamentos podiam e deviam ser previstas e otimizadas surgindo ideias

relacionadas a manutenção preditiva também. Os custos de manutenção elevaram-se juntamente a outros custos operacionais sendo necessário maior gestão e controle.

Terceiro período – Iniciado a partir da década de 1970 denominada manutenção da 3ª geração. Neste período houve acelerado avanço no processo das indústrias. Reforçaram-se o conceito e utilização da manutenção preditiva. Os avanços na informática permitiram a utilização de softwares potentes para o planejamento e controle dos serviços de manutenção. Houve grande busca por novas maneiras de maximizar a vida útil dos equipamentos produtivos, passando a existir a preocupação com alta disponibilidade e confiabilidade, conceitos que começaram a ser cada vez mais aplicados pela Engenharia de Manutenção. Um grande desafio era vincular essas mudanças e avanços sem proporcionar nenhum dano ao meio ambiente, maiores preocupações com as questões de segurança, maior qualidade do produto e custos sob controle, todas essas questões surgidas na terceira geração.

Quarto Período – Ocorre de meados da década de 90 até os dias de hoje, denominado de 4ª geração. Algumas expectativas relacionadas à manutenção da terceira geração continuam nesta geração. A consolidação das atividades de engenharia de manutenção é bastante característica desta época. A automação, a prática de análise de falhas, o monitoramento das condições de equipamento e processo são utilizados com a finalidade de intervir cada vez menos na planta. Em consequência há uma tendência de redução da aplicação da manutenção preventiva ou programada, visto que ela promove a paralisação das máquinas e sistemas impactando negativamente a produção. A manutenção corretiva se torna um indicador negativo da manutenção.

Atualmente a área de manutenção nas empresas passa a ser considerada cada vez mais estratégica para os resultados dos negócios das mesmas. Por meio da manutenção sistemática é possível antecipar-se e evitar falhas que poderiam ocasionar paradas imprevistas dos equipamentos produtivos. Da mesma forma, é possível se detectar uma situação aonde haja expectativa de falha e programar-se para uma intervenção em oportunidade mais apropriada, sem prejudicar os compromissos assumidos de produção.

A Tabela 1 mostra cronologicamente a evolução da manutenção, destacando a ideologia da manutenção de cada época e os acontecimentos importantes dentro de cada geração.

Tabela 1: Evolução da manutenção.

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO								
	Primeira Geração		Segunda Geração		Terceira Geração		Quarta Geração	
Ano	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Aumento das Expectativas em relação à Manutenção	# Concerto após a falha		# Disponibilidade Crescente # Maior vida útil dos equipamentos		# Maior confiabilidade # Maior disponibilidade # Melhor relação custo-benefício # Preservação do meio ambiente		# Maior confiabilidade # Maior disponibilidade # Preservação do meio ambiente # Segurança # Influir nos resultados do negócio # Gerenciar os ativos	
Visão quanto à falha do equipamento	# Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham		# Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira		# Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap Moubray) Ver capítulo 5		# Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F. (Nowlan & Heap Moubray) Ver capítulo 5	
Mudança nas técnicas de Manutenção	# Habilidades voltadas para o reparo		# Planejamento Manual da Manutenção # Computadores grandes e lentos # Manutenção Preventiva (por tempo)		# Monitoramento da condição # Manutenção Preditiva # Análise de risco # Computadores pequenos e rápidos # Softwares potentes # Grupos de trabalhos multidisciplinares # Projetos voltados para confiabilidade # Contratação por mão de obra e serviço		# Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição # Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada # Análise de falhas # Técnicas de confiabilidade # Manutenibilidade # Engenharia de Manutenção # Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e custo no ciclo de vida # Contratação por resultados	

Fonte: Kardec e Nascif, p.5, 2009, Adaptado.

2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO E AS TENDÊNCIAS

Segundo (KARDEC & NASCIF, 2009), os tipos de manutenção podem ser classificados e definidos de acordo à maneira como é realizada a interferência no processo para manter a funcionalidade seja do maquinário, equipamento, dispositivo ou sistema. Serão abordados os principais tipos de manutenção, sendo eles:

- Manutenção Corretiva planejada e não planejada;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva;
- Manutenção Detectiva;
- Engenharia de Manutenção.

2.2.1 Manutenção corretiva

Este tipo de manutenção é caracterizado pela intervenção do setor de manutenção após a ocorrência da falha ou do desempenho não esperado, em outras palavras, o trabalho de manutenção é realizado somente após a quebra do equipamento ter ocorrido. Não há tempo para a preparação de componentes, de buscar o melhor preço de algum item que precise ser substituído e não tenha em estoque, tampouco de planejar o serviço. Manutenção corretiva é a correção da falha de modo aleatório a fim de evitar outras consequências (WILLIANS, 1994 apud CASTELLA, 2001)

Analisando os indicadores de custos de manutenção, a manutenção corretiva tem custo menor para ser mantido comparado aos custos para prevenir as falhas nas máquinas e equipamentos em alguns casos. No entanto, ainda nesses casos específicos, podem causar grandes prejuízos com as perdas de produtividade decorrentes da intervenção feita, que param o equipamento de maneira aleatória, num momento em que havia uma certa programação, uma meta de produção, um grande lote do produto que foi vendido e que por conta da parada não poderá ser finalizado no tempo do contrato.

Situações como a exemplificada poderiam causar um grande dano financeiro. Este tipo de manutenção implica em altos custos e baixa

confiabilidade de produção, já que gera ociosidade e danos maiores aos equipamentos, muitas vezes irreversíveis (OTONI & MACHADO, 2008). A análise dos custos de manutenção indica que um reparo realizado do modo corretivo-reativo terá em média um custo cerca de 3 vezes maior que quando o mesmo reparo sendo feito dentro de um modo planejado ou também preventivo (ALMEIDA 2000, pg2). Este dado evidencia que um trabalho planejado é sempre mais viável economicamente, mais ágil e fica mais seguro comparado ao mesmo trabalho realizado de maneira não planejada. Também sempre terá maior qualidade.

A manutenção corretiva não planejada em questão pode ser analisada conforme na Figura 3.

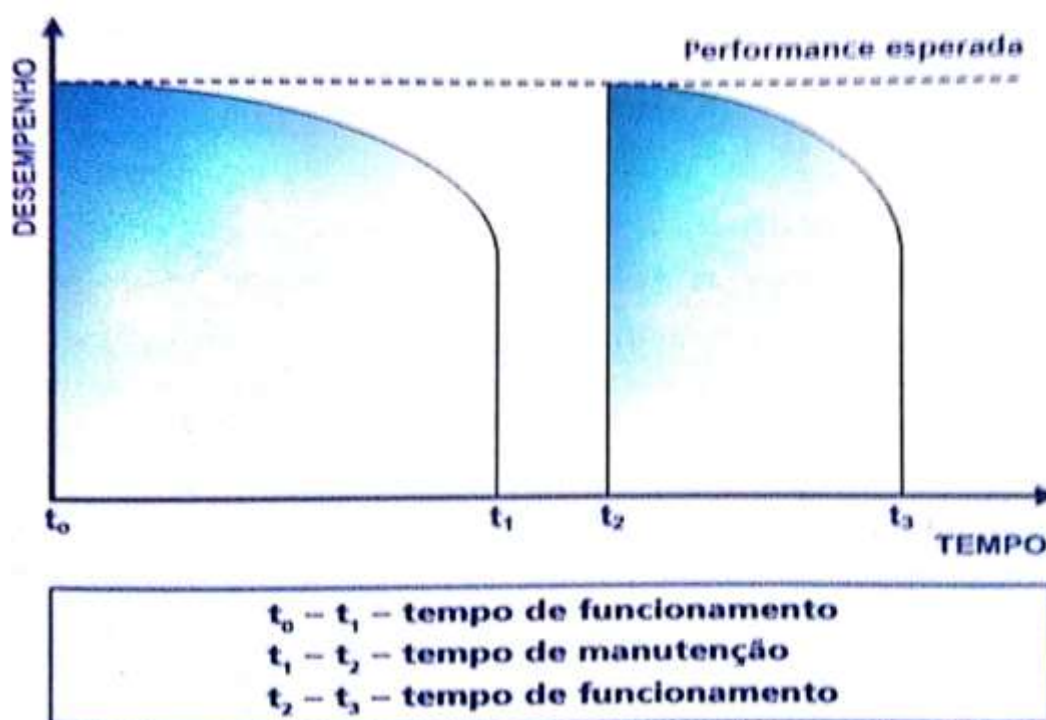


Figura 3 – Manutenção corretiva não planejada.
 Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

Existe inclusive o caso da Manutenção Corretiva Planejada. Esse termo se refere a prática de manutenção preparada para acontecer, planejadamente. A ocorrência da falha ou de determinado evento está sendo esperada.

Alguns casos se tem uma falha ou condição anormal de operação de um equipamento por exemplo, e esta correção depende de uma decisão gerencial,

em função de um acompanhamento preditivo, por exemplo, que possa estar sendo feito ou pela decisão de operar até a quebra. Um estudo de caso, uma busca por dados para determinação da vida útil de componente. Existem várias situações que podem conduzir em optar por este tipo de manutenção.

Existem ainda alguns fatores que podem ser fundamentais em optar pela manutenção corretiva planejada, tais como:

- Negociação de parada do processo de produção, ou seja, a produção será parada num momento em que este fato não irá interferir no planejamento;
- Aspectos ligados à segurança. A falha não provocará qualquer situação de risco;
- Para melhorar o planejamento dos serviços;
- Itens em teste que precisam ser utilizados até o fim de vida;
- Questões relacionadas à garantia de máquinas e ferramental;
- Necessidade de recursos humanos como serviços contratados.

Esse tipo de manutenção possibilita o planejamento dos recursos necessários para a intervenção de manutenção, uma vez que a falha é esperada (PINTO E XAVIER, 2001)

2.2.2 Manutenção Preventiva

A manutenção Preventiva é o tipo de manutenção que tem como foco principal evitar que a falha ocorra, fazendo isso através de intervenções efetuadas em intervalos definidos de tempo, programados, ou seja, um plano previamente elaborado.

Segundo (ALMEIDA, 2000, Pg. 3) todas as diretrizes gerenciais de manutenção preventiva assumem que todos os tipos de máquinas sofrem uma degradação relacionada ao quadro típico da classificação daquela máquina. Os reparos, consertos e recondiçionamentos de máquinas são realizados na maioria das instalações a partir de estatísticas provindas de um histórico na maioria das vezes.

Outro relevante método utilizado é a curva do tempo médio de falha (Figura 4), também conhecida como curva da banheira, importante ferramenta para o planejamento da manutenção preventiva.

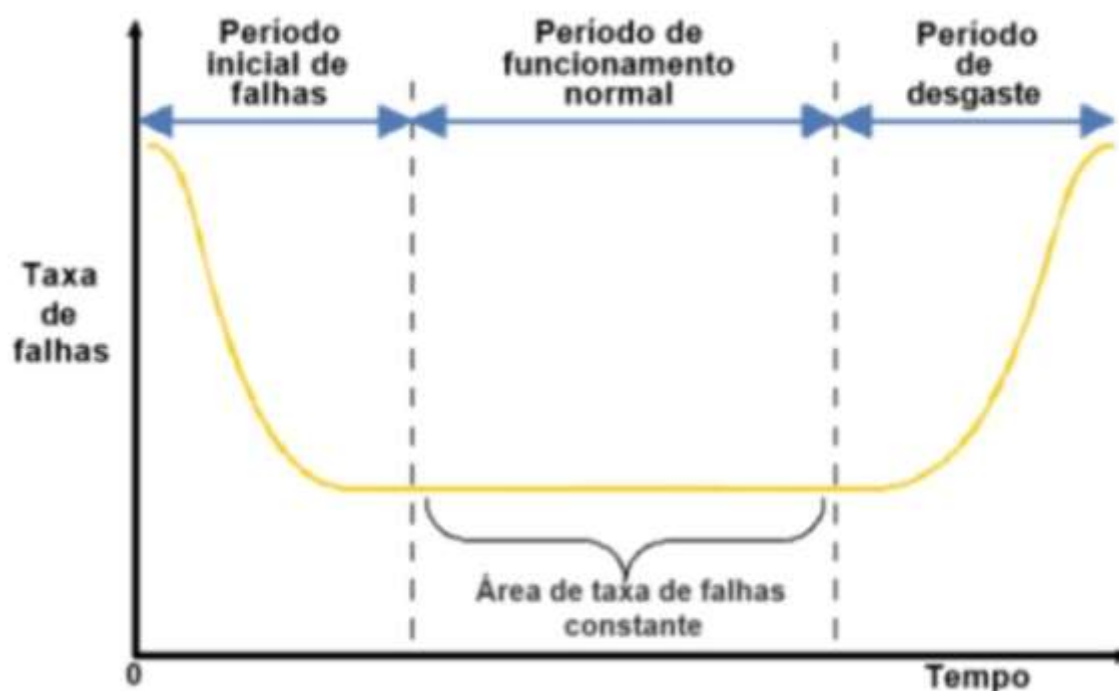


Figura 4 – Curva do tempo médio de falha.
Fonte: Almeida, 2010.

No entanto, com este tipo de analogia, baseada em estatística, existe um grande problema. As variáveis são avaliadas para um tipo específico de instalação e com as condições inerentes da localidade em questão.

Como nem sempre os fabricantes fornecem dados precisos para diferentes aplicações, condições operacionais, da substância, ou do ambiente em questão, informações que podem influenciar de modo considerável na degradação do maquinário, é altamente recomendado estar atento ao iniciar qualquer plano de manutenção preventiva. As peculiaridades da aplicação ao qual será submetido o maquinário podem na prática modificar uma programação pré-estabelecida. A definição da periodicidade de substituição deve ser estabelecida para cada instalação e condição de trabalho.

Na Figura 5 é possível analisar o desempenho esperado ao longo do tempo com a manutenção preventiva.

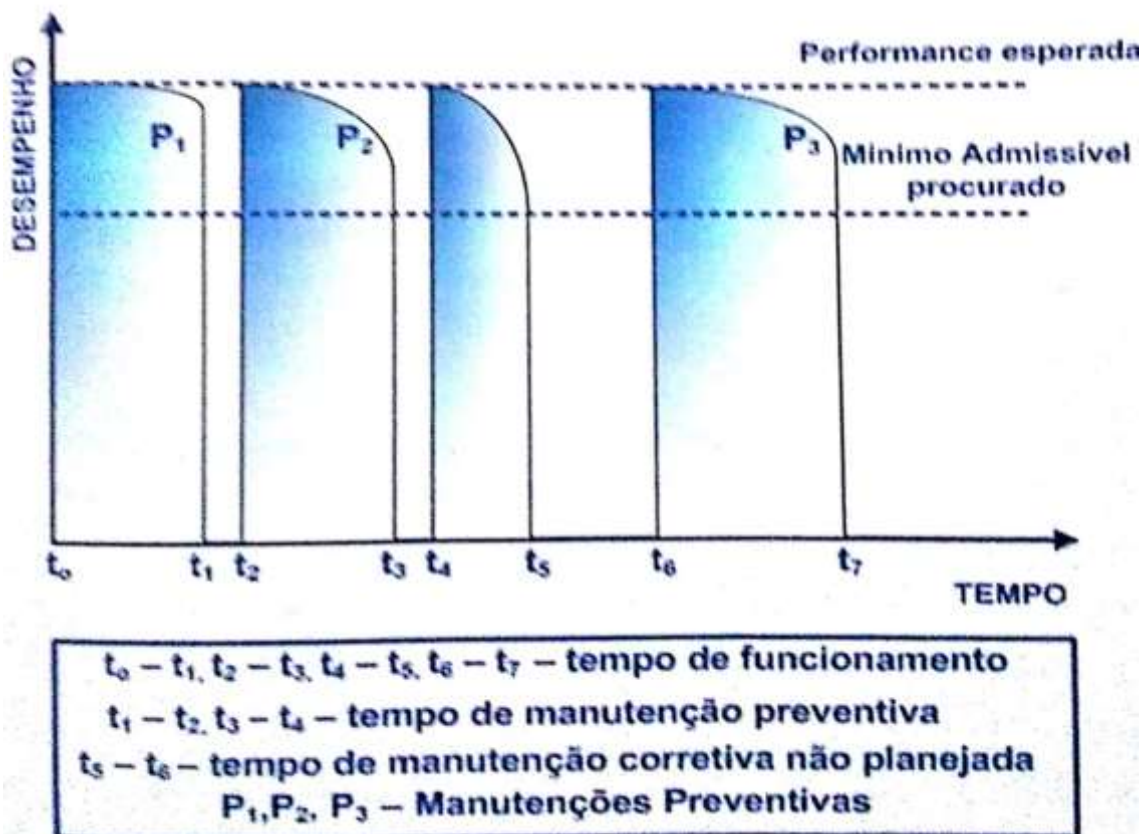


Figura 5 – Desempenho esperado com manutenção preventiva.

Fonte: Kardec e Nascif, 2009, pg 43.

Conforme (KARDEC & NASCIF, 2009) alguns fatores devem ser levados em consideração para a escolha da manutenção preventiva. São eles:

- Quando não existir a possibilidade de manutenção preditiva;
- Questões relacionadas à segurança das pessoas e da instalação, aonde a intervenção é obrigatória;
- Por oportunidade em equipamentos críticos de difícil liberação operacional;
- Quando houverem riscos ao meio ambiente;
- Em sistemas complexo e/ou de operação contínua. Por exemplo na indústria automobilística;

Sabendo as peculiaridades da instalação e da operação num plano de manutenção preventiva que já vem sendo aplicado, ou seja, um conhecimento prévio das ações, a manutenção preventiva de determinada planta permite uma boa condição de gerenciamento das atividades dos recursos, além de previsibilidade de consumo de materiais e sobressalentes

Por outro lado, se não for bem gerenciada existem fatores que podem prejudicar o que foi planejado, o que se espera deste tipo de manutenção. Variáveis como (KARDEC & NASCIF, 2009):

- Falha Humana;
- Falha de sobressalentes;
- Contaminação introduzidas no sistema de óleo;
- Danos durante partidas e paradas;
- Falhas no procedimento;
- Falha na comunicação com a produção. Não planejamento para a parada da produção

2.2.3 Manutenção Preditiva

É o tipo de manutenção que efetua o monitoramento, realizando o acompanhamento das variáveis e dos parâmetros intrínsecos ao desempenho de máquinas e equipamentos, com o objetivo de encontrar o momento ideal para interferir, visando o máximo proveito do ativo, antes que ocorra a falha, permitindo a operação contínua das máquinas pelo maior tempo possível (OTONI & MACHADO, 2008).

Existem algumas condições básicas para se adotar a Manutenção Preditiva (KARDEC & NASCIF, 2009). São elas:

- O equipamento, o sistema ou a instalação em questão precisam se conectar a algum tipo de sistema de monitoramento;
- Os custos envolvidos são altos, devido a isso o equipamento, o sistema, ou a instalação deve merecer esta intervenção;
- As falhas ocorridas devem ser provenientes de mecanismos que possam ser monitorados.
- É extremamente necessário um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado

Na figura 6 é apresentado o gráfico da Manutenção Preditiva, aonde é possível analisar o desempenho deste tipo de intervenção (KARDEC & NASCIF, 2009).

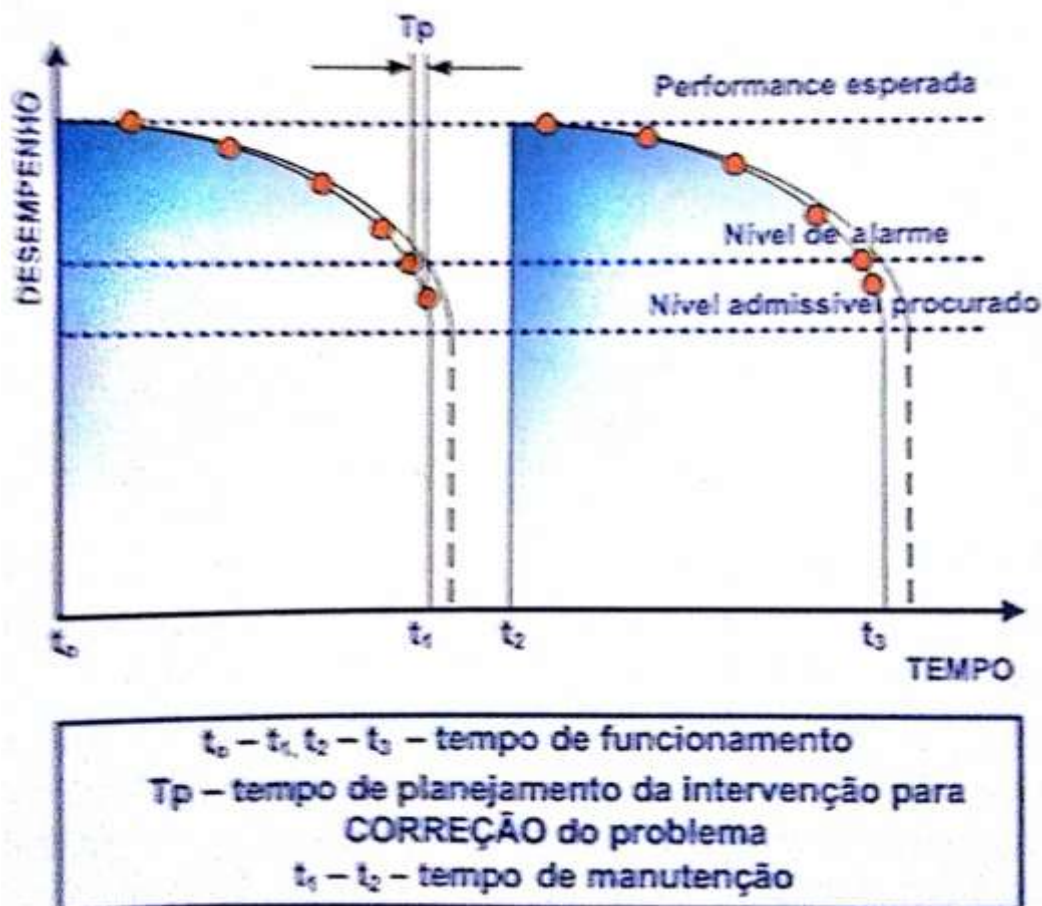


Figura 6 – Desempenho esperado com manutenção preditiva.
 Fonte: Kardec e Nascif, 2009, pg. 47.

Trata-se de uma maneira de melhorar a disponibilidade e a produtividade, a qualidade do produto, o lucro, e a efetividade global das plantas industriais de manufatura e produção. Percebe-se que a manutenção preditiva pode ser a mais indicada quando as variáveis monitoradas são o rendimento e o lucro. Isso devido ao fato de esse tipo de manutenção utilizar ferramentas mais efetivas e eficazes para obter as reais condições operacionais, em outras palavras, consegue fornecer dados mais próximos da realidade, podendo assim determinar o tempo real da ocorrência da falha, podendo assim prevenir que ela ocorra da mais maneira mais otimizada possível (ALMEIDA 2000, pg. 4). Alguns exemplos de técnicas da manutenção preditiva:

- Análise de vibrações;
- Análise de lubrificantes;
- Termografia;
- Controle e monitoramento de corrente.

2.2.4 Manutenção Detectiva

A manutenção Detectiva surgiu na década de 90 com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos equipamentos. É caracterizada por detectar falhas ocultas em sistemas de proteção, ou segurança, não sendo essas perceptíveis à operação e as vezes nem ao controle (SOUZA, 2008).

Este tipo de manutenção é altamente importante e recomendado quando o processo, seja ele de segurança, seja de proteção, são tão críticos ao ponto de não admitirem falhas ou paradas que afetem a funcionalidade. Na figura 7, um exemplo de aplicação e técnica de manutenção detectiva, a operação e manutenção especializada de ar condicionado (AVAC).



Figura 7 – Manutenção detectiva.
Fonte: Industria Hoje, 2012.

A aplicação deste tipo de manutenção demanda um investimento muito alto, por isso normalmente é aplicada apenas em situações muito especiais como máquinas processos que envolvam produtos valores muito altos ou equipamentos de hospitais, embora com o passar do tempo esteja se tornando mais viável (KARDEC & NASCIF, 2009).

São exemplos de técnicas da manutenção detectiva:

- Detecção de vazamentos;
- “*Eddy Current Test*” em tubos trocadores de calor;
- Vídeo boroscopia;
- Análise de tendência de gotejamento de selos mecânicos;
- Alinhamento a laser.

2.2.5 Engenharia de Manutenção

A Engenharia de Manutenção é o que há de mais evoluído na manutenção. A empresa que pratica a engenharia de manutenção não está apenas realizando acompanhamento preditivo de seus equipamentos e maquinas, ela está alimentando sua estrutura de dados e informações sobre manutenção que irão lhe permitir realizar análises e estudos para proposição de melhorias no futuro. (KARDEC & NASCIF, 2009).

As práticas de Engenharia de Manutenção estão concentradas em consolidar rotinas e implantar melhorias. Dentre as principais atribuições da Engenharia de Manutenção estão:

- Aumentar a confiabilidade, disponibilidade e segurança;
- Melhorar a manutenibilidade e a capacidade da mão de obra;
- Eliminar problemas crônicos e solucionar problemas tecnológicos;
- Gerir materiais e sobressalentes;
- Participar de novos projetos (*interface* com a engenharia);
- Dar suporte a execução e acompanhar os indicadores;
- Fazer Análise de Falhas e estudos, elaborando planos de manutenção e de inspeção, fazendo sua análise crítica;
- Zelar pela documentação técnica;

Portanto a engenharia de manutenção significa perseguir *benchmarks*, aplicar técnicas modernas, estar atualizado, nivelado com a manutenção contemporânea e com as evoluções, sempre documentando e enriquecendo o histórico da planta, se possível na nuvem.

Uma outra maneira de facilitar o entendimento sobre os tipos convencionais de manutenção, incluindo a engenharia de manutenção é mostrada no fluxograma conforme Figura 8.



Figura 8 – Tipos de Manutenção.
Fonte: Industria hoje, 2012.

A Figura 9 a seguir mostra como se comporta o desempenho da disponibilidade da manutenção conforme o surgimento de melhores técnicas.

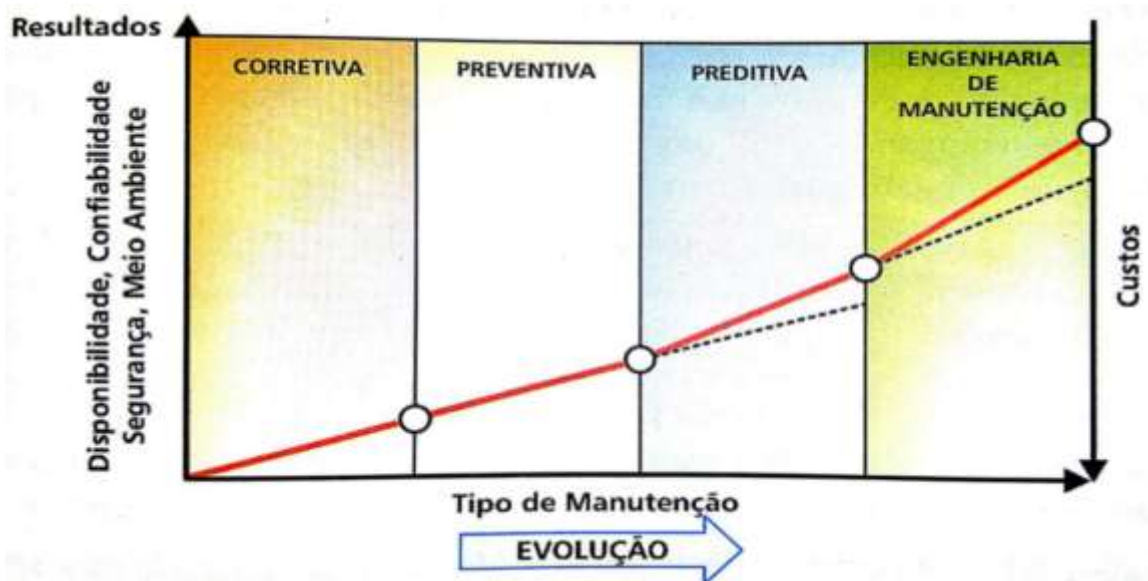


Figura 9 – Resultados x Tipos de Manutenção.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009, pg. 51.

2.3 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Neste tópico serão abordados assuntos que destacam a importância de levar em consideração a interação da manutenção ao processo produtivo para que a empresa possa alcançar a excelência. Esse pensamento “macro” da manutenção é decorrente das demandas contemporâneas por melhores resultados, pela busca incessável por economia nos ativos, na redução dos custos, proteção ao meio ambiente, fábricas cada dia mais seguras, e funcionários mais qualificados.

Essas exigências modernas provêm da globalização, da competitividade, da escassez de recursos, das questões ambientais e dos órgãos governamentais bem como dos sindicatos patronais e trabalhistas. Tais exigências evidenciam que a não adequação às inovações e desafios contemporâneos podem conduzir a organização como um todo ao encerramento das suas atividades (KARDEC & NASCIF, 2009).

Existem algumas ferramentas, consolidadas em metodologias, que permitem a aplicação dos principais tipos de manutenção citados previamente. São diretrizes e procedimentos estabelecidos em estudos realizados, levantamento de informações ao longo dos anos que servem de guias para melhores práticas do sistema de manutenção baseados cada qual nos seus princípios. Alguns exemplos:

- Manutenção Baseada na Confiabilidade (RBM) ou *Reability Based Maintenance*
- Manutenção Produtiva Total (TPM) ou *Total Productive Maintenance*.
- Manutenção centrada na confiabilidade (RCM) ou *Reability Centered Maintenance*

Outra questão bastante discutida é a manutenção baseada em tempo vs manutenção baseada na condição. Nos últimos anos, houve uma grande mudança em manutenções baseadas em horas de operação para manutenções baseadas nas condições do equipamento (LAFRAIA, 2001). A figura 10 ilustra essa evolução dentro das metodologias de manutenção.

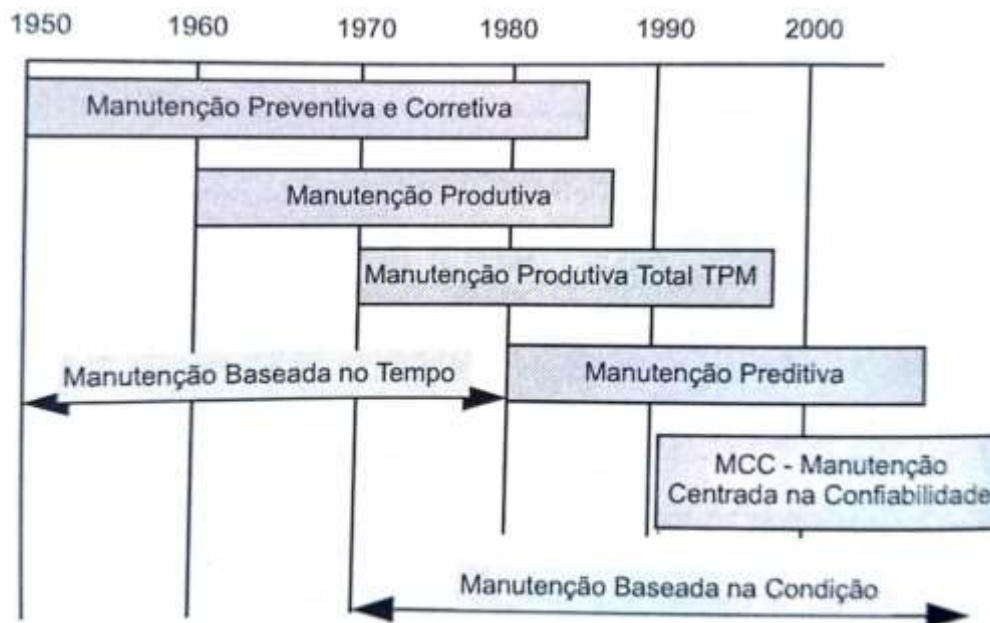


Figura 10 – MBT vs MBC.
Fonte: Siqueira, 2005.

Gestores que procuram uma forma eficaz para um programa de manutenção permanente, não devem perder de vista o fato de que a melhoria contínua é uma jornada necessária, alcançada a longo prazo. Esta afirmação é contemplada pelo Sistema Toyota de Produção (OHNO, 1997).

Abaixo nos tópicos 2.3.1 e 3.3.1, as definições resumidas de Manutenção Produtiva Total (TPM) e Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).

2.3.1 Manutenção produtiva total ou *Total Productive Maintenance* (TPM)

A TPM é a ampliação do conceito de manutenção, que integra a operação no sistema de manutenção. A TPM objetiva a eficácia da empresa como um todo, através da qualificação das pessoas e melhoria contínua introduzidas nas máquinas e equipamentos (criar facilidades que facilitem nas intervenções ou excluam as mesmas), sempre pensando em se desenvolver para as fábricas do futuro, de forma que desenvolvendo as pessoas e modificando as máquinas obtenha melhoria no resultado global.

Neste contexto, estando a atividade de manutenção integrada ao processo produtivo com eficácia, ambos contribuirão para que a empresa caminhe rumo à excelência. A intersecção do setor de manutenção com o de produção influencia diretamente a qualidade e produtividade, sendo assim este

setor estratégico e fundamental para melhores indicadores não apenas econômicos, mas também operacionais (XENOS, 1998).

A manutenção produtiva total, se apoia em oito pilares, cada qual com seu foco, e estes pilares regem a aplicação das ferramentas que irão proporcionar os resultados esperados. A figura 11 representa a casa da TPM.

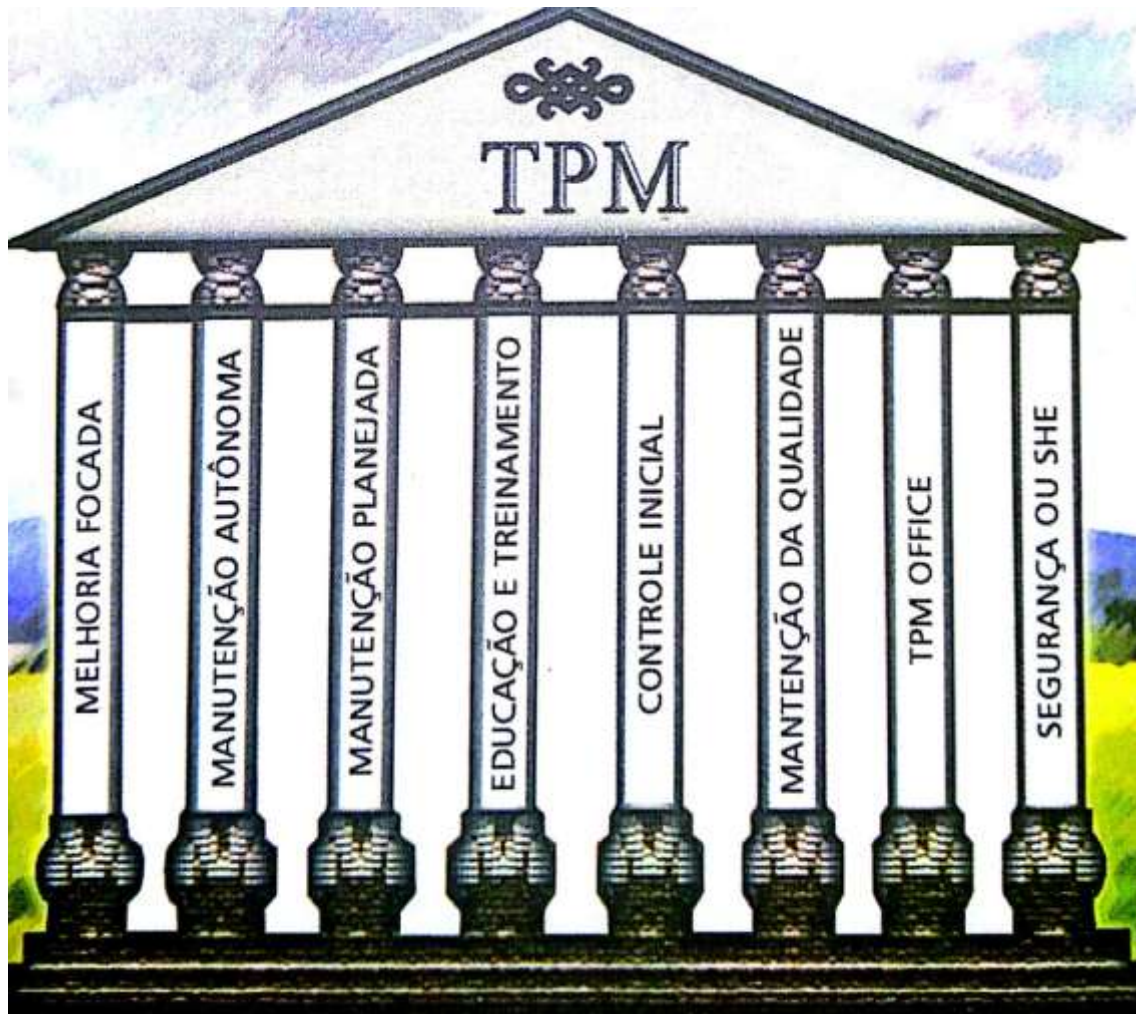


Figura 11 – Casa da Manutenção produtiva total.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009, pg. 199.

A implantação da TPM, obedece ao esquema apresentado na tabela 2 que contém 12 passos, conforme explica (SIQUEIRA, 2005).

Tabela 2: Implantação TPM.

Fase	Nº	Etapa	Ações
	1	Comprometimento da alta administração	*Divulgação da TPM em todas as áreas da empresa. *Divulgação através de jornais internos
	2	Divulgação e treinamento inicial	*Seminário interno dirigido a gerentes de níveis superior e intermediário. *Treinamento de operadores
	3	Definição do Órgão ou Comitê responsável pela implementação	*Estruturação e definição das pessoas do Comitê de Implantação
	4	Definição da Política e Metas	*Escolha das metas e objetivos a serem alcançados
	5	Elaboração do Plano Diretor de Implementação	*Detalhamento do plano de implantação em todos os níveis
Introdução	6	Outras atividades relacionadas com a introdução	*Convite a fornecedores, clientes e empresas contratadas
	7	Melhorias em máquinas e equipamentos	*Definição de área e/ou equipamentos e estruturação das equipes de trabalho
	8	Estruturação da Manutenção Autônoma	*Implementação da Manutenção Autônoma, por etapas, de acordo com programa. *Auditório de cada etapa
	9	Estruturação do Setor de Manutenção e condução da Manutenção Preditiva	*Condução da Manutenção Preditiva. *Sobressalentes, Ferramentas e Desenho...
	10	Desenvolvimento e capacitação de pessoal	*Treinamento de pessoal de operação para desenvolvimento de novas habilidades relativas a manutenção. *Treinamento de pessoal de manutenção para análise, diagnóstico, etc. Formação de líderes. Educação de todo o pessoal.
	11	Estrutura para controle e gestão dos equipamentos numa fase inicial	*Gestão do fluxo inicial. LCC (Life Cycle Cost)
Consolidação	12	Realização da TPM e seu aperfeiçoamento	*Candidatura ao prêmio PM. *Busca de objetivos mais ambiciosos

Figura 9 – Manutenção produtiva total.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009, pg. 199.

Neste contexto, outro grande foco, é a eliminação das perdas. Paradas de máquinas geram perdas por quebras e desperdícios e aí surge o conceito da quebra zero, ou seja, a máquina não pode parar durante o período em que foi programada para operar, que é totalmente diferente de a máquina nunca pode parar.

Para conquistas da quebra zero, algumas medidas são fundamentais (KARDEC & NASCIF, 2009):

- A manutenção dos meios de produção deve ser preocupação de todos. Homem, máquina e empresa devem estar integrados;
- Estruturação das condições básicas para a operação;
- Obediência às condições de uso;
- Sanar pontos falhos decorrentes do projeto, incrementando capacidade técnica.

Juntamente com a manutenção produtiva total, os “5S” e a polivalência ou multiespecialização são práticas que devem ser consideradas básicas na manutenção (KARDEC & NASCIF, 2009).

2.3.2 Pessoas e equipes. O fator humano no processo de manutenção

É fundamental entender e praticar o trabalho em equipe como sendo um dos mais importantes caminhos estratégicos, colocar foco no cliente interno e no cliente externo, estabelecer metas indicadores e planos de ação para os principais resultados da manutenção, sendo os mais significativos aqueles ligados a disponibilidade, a confiabilidade, a segurança, ao meio ambiente, a motivação da equipe e aos custos (KARDEC & NASCIF, 2009).

O fator humano na manutenção, é determinante. Um profissional de manutenção qualificado e bem equipado é fundamental para que uma empresa consiga atingir seus objetivos, obter qualidade nos seus produtos e ter prestígio no mercado. Além disso o sucesso ou fracasso de uma empresa dependem do trabalho em equipe dos seus colaboradores em qualquer atividade. Na manutenção este fator é também bastante crítico, tanto internamente entre seus membros, quanto no relacionamento com a área de operação.

Conseguir que a manutenção e a operação formem uma equipe que funcione da maneira projetada, na busca de soluções e melhorias é um desafio tanto quanto complexo, porém bastante estratégico para alcançar a excelência empresarial.

O engajamento do fator humano pode ser exemplificado por qualidades tais como: Empenho, vontade, motivação, iniciativa, cumprir metas e compromissos, pró-atividade, comprometimento, metodologia, disciplina, bom humor, boa energia mental, bom relacionamento com todos ao redor e satisfação em executar o trabalho.

Por outro lado, é importante que o profissional da manutenção tenha uma visão do seu papel dentro de uma empresa, o quanto ele e a atividade ao qual desempenha refletem nos indicadores. A manutenção industrial depende muito do bom controle e desempenho dos seus colaboradores, quebrando paradigmas, evoluindo para acompanhar as evoluções e desafios da atividade de manter. A maior disponibilidade do sistema fabril para maior produtividade será muito mais facilmente alcançada atrelando o planejamento à operação, unindo os dois para funcionarem em harmonia.

A sistemática adotada pelas empresas em classe mundial privilegia a interação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação como fator de garantia de metas relacionadas a confiabilidade, disponibilidade e a maximização do ciclo de vida das instalações.

A falha se inicia com consequências negativas de processos organizacionais, que envolve primeiramente as pessoas (BAPTISTA, 2016).

2.3.5 Planejamento Estratégico

Muitos administradores compartilham que o planejamento estratégico é determinante para o sucesso da empresa. Porém, poucos deles conhecem de fato os benefícios de possuir uma estratégia bem planejada e executada (FLUXO CONSULTORIA, 2015).

De maneira geral o planejamento estratégico define o método mais rentável e eficaz de utilização dos recursos disponibilizados para atingir uma

posição confortável, ou seja, estruturar os objetivos, as diretrizes de maneira clara e coerente, pensando nas ações planejadas para alcançá-los.

Para ser estratégica, a manutenção precisa considerar os resultados da empresa. Se tornar eficaz e não ser apenas eficiente, ou seja, manter os equipamentos ou instalações de forma que não interfiram na disponibilidade, mas também/principalmente diminuir ao máximo a probabilidade de paradas não planejadas fazendo a manutenção existir para que não haja manutenção. Visão do futuro é talvez o termo que mais bem define o planejamento estratégico, sabe onde está e sabe aonde quer estar. A figura 12 retrata esta questão (KARDEC & NASCIF, 2009).

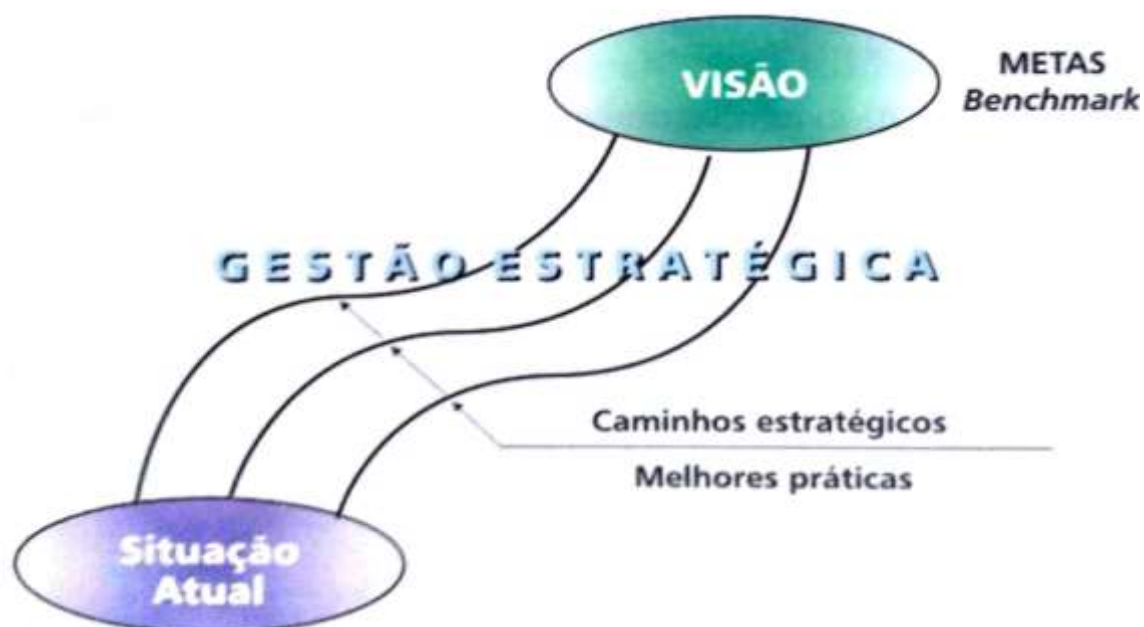


Figura 12 – Gestão estratégica.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009, pg. 12.

O papel da gestão estratégica nas empresas é fornecer ferramentas para auxiliar os gestores a tomar as decisões certas e assegurar que essas decisões sejam as mais corretas e eficazes possíveis. Um programa de manutenção bem-sucedido e sustentável, provavelmente só será desenvolvido se o setor de manutenção e os usuários dos ativos (setor de produção) trabalharem juntos. Algumas ferramentas que podem auxiliar no processo para alcançar o planejamento estratégico podem ser vistas na figura 13, (MOUBRAY, 1991).



Figura 13 – Ferramentas Gestão estratégica.
Fonte: Indústria Hoje, 2012.

2.4 CONFIABILIDADE

A manutenção industrial promove maior produtividade e competitividade empresariais, pois incrementa os níveis de qualidade e segurança, melhora a gestão dos recursos e otimiza os índices de confiabilidade e disponibilidade dos processos produtivos. As empresas precisam confiar em seus equipamentos para que possam atender os clientes nos prazos acordados com a qualidade exigida.

Quando se mantém um ativo, o alvo é o desejo de que isto continue desempenhando suas funções com qualidade. Isto implica em centrar a atenção em manter a função do ativo o mais próximo da sua condição ideal.

Para iniciar este tópico é preciso introduzir três palavras. Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade que são termos que fazem parte da rotina de manutenção.

Confiabilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, durante um intervalo de tempo (Norma ABNT NBR 5462/1994). Pode ser uma probabilidade, a confiabilidade é uma medida que varia entre 0 e 1 (ou 0 e 100%), (KARDEC & NASCIF, 2009). A confiabilidade do equipamento

é praticamente uma função da qualidade do programa de manutenção. A manutenção só pode garantir o desempenho até certo nível, a partir daí entra a confiabilidade (LAFRAIA, 2001, pg. 235).

Manutenibilidade pode ser conceituada como sendo a característica de um equipamento ou instalação permitir um maior ou menor grau de facilidade na execução dos serviços de manutenção, ou seja, é a probabilidade de que um equipamento com falha seja reparado dentro de um tempo (t), (KARDEC & NASCIF, 2009).

Disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar certas funções em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. (Norma ABNT NBR 5462/1994), (BAPTISTA, 2016, pg. 38).

Os três termos podem ser analisados com o exemplo da figura 14.

Confiabilidade		Manutenibilidade		Disponibilidade	
Igual	■	Pior	■	Pior	■
Igual	■	Melhor	■	Melhor	■
Melhor	■	Igual	■	Melhor	■
Pior	■	Igual	■	Pior	■

Figura 14 – Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.
 Fonte: Baptista, 2016, pg. 40.

Analisando a primeira linha, percebe-se que mantendo a confiabilidade (o mesmo número de falhas num dado período), mas piorando a manutenibilidade (aumentando o tempo para retornar o equipamento em operação) teremos como consequência uma pior disponibilidade. O mesmo raciocínio segue para as demais linhas (BAPTISTA, 2016, pg. 40)

Pesquisas feitas pela indústria da aviação civil norte-americana nos anos 1960 demonstraram que não existia forte correlação entre idade (tempo) e

ocorrência de falha, derrubando a premissa de revisão geral periódica. Sacrificava-se consideravelmente a vida útil dos componentes com a substituição baseada no tempo, e não na condição (BAPTISTA, 2016, pg. 100).

As empresas precisam de diferentes tipos de equipamentos para a produção de produtos e serviços. A confiabilidade de cada equipamento é inversamente proporcional a idade, na medida em que se degrada, aumenta a tendência a falha. (BLISQUE; MURTHY, 2000).

Assim, surgiu a Manutenção centrada na confiabilidade (MCC) ou *Right Centered Maintenance* (RCM), fornecendo uma metodologia para determinar os requisitos mais apropriados de manutenção para qualquer ativo físico em seu contexto operacional. É um conjunto de passos sequenciais que se assim seguidos garantem os resultados desejados (SIQUEIRA, 2005, pg.11)

As definições da MCC evidenciam uma mudança nos paradigmas e objetivos da manutenção. A MCC propõe, segundo a norma IEC 60300-3-11 e o relatório ATA MSG-3 (SIQUEIRA, 2005, pg. 16):

- Preservar as funções dos equipamentos, com a segurança requerida;
- Restaurar sua confiabilidade e segurança projetada, após a deterioração, otimizando a disponibilidade;
- Minimizar o custo do ciclo de vida (LCC – *life cycle cost*);
- Atuar conforme os modos de falha;
- Realizar as atividades que precisam ser feitas;
- Agir em função dos efeitos e consequências da falha; e
- Documentar as razões para escolha das atividades.

A tabela 3 compara as principais características da MCC em comparação a manutenções tradicionais.

Tabela 3: Manutenção tradicional vs MCC.

Característica	Manutenção Tradicional	MCC
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e Sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do equipamento	Consequências das falhas
Normalização	Não	Sim
Priorização	Inexistente	Por função

Fonte: Siqueira, 2009, pg. 17.

Para elaborar uma estratégia de manutenção para determinado equipamento, é preciso, antes de tudo entender como o equipamento funciona e então como ele falha. A figura 15, mostra o diagrama de processo da MCC, evidenciando boa parte do que ocorre nesta metodologia (BAPTISTA, 2016, pg. 99).

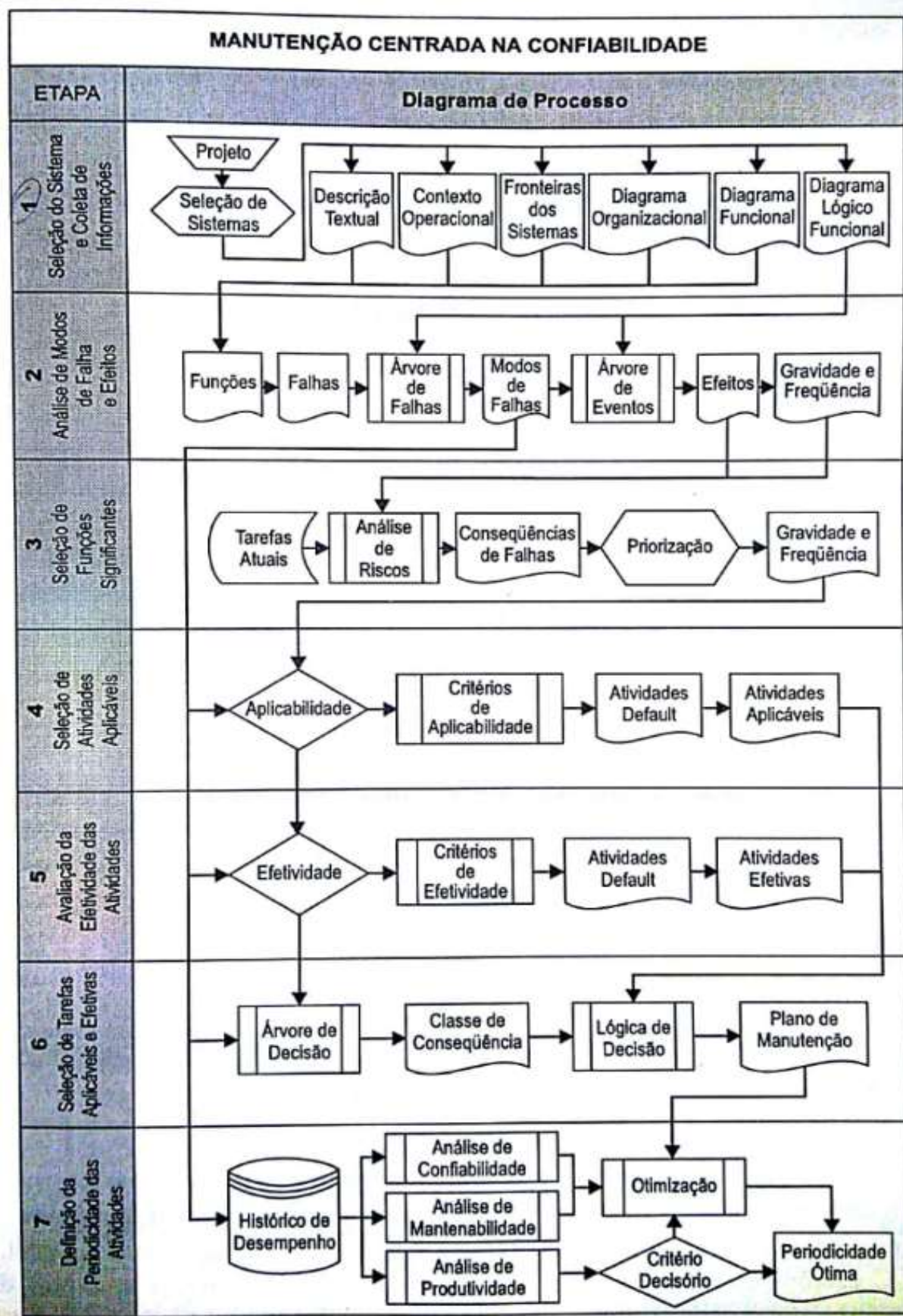


Figura 15 – Diagrama de processo RCM.
Fonte: Siqueira, 2005.

Para utilizar qualquer item no processo de manutenção centrada na confiabilidade, recomenda-se a aplicação de algumas perguntas, as sete questões básicas da RCM, (KARDEC & NASCIF, 2009):

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

Os demais tópicos deste capítulo abordam ferramentas dentro da RCM que foram utilizadas ao longo deste trabalho. No entanto, existem inúmeras outros temas e abordagens que poderiam ter sido discorridos no âmbito manutenção industrial e RCM.

2.4.1 Análise de Causa-Raiz de Falha

A Análise de Causas Raízes de Falha (Root Cause Failure Analysis – RCFA) é uma metodologia executada de maneira ordenada para buscar causas de problemas de maneira rápida e determinar as ações necessárias para não haver reincidência (KARDEC & NASCIF, 2009).

É um exercício de perguntas e respostas, exige raciocínio lógico, concentração e uma breve retrospectiva na linha do tempo do evento. Uma investigação que tem por finalidade determinar a causa que iniciou o problema.

Os principais passos para na Análise das Causas-Raízes de Falha são os seguintes:

Tabela 4: Passos RCA.

Principais Passos	Passo	Responsável
Análise do Modo e Efeito da Falha - FMEA	1	Operação/ Manutenção
Preservação da informação da falha	2	Manutenção
Organização do Grupo de Análise	3	Gerência Manutenção
Análise	4	Grupo de Análise
Relatar as descobertas	4	
Fazer as recomendações	4	
Acompanhar os resultados	4	

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

A Análise de Causa de Raiz é baseada no questionamento conhecido como “5 porquês”, aonde cada etapa deve responder a simples pergunta: Por quê? Recomenda-se fazer as perguntas até o ponto de o questionamento não fazer mais sentido, o que indica que o problema surgiu naquela etapa. Exemplificando:

Imagine hipoteticamente uma falha mecânica ocasionada por superaquecimento. No momento da quebra constatou-se que o flushing não estava alinhado, além de estar fechado. O fato do flushing não estar aberto é uma hipótese, resolvendo o problema facilmente com um dispositivo automático – válvula de controle por exemplo. No entanto, com a investigação confirma-se que a causa-raiz é a falta de treinamento do operador e, neste caso, para prevenir a ocorrência desta falha o treinamento formal dos operadores da máquina deve ser melhorado. A análise consta na tabela 5 (KARDEC & NASCIF, 2009).

Tabela 5: Porquês – Análise Causa Raíz.

Pergunta	Resposta
Por que a bomba falhou?	O selo falhou
Por que o selo falhou?	Desgaste excessivo das faces de vedação
Por que ocorreu o desgaste?	Houve superaquecimento
Por que houve superaquecimento?	O <i>flushing</i> não estava alinhado?
Por que o <i>flushing</i> não estava alinhado?	O operador se esqueceu de abrir a válvula
Por que ele se esqueceu?	Ele é novo na área e não tinha operado, ainda, uma bomba desse tipo
Por que ele não tinha operado esse tipo particular de bomba?	O seu treinamento não contemplou esse tipo de bomba

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

Toda Análise de Causa-Raiz de Falha deve ser documentada e arquivada apropriadamente. Desta maneira, futuramente pode auxiliar ou servir de embasamento ou aprendizado nas seguintes situações:

- Aprendizado sobre a máquina, sendo que a falha é uma oportunidade de aprendizado sobre a mesma, auxiliando na investigação de problemas similares ou Bunchmarking caso o problema ocorra em uma máquina similar em outra planta
- Histórico de falhas da máquina, evidenciando tal, forçando à atenção para não haver nova ocorrência. Serve também como ferramenta de análise de dados e estatística
- Pode ser útil à decisão de implementação de melhorias ou modificações

A figura 16 exemplifica um formulário de RDFA preenchido

EMPRESA		Relatório ANÁLISE DAS CAUSAS-RAÍZES DE FALHA (RCA)				Data
_____ X						11
Cliente		PETRÓLEO ORIENTAL S.A.				
Planta		REFINARIA CENTRAL				
Unidade		Craqueamento	Local	CRACAT		
Equipamento (TAG)		Bomba 03-P-04-B	Sistema	FUNDO FCC		
Identificação da Falha			Impacto da Falha			
Falha	Futura	Ocorrida	Perda de Produção	()		
Preencha os campos abaixo, se a falha já ocorreu			Parada de Unidade	Sim	Não	
Data	20/03/01	Hora	02:40	Total Horas Paradas	4	
Empregados que podem descrever a ocorrência			Parada Equipamento	Sim	Não	
Antonio Silveira – operador			Impacta a Segurança?	Sim	Não	
Alfredo Campos Martins – supervisor			Meio Ambiente?	Sim	Não	
Classificação da Falha			Custo Total da Falha	US\$ 835.000		
Oper. ___	Manut. X	Projeto ___	Master ___	Custo Melhoria Estim.	US\$ 15.000	
Tipo de Falha			Prazo Execução	35 dias		
Mec. X	Elet. ___	Quim. ___	Outro ___	NPR	30	
Descrição da possível falha ou falha ocorrida - Citar equipamentos envolvidos: Quebra da ponta do eixo, na zona de transição de seção provocou roçamento rotor carcaça provocando desgaste acentuado. Carcaça já apresentava erosão acentuada e o produto vazou para a atmosfera. Não ocorreu incêndio pela intervenção imediata.						
Causas-Raízes: Deficiência de projeto do eixo Programa de inspeção de bomba não-adequado						
Recomendações: 1 - Re projetar o eixo 2 - Substituir os eixos em estoque 3 - Modificar a sistemática de inspeção de equipamento						
Acompanhamento das Recomendações						
Ação - Re projetar eixo			Responsável: J. Ferrer			
Data Receb. 12.06.01		Prev. Conclusão: 22.06.01		Data Conclusão: 21.06.01		
Ação - Substituir eixos do estoque			Responsável: A. Salgado			
Data Receb. 25.06.01		Prev. Conclusão: 25.09.01		Data Conclusão: 22.09.01		
Ação - Modificar plano de inspeção			Responsável: J. Antonio Dietrich			
Data Receb. 12.06.01		Prev. Conclusão: 30.06.01		Data Conclusão: 29.06.01		
Custo Real Melhoria (US\$)		Aprovação		Data		
16.349,00						

Figura 16 – Formulário de Análise de Causa Raízes de falha.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

2.4.2 Análise de Árvore de Falhas (AAF) ou Failure Tree Analysis (FTA)

A Análise da Árvore de Falhas (AAF) é uma metodologia que nasceu na indústria aeroespacial, sendo utilizada consequentemente na indústria nuclear, alcançando as indústrias de processo, por se tratar de uma das ferramentas mais úteis para análise de risco (STONNER, 2015).

A Análise de Árvore de Falhas mapeia as falhas eminentes ou em potencial evidenciando o caminho até a sua ocorrência e pode ser uma análise do tipo qualitativa ou quantitativa, determinando as causas básicas de um evento mapeando a sequência que levou ao mesmo ou então para estimar a probabilidade de ocorrer determinado evento.

É uma metodologia dedutiva (do geral para o específico, sequência lógica), *top-down*, ou seja, do evento topo para baixo, permitindo observar as interdependências entre os componentes do sistema analisado, podendo também visualizar os principais fatores que levam ao evento topo indesejado.

A Análise da Árvore de Falhas pode ser aplicada a qualquer evento indesejado, incluindo eventos e/ou sistemas complexos. O objetivo da Análise da Árvore de Falhas é construir um diagrama lógico ou fluxograma do conjunto de causas que podem levar ao evento em estudo (indesejado), obtendo a estruturação das falhas. Pode-se obter as possibilidades e as probabilidades de ocorrência do evento indesejado (LAFRAIA, 2001). A figura 17 mostra a estrutura fundamental da Análise da Árvore de Falhas

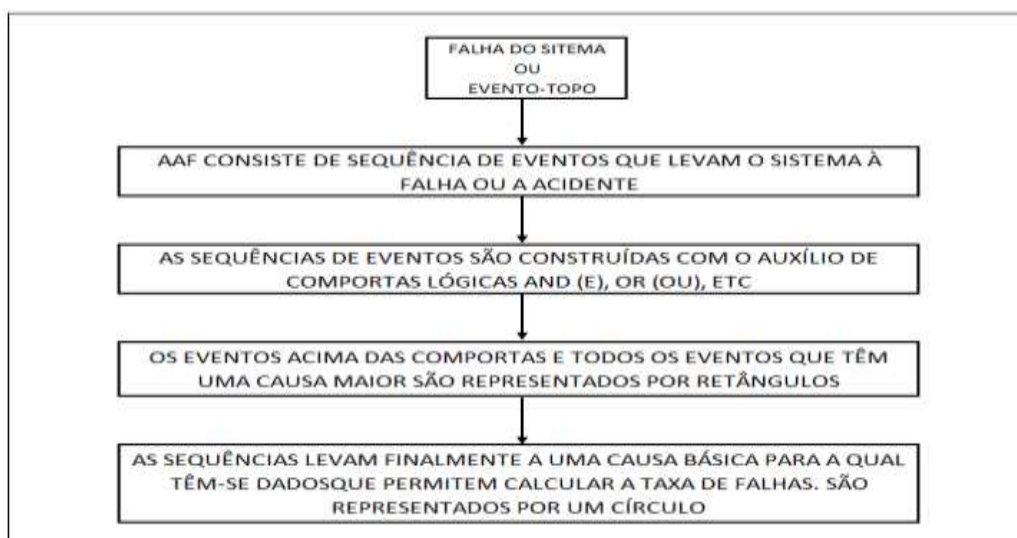


Figura 17 – Principais passos RCA.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

A figura 18 mostrada é um exemplo de Árvore de falhas desenvolvida em um diagrama lógico, aplicado num sistema de abastecimento de água.

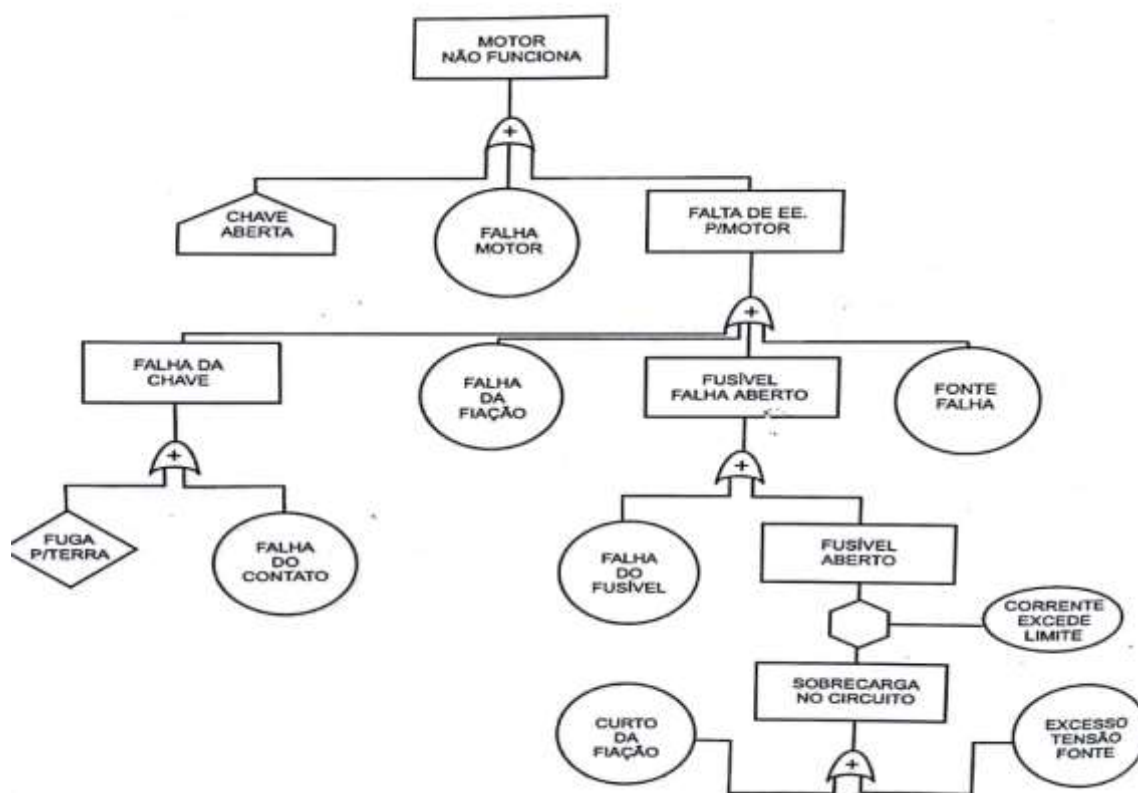


Figura 18 – Aplicação FTA Sistema de Abastecimento de Água.
Fonte: Lafraia, 2001, pg. 126.

Na construção da FTA e possivelmente da FMEA são recomendados os seguintes requisitos de informação (SIQUEIRA, 2005) e (BAPTISTA, 2016):

1. Registro de todas as quebras e paradas da máquina em análise por um período não inferior a 12 meses. Esses registros devem conter:
 - O equipamento avariado, submontagem ou componente com histórico de desempenho e falhas;
 - O número da posição (*tag*) na árvore de equipamentos;
 - O sintoma de cada falha (como o problema se manifestou) e o tempo de inatividade total registrado;
 - O custo da mão de obra e peças de reposição necessárias;
2. Documentação técnica, incluindo planos esquemas, manuais do fabricante e fornecedor, desenhos, *layouts* e fluxogramas de todo o processo produtivo, incluindo outras aplicações idênticas.

3. Informações adicionais:

- Condições de funcionamento do equipamento (condições climáticas, condições típicas de utilização, condições ambientais etc.).
- Experiência de projetistas, integradores e manutentores, operadores e engenheiro de processo.
- Normas técnicas, legais e de seguro, aplicáveis;

A aplicação da Análise da Árvore de Falhas depende da circunstância, do tempo disponível para agir e do resultado final que se espera do estudo que levou ao fenômeno ou evento, podendo ser aplicada desde a queima de um interruptor até a pane em um avião.

Abaixo alguns benefícios e limitações desta metodologia (LAFRAIA, 2001).

VANTAGENS E/OU BENEFÍCIOS

- Conhecimento aprofundado do sistema e da sua confiabilidade, podendo ser realizada em diferentes níveis de complexidade;
- Detecção de falhas singulares (aquelas cuja detecção leva ao evento topo) desencadeadores de eventos catastróficos e da sequência de eventos mais prováveis;
- Possibilita decisões de tratamento de risco baseados em dados quantitativos. Ótimos resultados podem ser conseguidos apenas com a forma qualitativa;
- Permite a detecção de falhas potenciais que seriam difíceis de serem detectadas e ainda pode avaliar falhas múltiplas e também a determinação de partes críticas para teste de produtos;
- Excelente ferramenta de comunicação visual, visto que, tem representação gráfica, a qual permite melhor entendimento do processo, ajudando na determinação da causa de falhas e possibilitando verificar a interação entre as causas.

DESVANTAGENS E/OU LIMITAÇÕES

- Não permite determinação direta de itens críticos nem execução de análise de criticidade
- É trabalhoso, podendo sua a construção pode ser de alta complexidade. Pode se tornar tão complexo ao ponto de necessitar de tratamento informatizado;
- Não considera falhas parciais (ou está “OK”, ou falha).

2.4.3 Análise de Modos de Falhas e Efeitos – FMEA

A Análise de modos de falha e efeitos (FMEA) é um estudo de determinado sistema e das inter-relações de funcionamento dos seus elementos para entender e conhecer os caminhos que as falhas podem ocorrer, e os efeitos de cada falha potencial sobre o conjunto em que ocorre, e sobre outros elementos singulares que ocorre (BAPTISTA, 2016, pg. 111).

É um método sistemático que tem o objetivo de antecipar modos de falhas conhecidos ou potenciais e recomendar ações prévias para eliminar ou reparar os efeitos das falhas (LAFRAIA, 2001, pg. 102)

A análise FMEA faz uso da experiência coletiva do pessoal de manutenção e produção, por isso, é normalmente efetuada por um pequeno grupo de trabalho, incluindo todos que puderem contribuir para a qualidade da análise, independente da área de atuação, podendo participar (BAPTISTA, 2016, pg. 111):

- Líder do grupo de trabalho ou facilitador e manutentores;
- Operadores que conheçam bem a máquina em análise;
- Técnicos de segurança e meio ambiente;
- Sempre que necessário consultar pessoas de outros departamentos (Engenharia, planejamento e programação, materiais e finanças)

A aplicação da análise FMEA requer o conhecimento da técnica FMEA e do produto ou sistema. Noções das funções do produto, do meio de aplicação

do produto, do processo de fabricação e dos requisitos dos clientes (LAFRAIA). Na figura 5, temos um exemplo típico do formulário de FMEA.

EMPRESA X		FMEA – Análise do Modo e Efeito da Falha					revisão	0								
		(<input checked="" type="checkbox"/>) MANUTENÇÃO (<input type="checkbox"/>) OPERAÇÃO (<input type="checkbox"/>) SISTEMAS					data	22/07/09								
							resp.	ABC								
Identificação	Local	U 431	Setor		Britagem		Sistema		Primário		Equipamento		Britador		TAG	431-BT-02
SUB ITEM	COMPONENTE/ PROCESSO	FUNÇÃO	POSSÍVEIS FALHAS			CONTROLES ATUAIS	ÍNDICES ATUAIS				AÇÕES CORRETIVAS		ÍNDICES MELHORADOS			
			MODO	EFEITO	CAUSAS		F	G	D	NPR	Recomendada	Adotada	F	G	D	NPR

Figura 19 – Formulário FMEA.
Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

Abaixo alguns dos benefícios que a aplicação do FMEA pode proporcionar:

- Redução do tempo de ciclo de um produto e custo global;
- Melhorar o programa de testes de produtos;
- Reduzir falhas potenciais em serviços e os riscos ao consumidor
- Desenvolver uma metodologia para a prevenção de defeitos ao invés de detecção e correção.

A tabela do FMEA é composta por várias colunas. A construção da Árvore de falhas permite estabelecer boa parte dos itens que irão na coluna dos modos de falha. Modo de falha é a descrição da maneira pela qual um item falha em cumprir sua função, sendo um dos parâmetros determinantes para obter bons resultados com a análise FMEA. A figura 20 resume alguns modos de falha comumente utilizados (SIQUEIRA, 2005, pg. 89).

aberto	aparado	apertado	aquecido
arranhado	atritado	bloqueado	chanfrado
cingido	cisalhado	colado	comprimido
congestionado	contaminado	corroído	cortado
curto	curto-circuitado	curvado	danificado
defeituoso	deformado	dentado	desbalanceado
desbloqueado	descolado	descravado	desintegrado
desligado	despedaçado	destravado	deteriorado
dilacerado	diluído	desconectado	dividido
duro	embaraçado	empenado	emperrado
engasgado	enrolado	enroscado	entalado
entalhado	entrançado	entupido	esfolado
esmagado	espatifado	estilhaçado	estreitado
estressado	estriado	explodido	faltando
fatigado	fechado	fendido	firme
fragmentado	fraturado	frouxo	fundido
furado	gasto	glutinoso	impedido
inflexível	inoperante	instável	intermitente
interrompido	irregular	lascado	ligado
obstruído	pegajoso	perdido	perfurado
picado	picotado	puído	puncionado
quebradiço	quebrado	queimado	rachado
raiado	ralado	rasgado	raspado
rodeado	rompido	seco	separado
sobreaquecido	sobrecarregado	sobrepresionado	sobreveloz
sujo	teso	torcido	tosquiado
trançado	travado	vazado	viscoso

Figura 20 – Modos de Falha.

Fonte: Siqueira, 2005.

2.4.4 A relação entre a FTA e a FMEA

A Análise de Árvore de Falhas (FTA) e a Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA) tem muito em comum: Podem prever falhas (problemas) em processos e produtos, podendo também ser empregados na solução de problemas e na construção de planos ou estratégias de manutenção.

No entanto, através da FTA pode-se elaborar o FMEA com maior agilidade. Cada evento da FTA pode ser representado como um item do FMEA.

Fica mais fácil, visualizando a FTA, estabelecer o efeito e a causa da falha na planilha da FMEA. Fica faltando somente a hierarquização por meio do índice de risco. As tabelas 6 e 7 comparam os dois métodos em relação a alguns parâmetros.

Tabela 6: Comparação FTA vs FMEA I.

CARACTERÍSTICA (Melhor para:)	FTA	FMEA
Analisar falhas múltiplas	X	
Analisar falhas isoladas		X
Evitar a análise de falhas não críticas	X	
Identificar eventos de alto nível causado por eventos de nível mais baixo	X	
Ter uma abrangência maior ao analisar a falha		X
Ter menos restrições e ser mais fácil de seguir	X	
Identificar influências externas	X	
Identificar características críticas		X
Prover um formato para validação dos planos		X

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

Tabela 7: Comparação FTA vs FMEA II.

CARACTERÍSTICA (Deveria se usada quando:)	FTA	FMEA
Análise quantitativa	X	
Não há necessidade de se garantir que a falha de cada componente seja analisada		X
Informação é limitada às características do sistema e a funções básicas	X	
Informações de projeto detalhadas em desenhos e especificações		X
Avaliar alternativas de projeto/abordagem	X	
Avaliar redundâncias	X	
Avaliar integridade do projeto, incluindo: detecção de falhas e <i>failure-safe</i>		X
Análise dedutivas de Cima para baixo	X	
Análises indutivas de baixo para cima		X

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

3 METODOLOGIA

Foi realizado um estudo sobre manutenção industrial, levantando e arquivando informações inerentes a área principalmente nos três pilares base para o desenvolvimento e construção da Árvore de Falhas, sendo eles o pilar técnico, gerencial e de confiabilidade. Essas informações foram baseadas no ambiente industrial com foco no trabalho, ou seja, elaboração da árvore de falhas de um compressor.

Compressores industriais são máquinas que envolvem muitos custos. A produção de ar comprimido pode envolver até 40% dos valores da fatura de energia elétrica em uma empresa (ABRAMAN) e está presente em cerca de 70% dos processos industriais, gerando um grande interesse para este equipamento.

Por essas razões escolheu-se essa máquina como alvo para aplicação da ferramenta em estudo FTA. Na figura 21, o compressor GA 75 W Atlas Copco utilizado.



**Figura 21 – Compressor GA 75 W Atlas Copco.
Fonte: Autoria própria.**

Neste trabalho foram utilizados os materiais abaixo:

- Manuais do compressor GA 75 W (manual funcionamento, manual de instalação, manual de manutenção);
- Livros de manutenção industrial e confiabilidade;
- Histórico da máquina (histórico de quebras, alarmes, manutenções, executantes);
- Consultor;
- Revisão de notas, croquis e rascunhos obtidos através de reuniões ou conversas cotidianas com grupos de operadores, técnicos em mecânica ou elétrica que atuam diariamente na máquina e contato com o fabricante da máquina.

O método utilizado na fundamentação dos parâmetros necessários para construção do fluxograma que representa a Análise da Árvore de falhas é discorrido no tópico seguinte.

3.1 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS – FTA

Para a construção da Árvore de Falhas do compressor foi necessário entender o funcionamento do compressor. Compreender toda sua estrutura, aprendendo sobre os componentes e sistemas internos. Estudar o manual, os planos de manutenção, os sintomas de falhas e as condições básicas de funcionamento para poder mapear as suas falhas e desenvolver a construção apropriadamente.

A elaboração da Árvore de Falhas consiste em determinar o evento topo, determinar os seus subsistemas que quando desenvolvidos formam os *cutsets* que são compostos por eventos básicos, eventos falha, eventos não desenvolvidos, eventos normais ou eventos condicionais. Os fluxos, sentidos e possibilidades são transmitidos por elementos de transferência e portas lógicas.

Essas definições são expressas por símbolos ou padronizações, que estão em níveis delimitados e organizados estruturadamente num diagrama. Dentro deste contexto a Árvore de Falha mostra as possíveis maneiras de ocorrências das falhas (LAFRAIA, 2001, pg. 105).

O evento topo ou sistema, também chamado evento principal que é o problema ou hipótese indesejada em análise é o primeiro passo. Através dele, se determina o restante da análise, de forma sequencial. Pensando em um equipamento, esse evento é basicamente a perda de sua função. Na figura 22 um exemplo de evento topo.

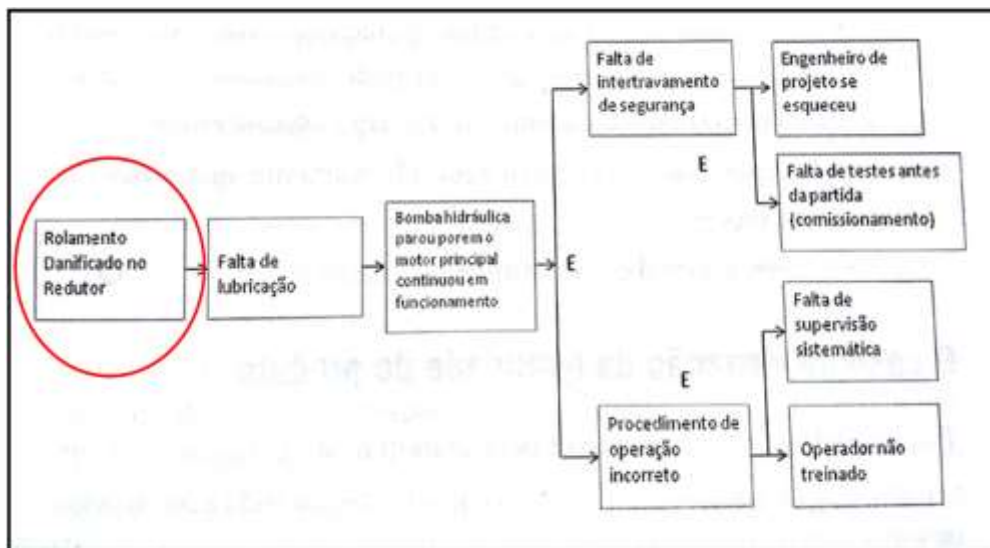


Figura 22 – Evento topo.
Fonte: Baptista, 2016, pg. 85.

Feita a seleção e identificação do sistema, foram definidos os subsistemas, que são os fatores imediatos que contribuem para a ocorrência do evento, determinando também as relações interpessoais entre eles (BAPTISTA, 75).

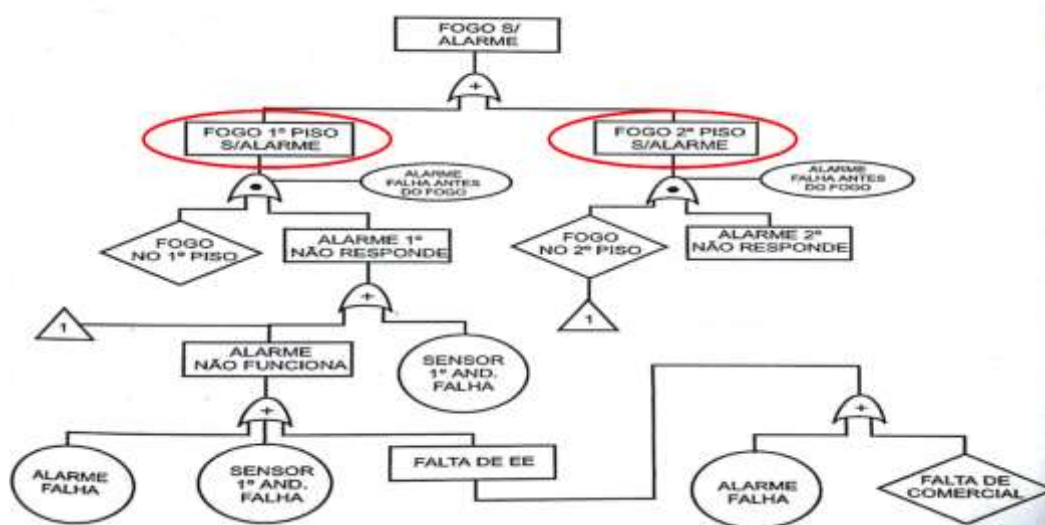


Figura 23 – Subsistemas.
Fonte: Lafraia, 2001, pg. 129.

Função é o que o usuário deseja que o sistema faça dentro de um padrão de desempenho especificado. Um sistema raramente desempenha uma única função, e existe uma hierarquia de funções associada a cada sistema, que inclui sua finalidade original, e as funções secundárias ou auxiliares. Identificar as funções é muito importante, uma vez que muitas falhas operacionais se originam em funções secundárias (SIQUEIRA, 2005). Na tabela 8, a classificação de funções e seus objetivos.

Tabela 8: Classificação das funções.

Função	Objetivo
Principal	Gera o objetivo principal do sistema
Secundária	Acrescenta objetivos ao sistema
Auxiliar	Modifica objetivos do sistema
Supérflua	Introduz objetivos desnecessários

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

A partir deste ponto, o trabalho começou a ser organizado num diagrama de blocos. Até aqui, a árvore de falhas possui sistema, subsistemas e as respectivas funções. Na figura 24, o exemplo de um diagrama de blocos de um motor.

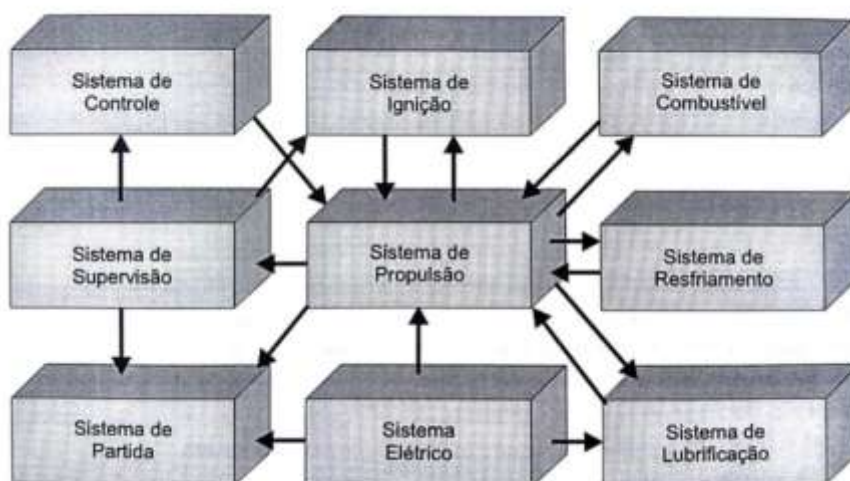


Figura 24 – Diagrama de blocos.

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

Cada subsistema foi analisado separadamente, observando o histórico da máquina e investigando hipóteses de falhas em potencial. Com a metodologia baseada em símbolos e seus respectivos significados, cada evento recebeu uma classificação representando uma ocorrência com seu significado e sua

prioridade ou grau de importância. A simbologia utilizada para representar os diferentes eventos e seus respectivos significados é apresentada na figura 25.

Símbolo	Nome	Descrição
	Retângulo	Eventos de saída de portas lógicas.
	Círculo	Eventos associados a falhas básicas.
	Diamante	Eventos não realizados (Omitidos).
	Casa	Parâmetro associado a um evento que deve ser monitorado.
	Oval	Evento condicional, usado em conectores de inibição.
	Triângulo	Conexão com outro símbolo ou evento, possivelmente em outra página.
	E	Evento de saída que só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem.
	Ou	Evento de saída que ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer.
	Inibição	Evento de entrada só é transmitido ao evento de saída se o evento condicional ocorrer.
	E prioridade	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrerem na ordem da esquerda para a direita.
	Ou exclusiva	Evento de saída ocorre se um, mas não ambos, dos eventos de entrada ocorrer.
	M em n	Evento de saída ocorre se M em N dos eventos de entrada ocorrerem.

Figura 25 – Simbologia FTA.
Fonte: Siqueira, 2005.

No entanto, nem todos os símbolos da figura 25 foram utilizados. A figura 26, mostra a simbologia que foi utilizada ao longo do desenvolvimento da Árvore de Falhas do compressor GA 75 W aqui descrito.



Figura 26 – Simbologia FTA utilizada.

Fonte: Lafraia, 2001, pg. 125.

Organizada e construída a Árvore de falhas até este ponto do trabalho, seus subsistemas ou os *cutsets* completos teria aproximadamente o seguinte formato:

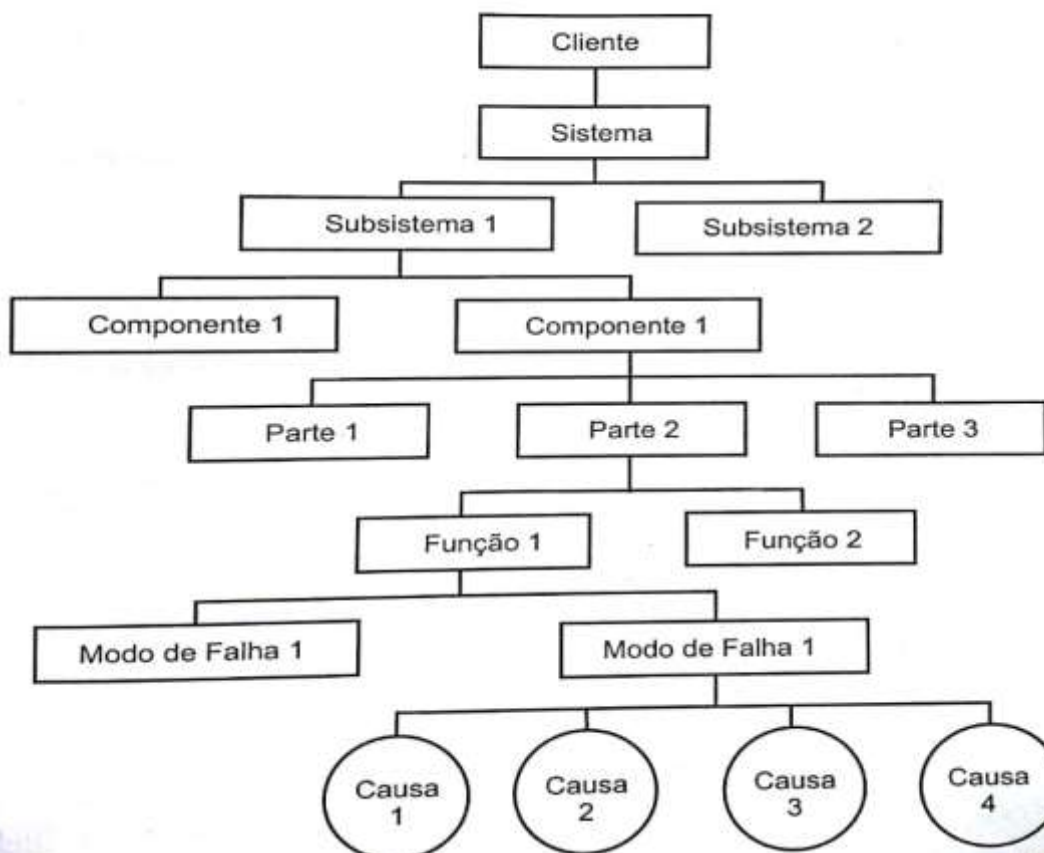


Figura 27 – Árvore de falhas incompleta.

Fonte: Lafraia, 2001, pg. 107.

Ainda existe a simbologia utilizada para expressar a ideia de fluxo, direção e suas possibilidades. São os símbolos de transferência e as portas lógicas, que mostram os caminhos que as falhas percorrem desde uma falha potencial até a quebra de fato. Neste status, é possível observar a falha desde sua raiz, percorrendo os componentes do topo para baixo, dentro de um subsistema, até atingir o sistema, ou causar o evento indesejado. A figura 28, apresenta os símbolos que caracterizam as diferentes portas lógicas e padrões que expressam transferência.

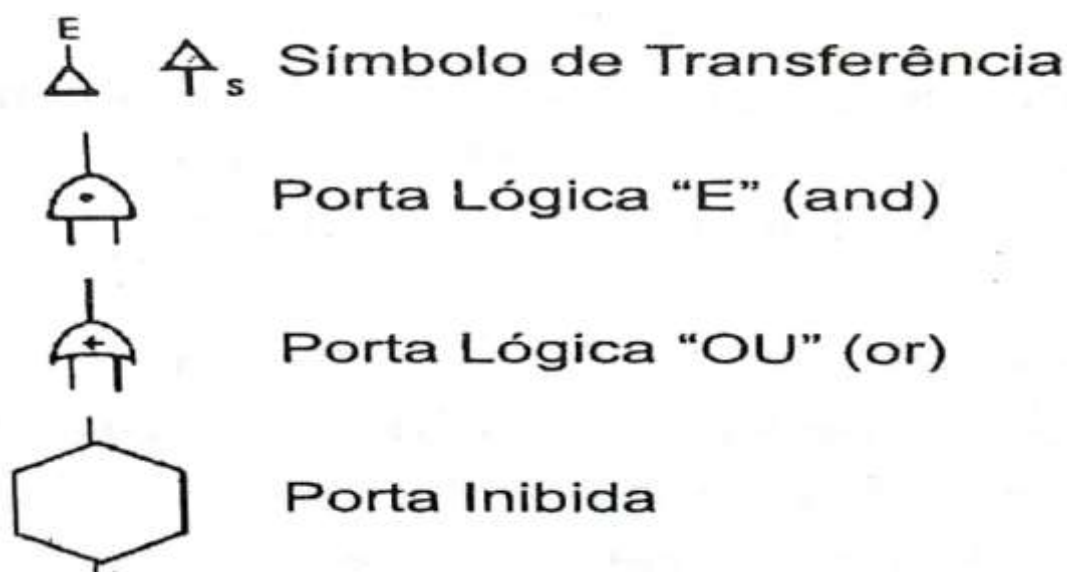


Figura 28 – Elementos de transferência e portas lógicas.
Fonte: Lafraia, 2001, pg. 125.

Com todos os recursos descritos até aqui, é possível construir o diagrama lógico que pode ser desenvolvido em um *software*. Nesta construção, olhando de cima para baixo, os eventos são posicionados em níveis, aonde o que está mais acima é o evento topo ou, o que não queremos que aconteça. Um exemplo de diagrama lógico que compõe a estrutura organizada da máquina pode ser visto na figura 29.

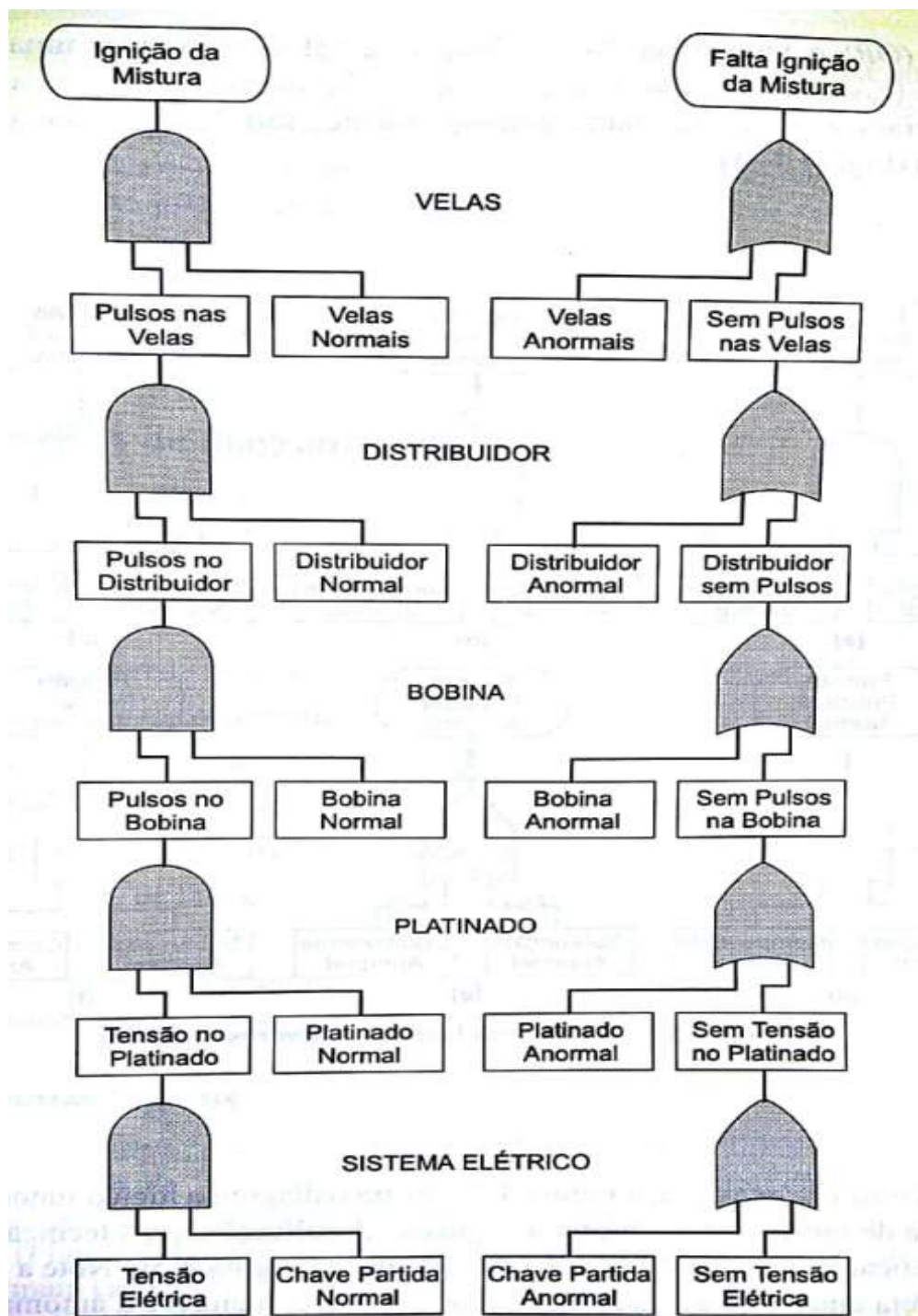


Figura 29 – Diagrama lógico.
 Fonte: Siqueira, 2005, pg. 60.

O sistema é entendido quando compreendemos os níveis. Os níveis se dividem em decorrência das funções (SIQUEIRA, 2005). Quando descendo os níveis, chega-se nas causas, até as mais simples, os modos de falha e os eventos que não são desenvolvidos conforme figura 30.

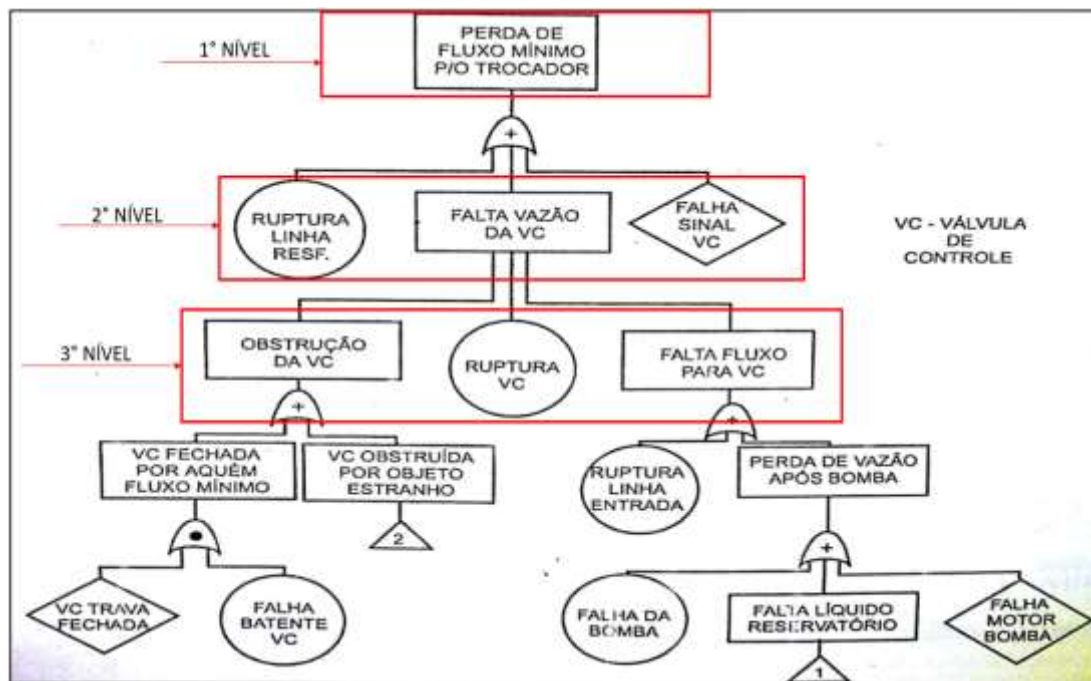


Figura 30 – Níveis.
Fonte: Lafraia, 2001, pg. 130.

Cada subsistema quando finalizado, contendo todas as possibilidades de ocorrência de falha dentro daquele grupo da máquina formam um conjunto. Todo esse conjunto é denominado *cutset*. Um exemplo pode ser visto na figura 31.

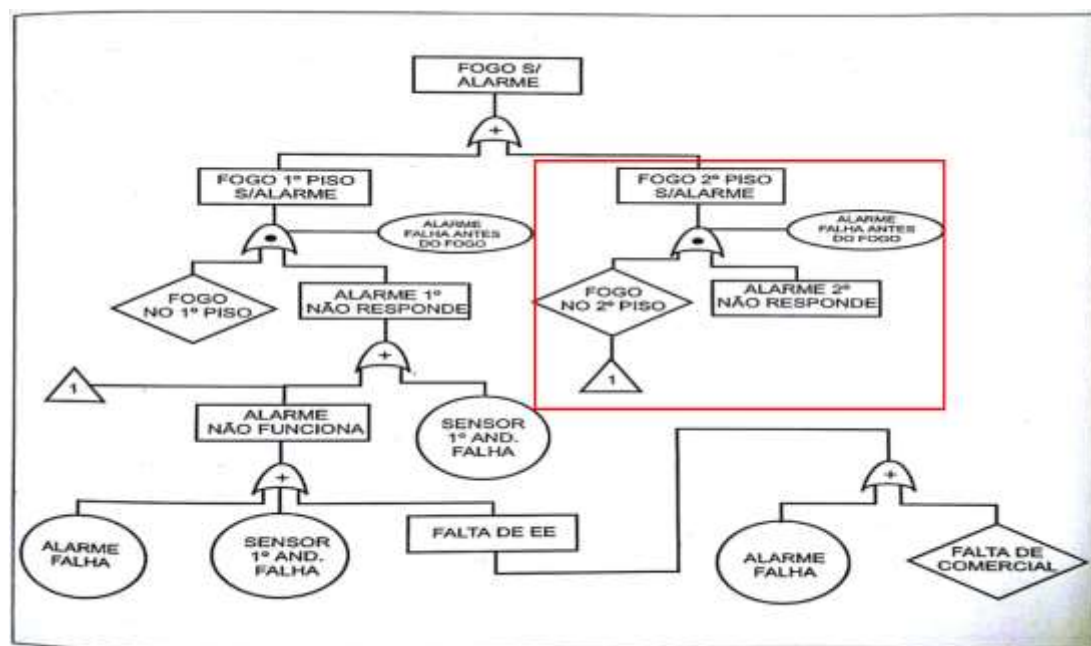


Figura 31 – *Cutset*.
Fonte: Lafraia, 2001, pg. 129.

Com toda a estruturação e parâmetros estabelecidos, com auxílio de croquis e esboços pré-estabelecidos em estudos ou feitos *in loco* foi possível desenvolver o diagrama lógico que representa a Árvore de falhas. O *software* utilizado foi o *lucidchart*. O mesmo contém todas as ferramentas necessárias para a construção, salva as alterações automaticamente e está disponível online na conta do usuário. Uma imagem com o menu do software pode ser vista na figura 32.

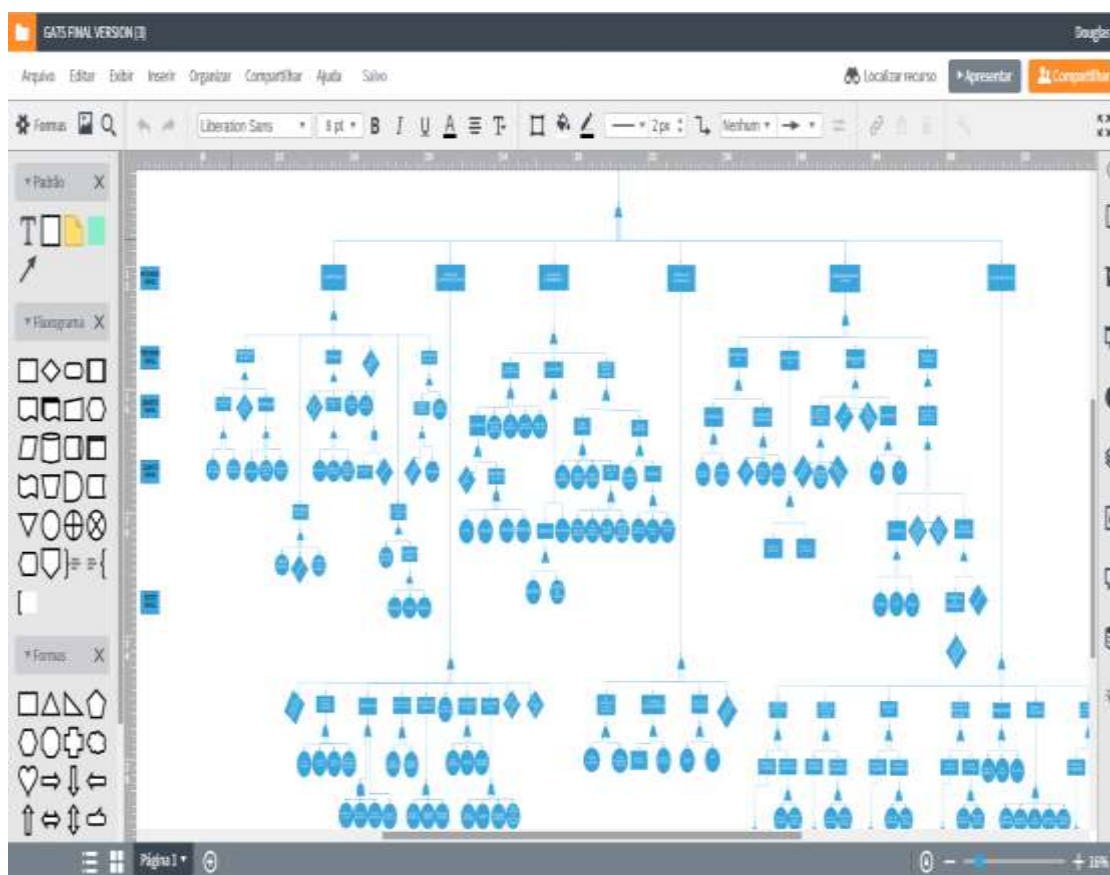


Figura 32 – Janela típica do Software Lucidchart.
Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS

Depois de realizados todos estudos e análises qualitativas e quantitativas, foi construída a Árvore de Falhas (FTA), representada no diagrama na figura 33 abaixo reduzida ou em folha A0 em apêndice.

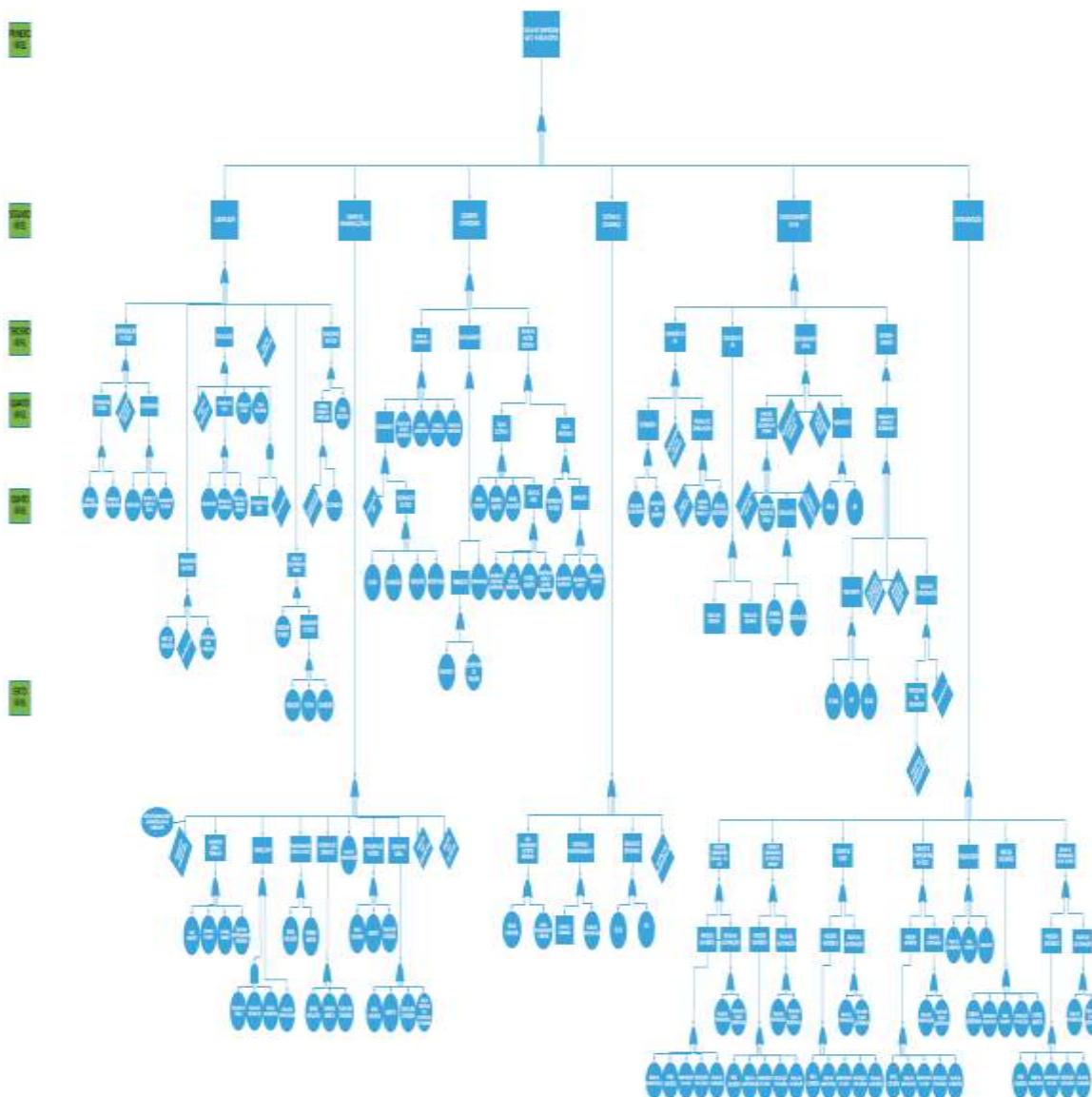


Figura 33 – Árvore de Falhas do Compressor GA 75 W Completa.
Fonte: Autoria Própria.

O trabalho se desenvolveu ao longo de sete níveis estruturais. A figura 34 mostra até o quarto nível.

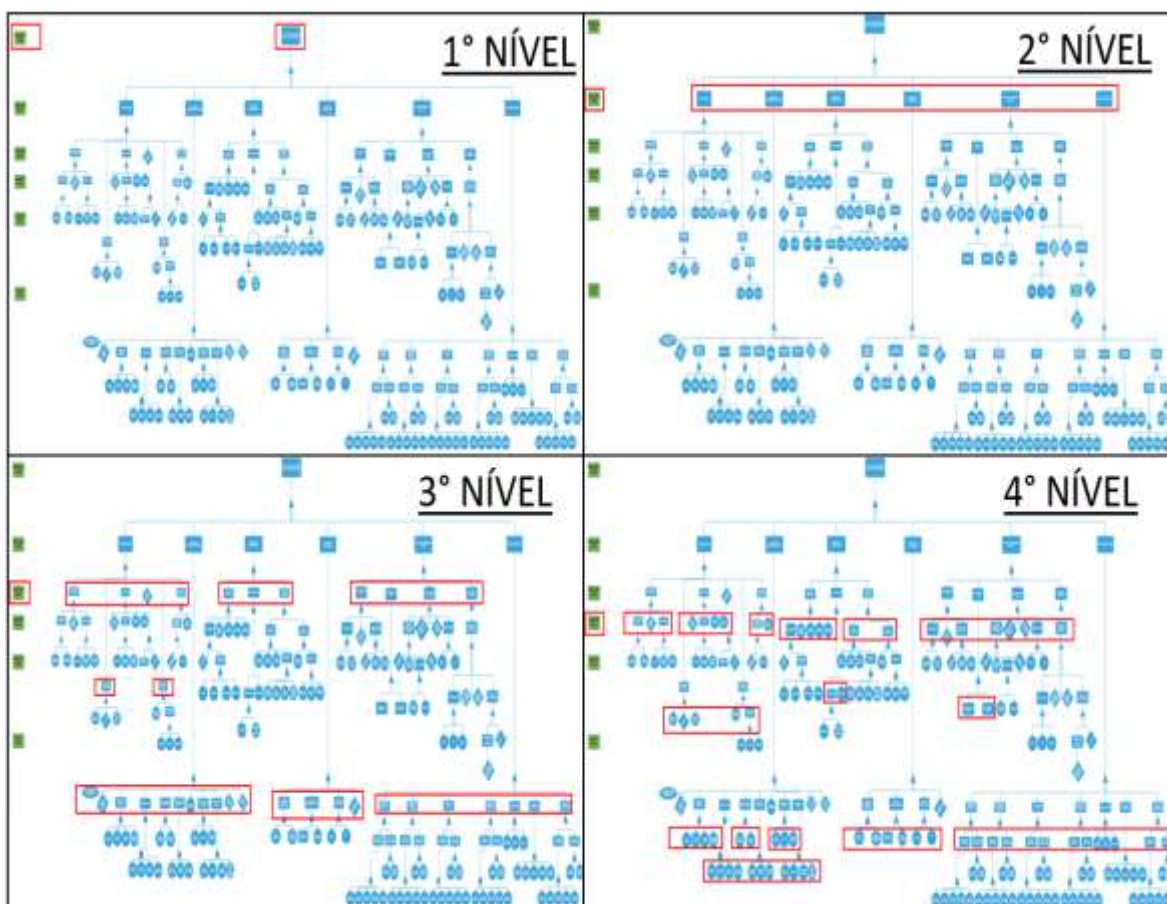


Figura 34 – Níveis do Sistema.
Fonte: Autoria própria.

4.1 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS – FTA

O primeiro passo foi a definição do evento principal ou evento topo do sistema, sendo este denominado “Falha no Compressor GA 75 W”, representado no quadrado ao topo do diagrama, mostrado em detalhe na figura 35. Este é o sistema que foi estudado, e é o primeiro nível.



Figura 35 – Evento Topo.
Fonte: Autoria Própria.

O evento topo “falha no compressor GA 75 W”, está seguido de um símbolo de transferência e na sequência uma porta lógica “E”, que os ramifica até o nível inferior.

A partir do evento topo, foi possível definir o segundo nível do sistema, ou também os subsistemas, que são os grandes grupos dentro da máquina, ou os possíveis locais de ocorrência que podem levar à sua parada. Foram definidos 6 subsistemas no segundo nível do sistema, sendo eles:

- Elemento compressor;
- Lubrificação;
- Condicionamento do ar;
- Instrumentação;
- Quadro de comandos elétricos;
- Sistema de segurança.

Os subsistemas ou o segundo nível do sistema também podem ser vistos em uma escala maior do diagrama em anexo ou na figura 36 abaixo.

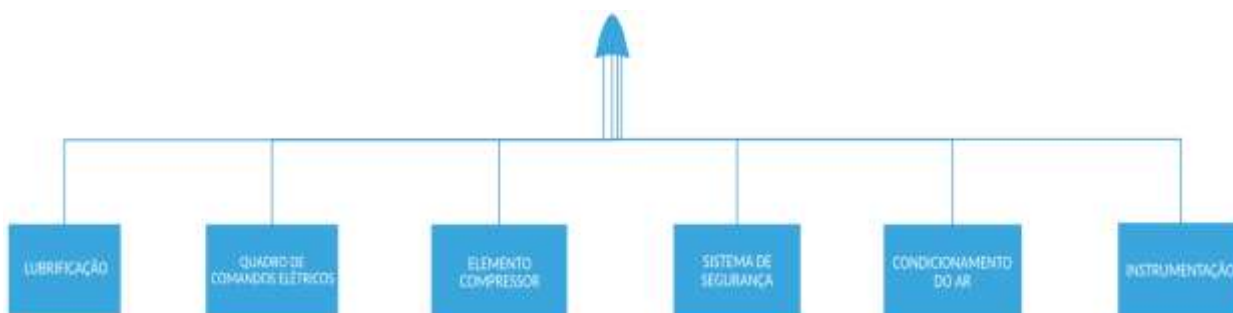


Figura 36 – Subsistemas do Sistema.
Fonte: Autoria Própria.

Cada subsistema possui uma porção de elementos e componentes melhores especificados no manual do fabricante e que podem ser melhores explorados numa análise FMEA completa. Para a análise, levou-se em consideração os dados estatísticos da máquina, prioritariamente os componentes com maiores tendências a falhar, ou seja, os caminhos que possuem maiores probabilidades de falhar, ou aquilo que as pessoas que trabalham diretamente na máquina relataram ser mais provável ou óbvio de acontecer, apresentados na figura 36.

Após a definição do segundo nível, foi estabelecido o terceiro nível do sistema. Cada um dos subsistemas ou causas imediatas será apresentado

abaixo, relacionando suas possíveis causas, ou efeitos expandindo para tantos níveis quantos forem necessários conforme mostrará cada um dos *cutsets*, explicados detalhadamente.

4.1.1 Elemento compressor

Após estabelecidos todos os eventos do segundo nível, foi aberto cada um deles detalhadamente, iniciando pelo subsistema elemento compressor. Dentro deste, foram definidos 3 eventos no terceiro nível, sendo eles: Falha no compressor, acoplamento, falha no motor elétrico, vistos na figura 37, que representa o terceiro nível deste *cutset*.



**Figura 37 – Terceiro Nível do Elemento Compressor.
Fonte: Autoria Própria.**

Estes eventos foram direcionados com símbolos de transferência através de portas lógicas “E” até os seus subsequentes efeitos e assim sucessivamente, até que não houvessem mais possibilidades de ocorrência de falha naqueles elementos da máquina. A configuração completa do *cutset* elemento compressor com todos os níveis pode ser visto na figura 38 abaixo.

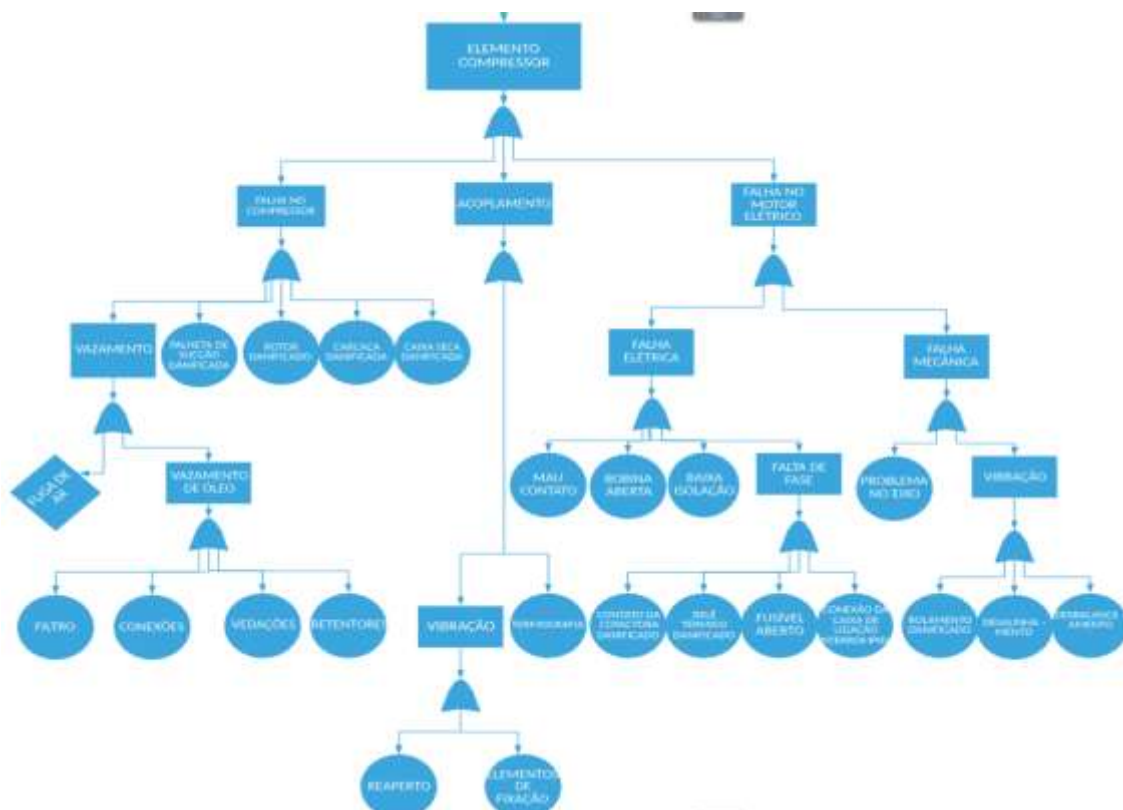







Figura 38 – Cutset Elemento Compressor Completo.
Fonte: Autoria Própria.

A análise quantitativa que mensurou cada fenômeno pode ser vista abaixo na tabela 9. O desenvolvimento deste subsistema contém portas lógicas “E”, eventos falha, eventos simples e eventos que não foram desenvolvidos. Estes foram posicionados cada qual respeitando sua ordem de ocorrência conforme a estruturação pré-definida, divididos ao longo de 6 níveis.

Tabela 9: Simbologia utilizada no Elemento Compressor.

Subsistema Elemento Compressor		
Símbolo	Descrição	Quantidade
	Níveis	6
	Porta lógica "E"	11
	Eventos falha	10
	Evento simples	22
	Eventos não desenvolvidos	1

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

4.1.2 Lubrificação

O subsistema de lubrificação foi dividido em: Refrigeração do óleo, circulação, falha elétrica, qualidade do óleo, também expressos na figura 39 abaixo.



Figura 39 – Terceiro nível do Subsistema Lubrificação.
Fonte: Autoria Própria.

Os eventos deste subsistema foram direcionados através de portas lógicas “E”, portas lógicas “OU” e também através de símbolos de transferência até os seus subsequentes efeitos conforme figura 40 que mostra o *cutset* completo.

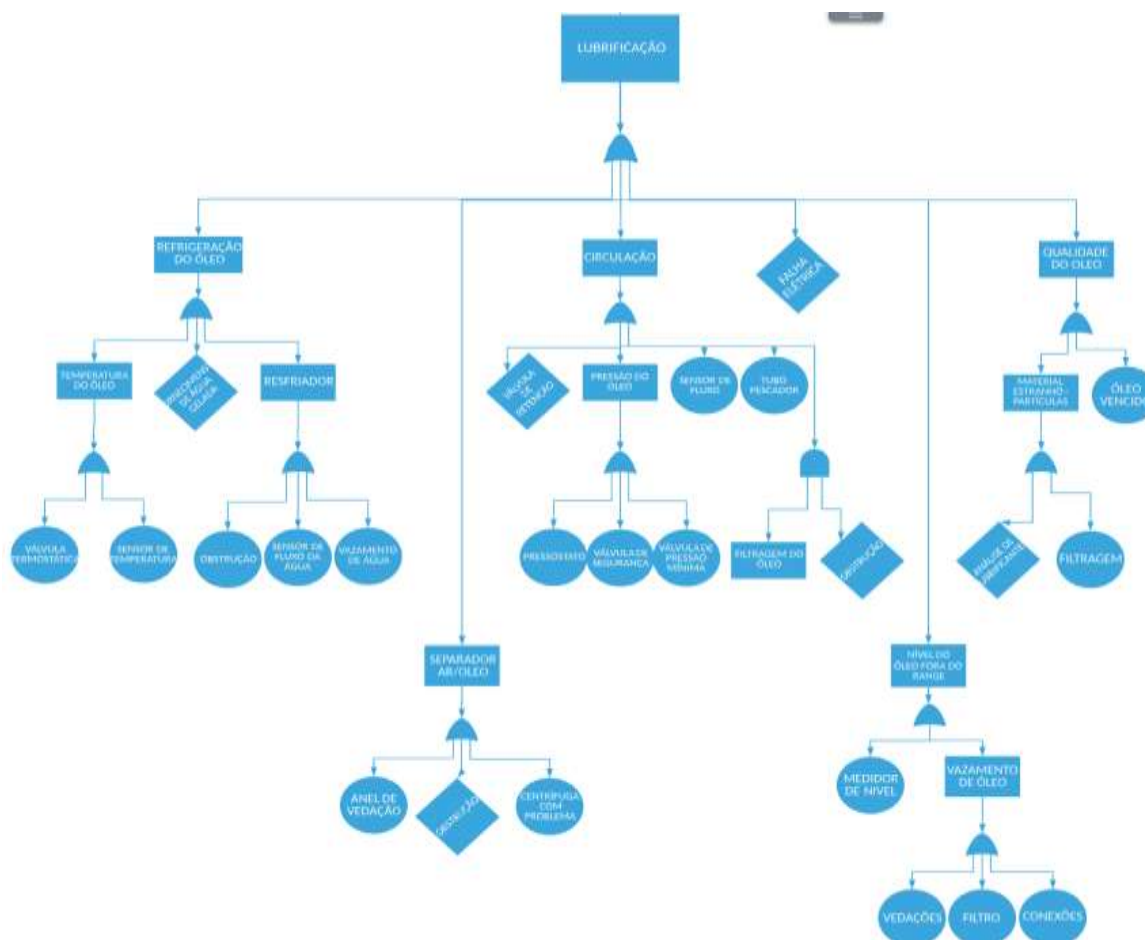





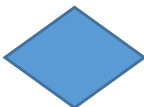


Figura 40 – *Cutset* Lubrificação Completo.
Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizadas portas lógicas “E” e uma porta lógica “OU”. Foram modos de falha, eventos simples e eventos não desenvolvidos, quantificados na tabela 10, cada qual posicionado no seu nível de ocorrência.

Tabela 10: Simbologia utilizada na Lubrificação

Subsistema Lubrificação		
Símbolo	Descrição	Quantidade
	Níveis	5
	Porta lógica "E"	11
	Porta lógica "OU"	1
	Eventos falha	11
	Evento simples	18
	Eventos não desenvolvidos	5

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

4.1.3 Condicionamento do ar

No subsistema denominado condicionamento de ar, foram definidos 4 eventos no terceiro nível: Admissão do ar, descarga do ar, resfriamento do ar, secagem – umidade, (figura 41). Todos eles classificados como eventos falha.



Figura 41 – Terceiro Nível do Condicionamento de Ar.
Fonte: Autoria Própria.

Estes foram conduzidos entre si através de portas lógicas “E” e elementos de transferência. O *cutset* completo pode ser visto na figura 42.

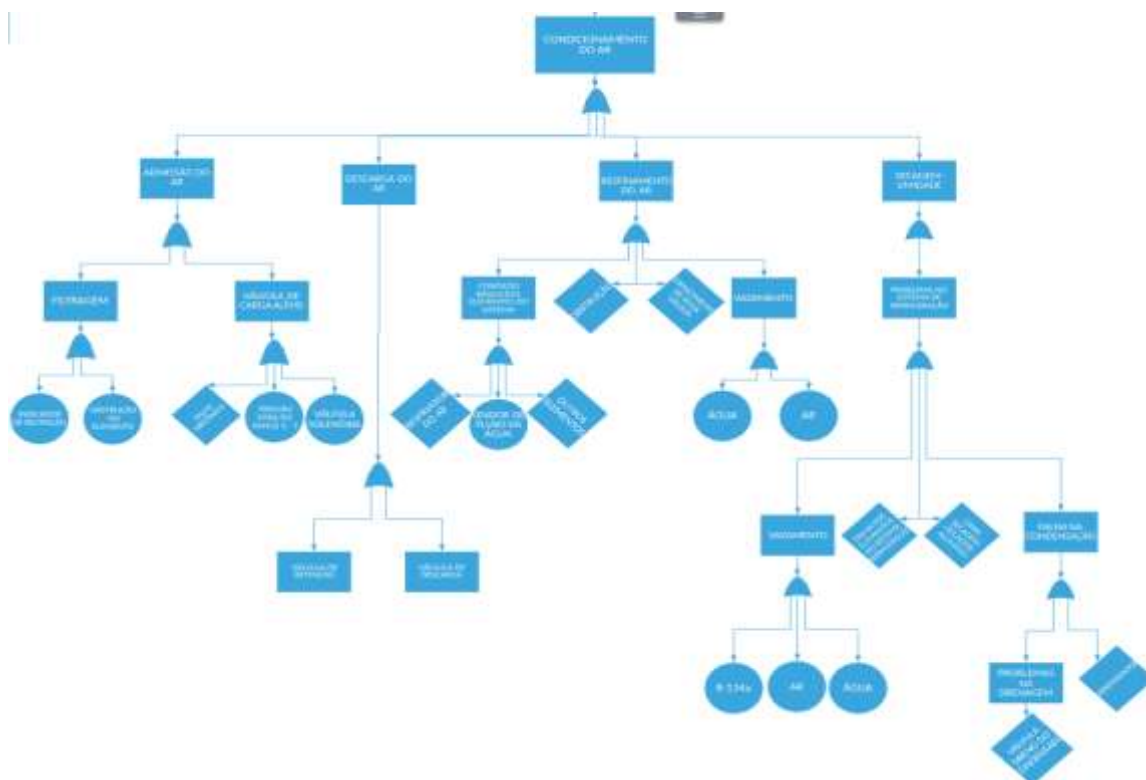


Figura 42 – Cutset Condicionamento de Ar Completo.
Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizadas portas lógicas “E”, uma porta lógica “OU”, distribuídos ao longo de modos de falha, eventos simples e eventos não desenvolvidos, quantificados na tabela 11, cada qual posicionado no seu nível de ocorrência.

Tabela 11: Simbologia utilizada no Condicionamento de Ar.

Subsistema Condicionamento do Ar		
Símbolo	Descrição	Quantidade
	Níveis	7
	Porta lógica "E"	13
	Eventos falha	15
	Evento simples	12
	Eventos não desenvolvidos	10

Fonte: Kardec e Nascif, 2009.

4.1.4 Quadro de comandos elétricos

No subsistema denominado quadro de comandos elétricos foram definidos os eventos falhas: Falha na comunicação com *smart link*, contactor estrela triângulo, painel IHM, transformador 380/115 e 24VDV, medidor de corrente, placa de comunicação, conjunto de fusíveis, disjuntor geral e por fim desarmes e alarmes, figura 43.

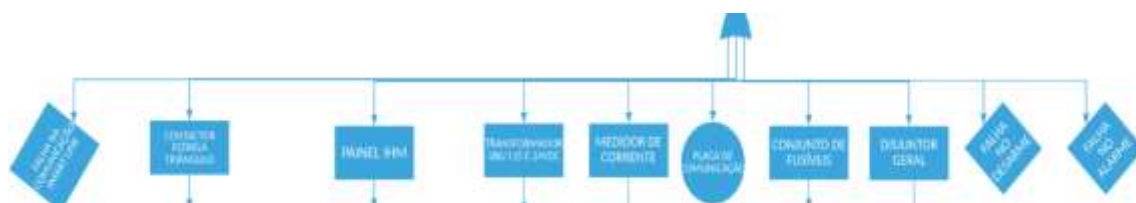


Figura 43 – Terceiro Nível Quadro de Comandos Elétricos.
Fonte: Autoria Própria.

Este subsistema chama a atenção pela diversidade de eventos que ocorrem no terceiro nível, conduzidos através de portas lógicas “E” ou portas lógicas “OU” e também elementos de transferência. O *cutset* completo pode ser visto na figura 44.

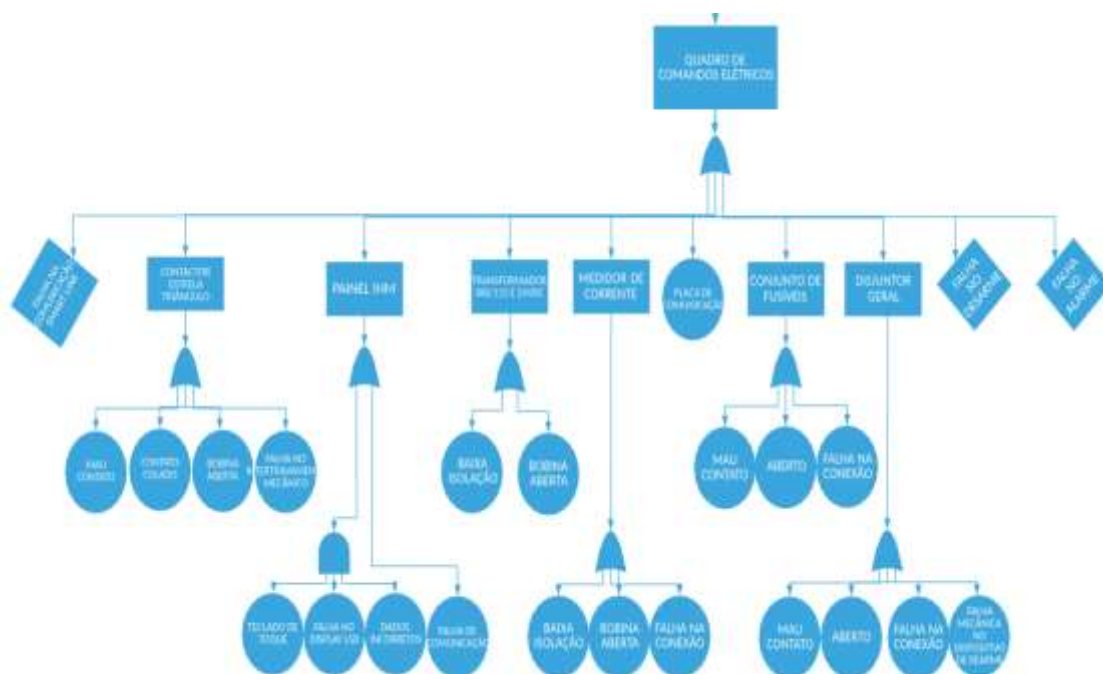


Figura 44 – Cutset Quadro de Comandos Elétricos Completo.
Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizadas portas lógicas “E”, uma porta lógica “OU”, definidos modos de falha, eventos simples, eventos não desenvolvidos e um evento condicional, quantificados na tabela 12. Foram posicionados cada qual no seu nível de ocorrência.

Tabela 12: Simbologia utilizada no Quadro de Comandos Elétricos.

Subsistema Quadro de Comandos Elétricos		
Símbolo	Descrição	Quantidade
	Níveis	4
	Porta lógica "E"	7
	Porta lógica "OU"	1
	Eventos falha	6
	Evento simples	21
	Evento condicional	1
	Eventos não desenvolvidos	3

Fonte: Autoria Própria.

4.1.5 Instrumentação

No subsistema instrumentação forma definidos no terceiro nível: Sensor de temperatura de água de entrada e de saída, sensor de temperatura do ponto de orvalho, sensor de fluxo, sensor de temperatura do óleo, pressostato, válvula solenoide, sensor de temperatura do ar de entrada e de saída, na figura 45 abaixo.



Figura 45 – Terceiro Nível Instrumentação.
Fonte: Autoria Própria.

Estes foram conduzidos entre si através de portas lógicas “E” e elementos de transferência. O cutset completo pode ser visto na figura 46.

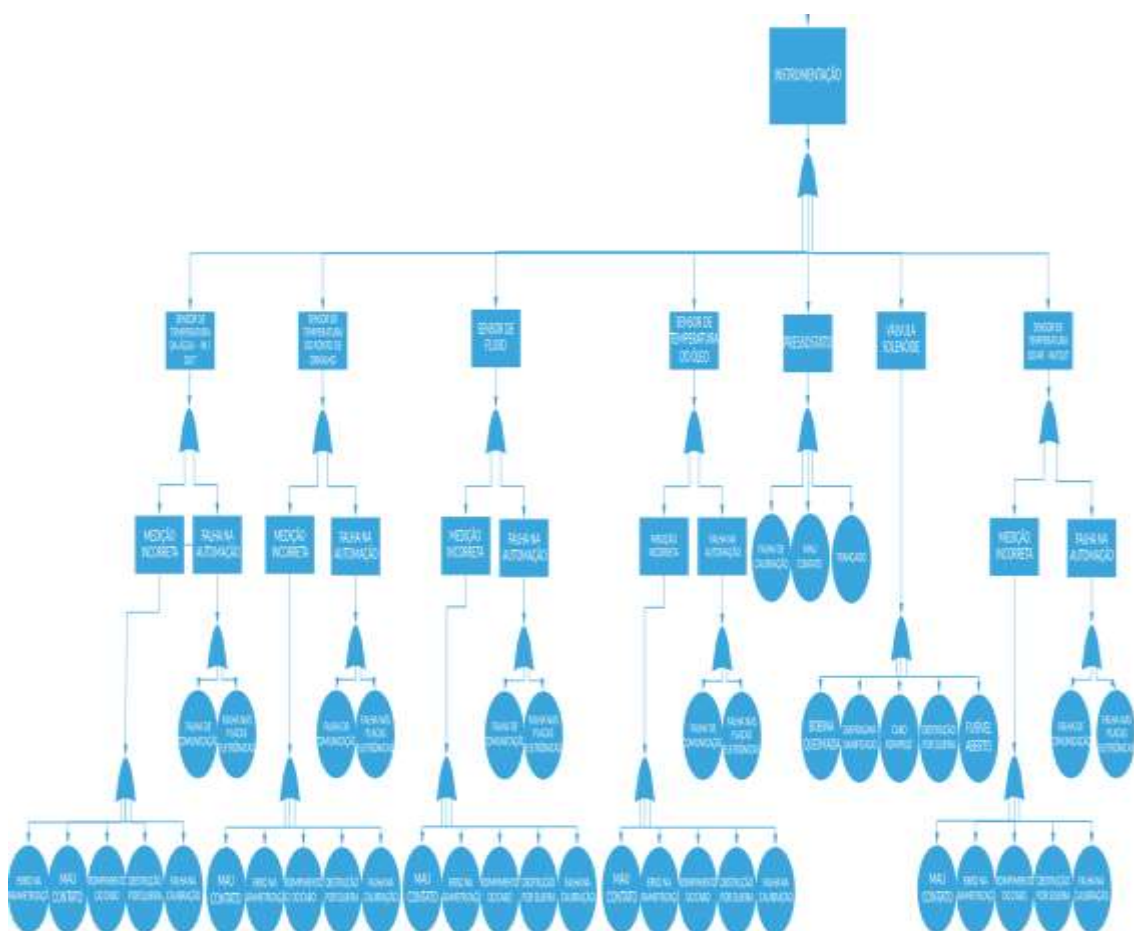
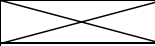





Figura 46 – Cutset Instrumentação Completo.
Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizadas portas lógicas “E”, e definidos modos de falha, eventos simples e eventos não desenvolvidos, quantificados na tabela 13.

Tabela 13: Simbologia utilizada na Instrumentação

Subsistema Instrumentação		
Símbolo	Descrição	Quantidade
	Níveis	5
	Porta lógica "E"	18
	Eventos falha	17
	Evento simples	43

Fonte: Autoria Própria.

4.1.6 Sistema de segurança

No subsistema denominado sistema de segurança foram definidos 4 elementos no terceiro nível, sendo eles: Não cumprimento de testes periódicos, controle e monitoramento, válvula de segurança e botão de emergência, também mostrados na figura 47.



Figura 47 – Terceiro nível do Sistema de Segurança
Fonte: Autoria Própria.

Estes foram conduzidos entre si através de portas lógicas “E” e elementos de transferência. O cutset completo pode ser visto na figura 48.

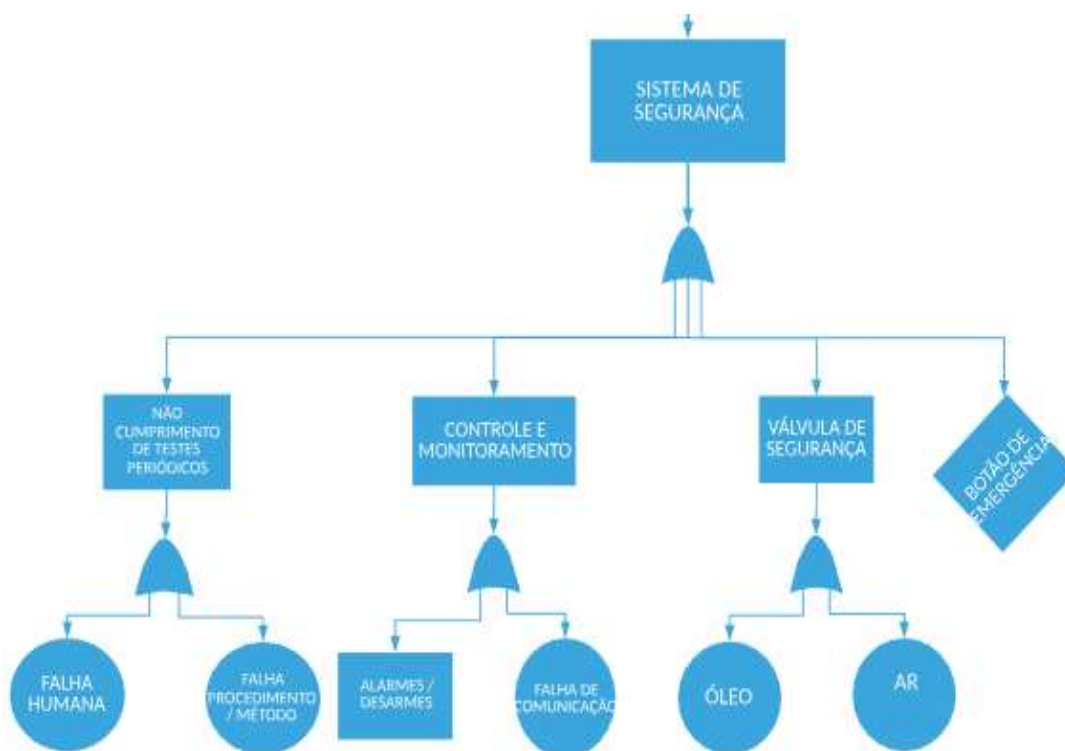


Figura 48 – Cutset Sistema de Segurança Completo
Fonte: Autoria Própria.

Neste *cutset* foram utilizadas portas lógicas “E” distribuídas entre modos de falha, eventos simples e um evento não desenvolvido, quantificados na tabela 14.

Tabela 14: Simbologia utilizada no Sistema de Segurança.

Subsistema Sistema de Segurança		
Símbolo	Descrição	Quantidade
	Níveis	4
	Porta lógica "E"	4
	Eventos falha	4
	Evento simples	5
	Eventos não desenvolvidos	1

Fonte: Autoria Própria.

O resultado final é a união de todos os *cutset* ou subsistemas detalhados em um diagrama expandindo com todo o estudo detalhado.

Este diagrama foi enquadrado e instalado ao lado da máquina, e poderá auxiliar os manutentores, principalmente os novos, na verificação dos possíveis caminhos percorridos por uma falha, evidente, eminentes ou em potencial. O quadro completo pode ser visto no apêndice A.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema desenvolvido neste trabalho mostrou-se adequado para algumas metodologias utilizadas para a elaboração de planos de manutenção de máquinas e equipamentos.

A ferramenta *Failure Tree Analysis* ou FTA foi aplicada no compressor e o diagrama da Árvore de Falhas foi desenvolvido no *software lucidchart*, que mostrou ser muito eficiente, oferecendo as ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Devido aos altos custos de aquisição e manutenibilidade e também a grande dependência e necessidade de disponibilidade desta máquina, pode-se concluir que as manutenções preditivas e detectivas são as mais recomendadas juntamente à Engenharia de Manutenção. Manutenção corretiva em hipótese alguma.

Após estudar esse tema, comparar vários trabalhos e desenvolver este trabalho conclui-se que existe um fator subjetivo, ou seja, a mesma Análise e Construção da Árvore de Falhas deste compressor, efetuada por uma terceira pessoa não necessariamente ficaria idêntica a esta.

Tudo o que pode acontecer em termos de falhas ou quebras tem que estar indicado em uma Análise FTA ou FMEA. Caso não esteja, deverá entrar numa próxima edição do estudo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Outras conclusões quantitativas poderão ser analisadas com o tempo, quanto à eficiência da ferramenta, já incluindo uma possível revisão e edição deste trabalho.

Este trabalho pode ser um embasamento para uma futura Análise FMEA e conseqüente construção, revisão ou melhoria no plano de manutenção deste equipamento ou semelhante.

Este trabalho pode servir como embasamento na execução da mesma atividade em outros equipamentos visto que se encontra aqui descrita a metodologia necessária. Pode também ser utilizado para disseminar o conhecimento na manutenção industrial com as fontes de informação aqui descritas.

7 REFERÊNCIAS

ABRAMAN. Página eletrônica: <<http://www.abraman.org.br/>>. Acesso em 11 out. 2011.

ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. 2000. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>>. Acesso em 06 out. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BAPTISTA, J. A.. **Manutenção Industrial**. 2ª edição. São Paulo: Lura, 2016, 256 p.

BELHOT, R. V.; CAMPOS, F. C. **Relações entre manutenção e engenharia de produção**: uma reflexão. *Revista Produção* [On line]. Vol.5, n.2, 2005. Disponível em: <<http://www.revistaproducao.net/arquivos/websites/32/v05n2a01.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2017.

CAMPOS JÚNIOR, E. E. **Reestruturação da área de planejamento, programação e controle na Gerência de manutenção Portuária – CVRD**. 2006. 74f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2006. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/50480408/3/HISTORICO-DA-MANUTENCAO>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

CAMPOS, V. F. **TQC – Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. Belo Horizonte: INDG, 1992.

FERREIRA, L. L.. **Implementação da Central de Ativos para melhor desempenho do setor de manutenção**: um estudo de caso Votorantim

Metais. 2009. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

FILHO, R. A. **Introdução à Manutenção Centrada na Confiabilidade – MCC.** *Programa de Atualização Técnica 2008 – Sistema FIRJAN - SESI/SENAI – Rio de Janeiro* [Online]. Disponível em <<http://manutencao.net/v2/uploads/article/file/Artigo24AGO2008.pdf>> Acesso em 13 fev. 2018.

FREITAS, M. A. S.. **Implementação da Filosofia TPM (Total Productive Maintenance):** um estudo de caso. Disponível em: <<http://www.epr.unifei.edu.br/TD/producao2002/PDF/Marco.PDF>>. Acesso em: 22 fev. 2018.

J. I. P. M. Japanese Institute of Plant Maintenance. TPM frequently asked questions. 2002. Disponível em <www.jipm.or.jp/en/home> Acesso em 10 out 2017.

KARDEC, A.; NASCIF J.. **Manutenção: função estratégica.** 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009. 384 p.

LAFRAIA, J. R. B.. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.** Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2001. 388 p.

SIQUEIRA, I. P.. **Manutenção Centrada na Confiabilidade.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005. 408 p.

Ar Comprimido Utilidades - FTA Compressor GA 75 W Atlas Copco

PRIMEIRO NÍVEL

SEGUNDO NÍVEL

TERCEIRO NÍVEL

QUARTO NÍVEL

QUINTO NÍVEL

SEXTO NÍVEL

